

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Trabalho de Formatura de 1997

Tratamento Termo-Químico

Cementação Gasosa



Orientador : Prof. Dr. Tibério Cescon

Graduando : Liaw Dick Djoesman



Índice

1. INTRODUÇÃO	3
2. CEMENTAÇÃO GASOSA COM HIDROCARBONETOS :	6
Atmosfera endotérmica.....	6
Composição da atmosfera.....	8
Gerador de gás endotérmico (gás portador) :	11
Relação ar : gás de entrada para o gerador.....	14
Cálculo da composição de equilíbrio.....	14
3. TESTE DE LÂMINA PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CARBONO :	22
4. GRADIENTE DE CONCENTRAÇÃO DE CARBONO E CARBONO SUPERFICIAL ...	25
Gradiente de carbono normal.....	30
Gradiente de carbono modificado.....	35
Carbono superficial presente	36
Baixo carbono superficial.....	42
Outras atmosferas para cementação.....	44
Precauções de segurança	46
Manuseio de atmosferas	47
5. EQUIPAMENTOS.....	49
Tipos de fornos	49
Início de operação ao forno	50
Injeção de gás no forno.....	50
Cementação com gás portador, enriquecimento com gás de hidrocarboneto	50
Introdução da atmosfera	50
Velocidades de escoamento.....	51
Operação para misturar os gases	55
6. PROCESSO	56
Variáveis de processo.....	56
Exemplos de ciclos de operação.....	59
Controle da profundidade da camada cementada	65
Medida da profundidade da camada cementada.....	65
Reprodutibilidade de resultados	67
Saturação de carbono.....	69



Cementação seletiva	72
Cementação homogênea	74
Alta temperatura de cementação	76
Influência da alta temperatura na construção dos fornos	76
Têmpera direta ou reaquecimento	78
Controle dimensional	81
Métodos para redução das distorções	85
7. REVENIMENTO	87
Revenimento de peças cementadas	87
8. CONCLUSÃO :	90
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92



1. INTRODUÇÃO

O uso do aço pelas indústrias tem sido muito questionado nos últimos anos, devido à presença de novos materiais como por exemplo : polímeros, cerâmicos, etc. Entretanto muitas peças continuam sendo fabricadas de aço devido às exigências mecânicas e térmicas a que estão sujeitas em aplicações em que as mesmas devam suportar desgaste, corrosão e fadiga.

Diariamente no mercado, toneladas de peças de aço de vários formatos e de inúmeros tipos de ligas diferentes são submetidos à algum tipo de tratamento térmico ou termo-químico.

Segundo Vicente Chiaverini, "o aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor, os aços comerciais não são ligas binárias : de fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação, nestas condições podemos considerá-los como :

- Aço-Carbono ou "liga ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até cerca de 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação".
- Aço-liga ou "aço-carbono que contém outros elementos de liga ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais "(2).

O tratamento termo-químico de cementação gasosa envolve principalmente : tempo, temperatura e potencial de carbono; onde, além das transformações estruturais do aço, ocorrem também alterações de sua composição química, limitado principalmente à sua superfície.



Os aços com baixo teor de carbono ($\leq 0,25\%C$) não atingem uma dureza elevada através da têmpera, desta forma a Cementação visa difundir carbono na superfície do aço de modo a que este, depois de adequadamente temperado (resfriamento brusco), apresente uma superfície muito mais dura.

É necessário que o aço, em contato com a substância capaz de fornecer carbono, seja aquecido a uma temperatura em que a solução de carbono no ferro seja fácil. Para isso, a temperatura deve ser superior à da zona crítica 850 a 950 °C, onde o ferro se encontrará na forma alotrópica gama.

Os processos usuais de cementação devem elevar o teor superficial de carbono até 0.8 a 1.0%. Fundamentalmente, a cementação é um fenômeno de difusão, isto é, relativo ao movimento de carbono no interior do aço. Portanto, a velocidade de enriquecimento superficial de carbono nos aços depende, em primeiro lugar, do seu coeficiente de difusão. Entretanto, na cementação influem também a fonte de suprimento de carbono e transferência deste para a superfície dos aços. Assim sendo, pode-se estabelecer que os fatores que influem sobre a velocidade de enriquecimento de carbono na superfície dos aços são os seguintes :

- ✓ teor inicial de carbono no aço.
- ✓ coeficiente de difusão do carbono no aço.
- ✓ temperatura de aquecimento do aço.
- ✓ concentração de carbono na austenita.
- ✓ natureza do agente carbonetante ou do gás de cementação.
- ✓ velocidade de fluxo do gás de cementação.

O objetivo principal é aumentar a dureza e a resistência ao desgaste superficial, ao mesmo tempo em que o núcleo do material permanece dúctil e tenaz. Essa possibilidade de se aliar uma superfície dura com um núcleo mais mole e tenaz é de grande importância em inúmeras aplicações da engenharia, sobretudo porque, pelo emprego dos aços com elementos de liga, pôde-se conseguir



núcleo de elevada resistência e tenacidade, com superfície extremamente dura, resultando num material capaz de suportar, em alto grau, certos tipos de tensões.



2. CEMENTAÇÃO GASOSA COM HIDROCARBONETOS :

Atmosfera Endotérmica

O tratamento térmico em atmosfera controlada é um método pelo qual há um gás envolvendo a carga o tempo todo. Este gás ou atmosfera tem duas funções principais : proteger a carga contra oxidação e manter um equilíbrio químico com o aço de modo a produzir a composição na superfície das peças.

É possível mediante o emprego adequado da atmosfera, fazer têmpera, cementação, carbonitreção, normalização, recozimento e coalescimento brilhantes.

Este gás é usualmente chamado de *gás portador* e é usado em conjunto com gases enriquecedores tais como gás natural ou propano e amônia. A combinação de todos estes gases possibilitará ao usuário a obtenção da atmosfera desejada no forno.

Dentro de um forno de tratamento térmico, a atmosfera endotérmica produzida no gerador, reage quimicamente com a superfície das peças aquecidas. Esta reação será tanto mais energética quanto maior for a temperatura do forno e as alterações produzidas dependerão essencialmente desta temperatura e da composição da atmosfera nele introduzida.

No caso de peças de aço, o carbono da peça torna-se ativo devido ao aquecimento dentro do forno. O efeito poderá ser o aumento gradativo do teor de carbono na superfície da peça. Caso a atmosfera tenha um potencial de carbono superior ao da peça naquela temperatura, tem-se uma cementação. Em caso contrário, ocorre a descarbonetação geralmente indesejável. Não havendo reação, se diz que a atmosfera endotérmica é neutra, ou seja ela tem o mesmo

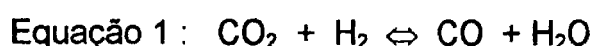


potencial de carbono do aço da peça naquela temperatura. Há então um equilíbrio de potenciais.

Torna-se imprescindível portanto controlar a composição da atmosfera. O mais fácil e simples método, para controle da atmosfera é através do ponto de orvalho, mas há também outros métodos para o controle da atmosfera, como veremos mais adiante.

O gerador de gás endotérmico é o fornecedor adequado de carbono quando se deseja alta pureza. O gás endotérmico a base de CO, H₂ e N₂, é obtido a partir da combustão incompleta de hidrocarbonetos. O gás butano é raramente usado devido a baixa demanda de carbono.

Dos derivados de hidrocarbonetos, o gás propano é o mais usado, pôr dissociação, à temperatura de dissociação, à temperatura de cementação, transforma-se em mistura gasosa. O monóxido de carbono (CO) e os hidrocarbonetos decompõem-se quase que completamente, em carbono e hidrogênio. Essa decomposição pode provocar o depósito de carbono livre e conseqüentemente o aparecimento de pontos moles na superfície do aço. Por esta razão, procura-se diluir os hidrocarbonetos em gases do tipo do hidrogênio e do nitrogênio que estabilizam o processo de carbonetação, visto que o hidrogênio, apesar de sua ação predominantemente descarbonetante, favorece a carbonetação pela formação e regeneração do monóxido de carbono. Assim na cementação gasosa, o hidrogênio constitui uma verdadeira fonte de CO e age como acelerador do processo, como mostrado na reação da equação 1:



A função dos gases diluidores, nitrogênio e hidrogênio, é evitar igualmente uma atmosfera excessivamente concentrada adjacente às entradas de gás, garantir movimento rápido do gás no interior do forno e, principalmente, garantir no interior deste um volume de gás suficiente para manter uma pressão positiva em



todos os pontos e, ao mesmo tempo, evitar a necessidade de adicionar quantidades excessivas de hidrocarboneto.

Para uma cementação uniforme é necessário boa circulação dos gases no forno, pois os gases de hidrocarbonetos fornecem grande quantidade de carbono disponível, a circulação resultante de um único fluxo de gás não é suficiente para produzir uma cementação uniforme.

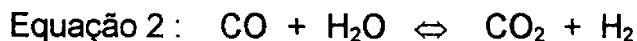
É necessário que os forno para cementação gasosa, tenha recirculação forçada dos gases com alta vazão, em todas as peças no interior da câmara de cementação. Na prática normalmente usa-se gás endotérmico ou gás exotérmico purificado como portador, enriquecido com um gás de hidrocarboneto, como por exemplo, o gás natural ou o gás propano.

A relação da mistura entre o gás portador e o gás de enriquecimento tem larga variação na indústria, mas usualmente é na proporção de 8:1 a 30:1, dependendo do tipo de gás portador e do tipo de hidrocarboneto, do tipo e condições do forno, da eficiência da recirculação e da superfície da carga.

Composição da Atmosfera

A atmosfera do forno usada para cementação consiste de um gás endotérmico, chamado de gás portador e outro gás de enriquecimento de hidrocarboneto que pode ser o propano, o metano ou o gás natural.

Os principais componentes da atmosfera são : CO , N_2 , H_2 , CO_2 , H_2O , CH_4 e O_2 , destes componentes o N_2 é inerte, desempenhando apenas a função de diluente. A soma de CO , CO_2 , H_2O e H_2 presentes são muito próximas das proporções esperadas para o equilíbrio de reversibilidade da reação da equação 2 :



- ✓ dando as proporções particulares de C, O e H na atmosfera
- ✓ o CO_2 , H_2O e O_2 apresentam-se em baixas concentrações na atmosfera.

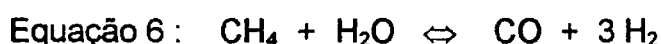
Embora a sequência de reações envolvidas na cementação gasosa não seja conhecida em detalhes, sabe-se que o carbono pode ser adicionado ou removido do aço pelas reações das equações 3 e 4:



O processo de cementação baseado somente na decomposição do CO exige grande vazão de gás, como por exemplo, a retirada de 0.47 g de carbono de um metro cúbico de gás portador a 952 °C é suficiente para reduzir a relação de CO para CO_2 de 249 para 132 e o potencial de carbono de 1.25% para 0.8%.

A retirada de 0.47g de carbono representa aproximadamente a mesma porção presente em 100 cm² de área superficial do aço com camada cementada de 1.0mm de profundidade.

Os gases propano ou metano de enriquecimento do gás portador são as fontes primárias de carbono para cementação, pelas reações 5 e 6:



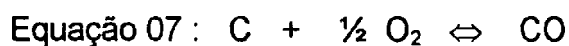
Nas quais reduzindo-se as concentrações de CO_2 e H_2O , respectivamente, as reações das equações acima recuperam CO e H_2 , em relação as reações das



Equações 03 e 04, as reações das Equações 05 e 06 não se aproximam do equilíbrio.

O **Potencial de Carbono** é o teor de carbono que uma lâmina de aço atinge na presença de um meio cementante, após um tempo suficiente para a difusão do carbono em toda a sua espessura. O controle do potencial de carbono durante a cementação é alcançado variando-se o fluxo do gás de hidrocarboneto de enriquecimento e mantendo-se fixo a vazão do gás endotérmico (portador), é a base fundamental para regulagem do gás de enriquecimento.

O **Ponto de Orvalho** é a temperatura em que o vapor d'água presente, verificado através da medição do ponto de orvalho, dióxido de carbono (CO_2) presente, verificado através de análise infravermelha do gás ou através do potencial de oxigênio detectado por sensor de zircônia. O potencial de oxigênio é relacionado ao potencial de carbono pela Equação 07 :



Quando o dióxido de carbono presente na atmosfera do forno permanecer constante, ambos, dióxido de carbono e potencial de oxigênio proporcionam uma boa medição do potencial de carbono.

Se a atmosfera do forno está saturada (formando fuligem), o hidrogênio presente na atmosfera aumenta e o monóxido de carbono reduz proporcionalmente. A fuligem também resulta da baixa quantidade de dióxido de carbono (CO_2) presente e do baixo potencial de oxigênio, correspondente para um dado potencial de carbono.

O ponto de orvalho permanece quase sempre constante, uniforme se a atmosfera é diluída com hidrogênio como resultado da saturação.



Gerador de Gás Endotérmico (gás portador) :

O principal fornecedor de gás portador, obtido a partir de hidrocarbonetos para atmosfera dos fornos de cementação gasosa é o **Gerador de gás endotérmico**. É um produtor de gás que transforma cataliticamente um gás de boa qualidade numa atmosfera protetora. Geralmente, a sua composição é referida como 24-32-44 ou aproximadamente 24% CO, 32% H₂ e 44% N₂, com pequenas quantidades de metano, dióxido de carbono e vapor d'água. A análise final do gás depende da composição química do gás de hidrocarboneto e da relação exata ar-gás sob a qual o Gerador está funcionando.

O processo usado é basicamente muito simples. Ar e gás são colocados num misturador ajustável (carburador) para uma relação exata, essa mistura ar-gás é introduzida numa retorta aquecida onde se dá uma combustão parcial. A retorta é aquecida, externamente, por meio de resistência elétricas ou pela chama de um combustível (geralmente GLP ou o próprio Propano). A mistura dos gases parcialmente queimados, atravessa a camada de um catalisador devidamente aquecido, feito a base de nitrato de níquel impregnado em material cerâmico poroso, onde ocorre o craqueamento de suas moléculas, formando-se então um novo gás que é rapidamente resfriado em um trocador de calor para que se estabilize sua composição química.

A qualidade e análise final do novo gás assim formado dependem dos seguintes fatores :

- ✓ tipo do gás de hidrocarboneto usado
- ✓ relação ar-gás
- ✓ velocidade de resfriamento do gás
- ✓ condição e tipo de catalisador usado
- ✓ temperatura da retorta
- ✓ quantidade de gás que está sendo consumido



O controle do Gerador é feito por verificações periódicas do ponto de orvalho do gás gerado e quaisquer ajustes que se fizerem necessários para se conseguir o ponto de orvalho desejado deverá ser feito agindo-se sobre a relação ar/gás. O ponto de orvalho normalmente usado situa-se na faixa de 0 a +4°C. No entanto, em caso de necessidade, o Gerador pode operar entre -6 a +16 °C, porém, o catalisador torna-se rapidamente impregnado com fuligem quando operado a -6°C, impedindo deste modo o funcionamento satisfatório do Gerador.

A temperatura normal de funcionamento do Gerador é em torno de 982°C, contudo pode-se também operá-lo à temperaturas mais altas. O hidrocarboneto mais usado no Brasil é o gás propano com pureza mínima de 96 % volume, contendo no máximo 2 % de propileno.

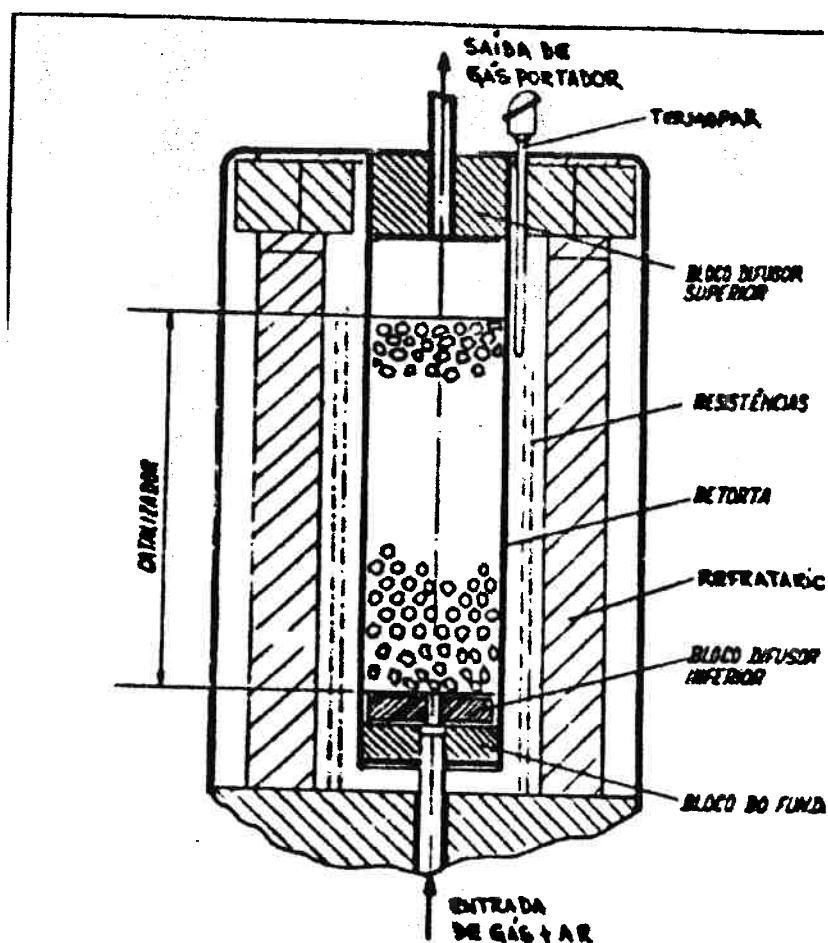


FIGURA 1 - Gerador de Gás Endotérmico

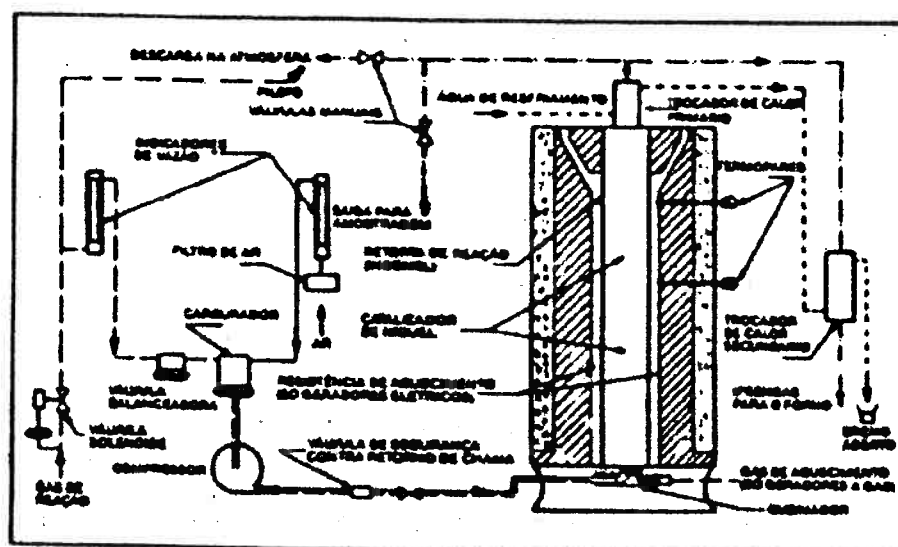


FIGURA 2 - Diagrama de Fluxo simplificado do Gerador de gás portador

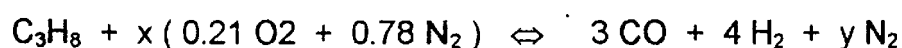


Relação ar : gás de entrada para o Gerador

Como o propano é o gás mais usado e também o que permite um melhor controle da atmosfera, será utilizado como exemplo para detalhar o processo, conforme a Equação 08:



Sabendo que a composição do ar é de aproximadamente 21% O₂ e 78% N₂, temos :



Portanto, teremos :

$$x = 7.14 \quad \text{e} \quad y = 5.57$$

Na prática trabalha-se com excesso de ar (relação em torno de 7.5:1), formando um gás portador de composição : 23.86% CO, 31.82% H₂ e 44.32% N₂.

Cálculo da Composição de Equilíbrio

Cementação gasosa é um processo não equilibrado, onde os componentes gasosos da atmosfera do forno não estão totalmente em equilíbrio entre si e a atmosfera do forno também não está em equilíbrio com o aço que está sendo cementado.

Contudo, algumas importantes reações (equação 2 e 5) aproximam rapidamente do equilíbrio, suficiente para permitir prognósticos da taxa de cementação, oriunda da composição da atmosfera.



Desta forma, o mesmo gradiente da camada cementada pode ser esperado de diferentes tipos de forno, com diferentes taxas de fluxo de gás da atmosfera, onde os seguintes fatores deverão ser mantidos constantes :

- ✓ Potencial de carbono, como meio de transporte de CO_2 e H_2O ou medida do potencial de oxigênio.
- ✓ Tempo de cementação.
- ✓ Temperatura de cementação.

Gradiente da camada cementada : o perfil da concentração de carbono da camada é decrescente da superfície para o núcleo da peça.

O equilíbrio da composição do gás resulta das reações e proporções do gás de hidrocarboneto de enriquecimento e ar.

Duas relações de equilíbrio, as reações das equações 2 e 5, produzem duas equações adicionais 8 e 9, assim determinando todas as pressões parciais.

$$K_2 = \frac{a_c \cdot p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}}^2}$$

Equação 09 :

onde p_{CO_2} e p_{CO} são as pressões parciais de CO_2 e CO
 a_c é atividade do carbono
 K_2 constante de equilíbrio para a equação 3.

$$\text{Equação 10 : } \Delta F^\circ \text{CO}_2 - 2\Delta F^\circ \text{CO} = -RT \ln K_2$$

onde $\Delta F^\circ \text{CO}_2$ e $\Delta F^\circ \text{CO}$ = energias livres
 T = temperatura absoluta



R = constante dos gases

K_2 = constante de equilíbrio, calculado na equação 8.

A reação da Equação 10, relaciona a atividade do carbono e o teor de carbono da austenita.

$$\text{Equação 11 : } \log a_c = \frac{2300}{(T - 0.920)} + \frac{17950w}{T(100 - w)} + \log (4.65w / 100 - 5.65w)$$

onde T = temperatura (K)

w = porcentagem de carbono na austenita

Combinando as equações 9 e 11, temos a relação entre o potencial de carbono com o teor de monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) presentes, porque a mudança fracional do CO é pequena para uma mudança grande do CO₂.

Normalmente não é necessário controlar ambos os gases para se estimar o potencial de carbono, porque o gás endotérmico derivado do gás propano tem teor de monóxido de carbono em cerca de 23 %, enquanto o gás derivado do metano tem cerca de 20 %.

O teor de CO₂ correspondente para a determinação do potencial de carbono são altos para o propano e metano.

As figuras 3 e 4 mostram a relação entre o CO₂ e o potencial de carbono, para o gás endotérmico para cementação, derivados do metano e propano, respectivamente.

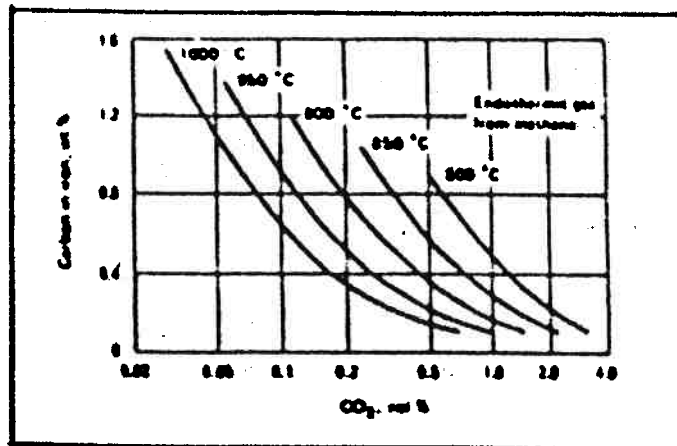


FIGURA 3 - Relação entre CO_2 e Potencial de carbono para o gás portador oriundo do metano

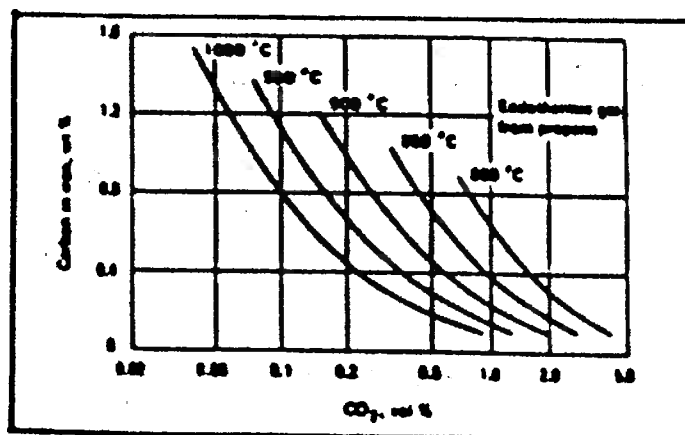


FIGURA 4 - Relação entre CO_2 e Potencial de carbono para o gás portador oriundo do propano

O potencial de oxigênio ou pressão parcial de oxigênio, medido através de sensor de zircônia, informando a atividade do carbono pela reação da equação 12, de equilíbrio:



$$\text{Equação 12 : } a_c = P_{\text{CO}} / K_7(P_{\text{O}_2})^{1/2}$$

onde P_{O_2} = pressão parcial de oxigênio

K_7 = constante de equilíbrio

Na atmosfera de cementação, a pressão parcial de oxigênio é de aproximadamente 10^{-19} a 10^{-25} atm.

A voltagem de saída do sensor de zircônia com o ar de referência será em função da temperatura absoluta e da pressão parcial de oxigênio, de acordo com a reação 13 :

$$\text{Equação 13 : f. e. m. (volts) = } 4.9593 \times 10^{-5} T \times \log_{10}(P_{\text{O}_2} / 0.209)$$

onde f. e. m. = força eletromotriz

P_{O_2} = pressão parcial na atmosfera

T = temperatura absoluta

Combinando as equações 11,12 e 13, temos a relação entre o potencial de carbono e a força eletromotriz. Porque esta relação também depende do monóxido de carbono (CO) presente na atmosfera, a f.e.m. medida, corresponde certamente ao potencial de carbono do gás portador derivado do metano, Fig. 5, que é diferente do gás portador derivado do gás propano, Fig. 6.

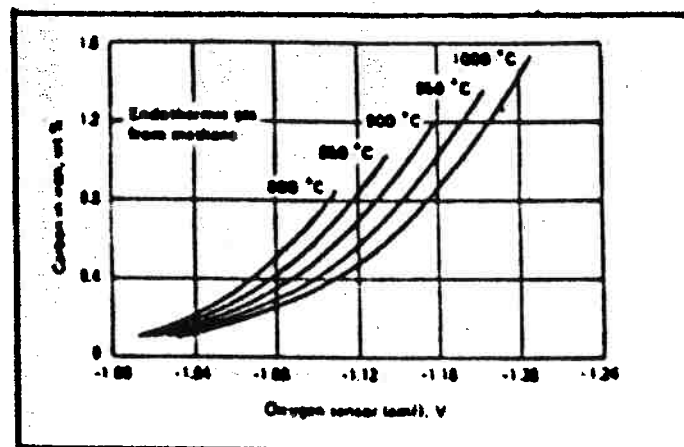


FIGURA 5 - Medidas da f.e.m. do gás portador oriundo do metano

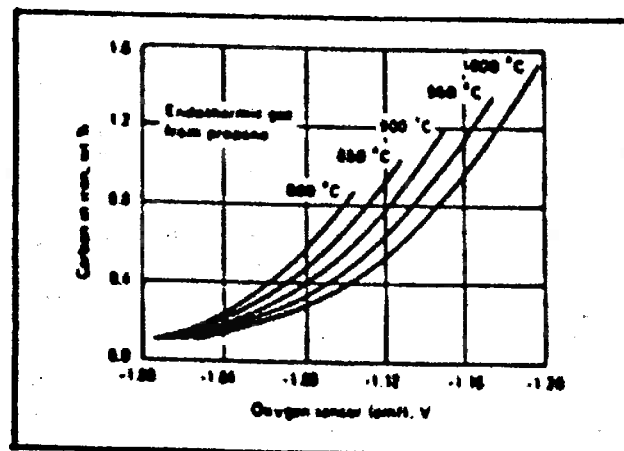


FIGURA 6 - Medidas da f.e.m. do gás portador oriundo do propano

O vapor d'água presente na atmosfera está relacionado ao potencial de carbono da reação da Equação 04, o equilíbrio da relação é a reação da Equação 14 :

$$\text{Equação 14: } a_c = \text{PCO} \cdot \text{PH}_2 / \text{PH}_2\text{O} \cdot K_3$$



onde K_3 = constante de equilíbrio.

Para a atmosfera derivada de algum hidrocarboneto particular, o produto do monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂) presentes tem pequenas variações para grandes mudanças do vapor d'água presente na atmosfera.

O vapor d'água presente na atmosfera normalmente é medido para se determinar o Ponto de Orvalho, a reação da Equação 15, relativa ao Ponto de Orvalho em graus Celsius (°C) e PH₂O na atmosfera :

$$\text{Equação 15: Ponto de Orvalho (°C)} = 5422.18 / (14.7316 - \ln PH_2O) - 273.16$$

As reações das Equações 11, 14 e 15 podem ser combinadas para fornecer a relação entre Ponto de Orvalho e Potencial de Carbono, mostrado nas Fig. 7 e 8, para o gás portador para cementação derivados do metano e propano, respectivamente.

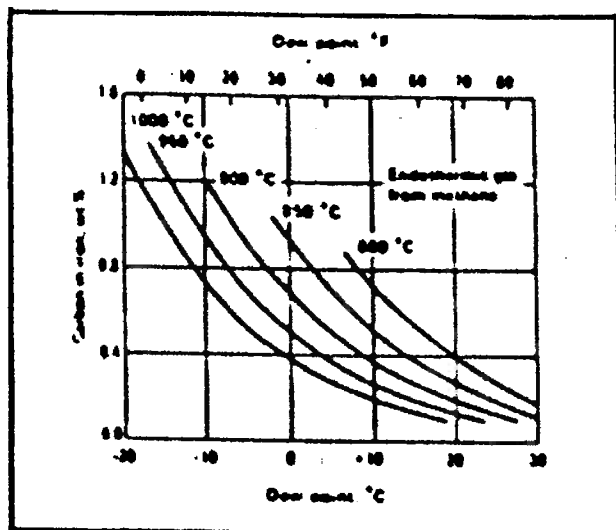


FIGURA 7 - Relação entre Ponto de Orvalho e Potencial de Carbono para o gás portador oriundo do metano.

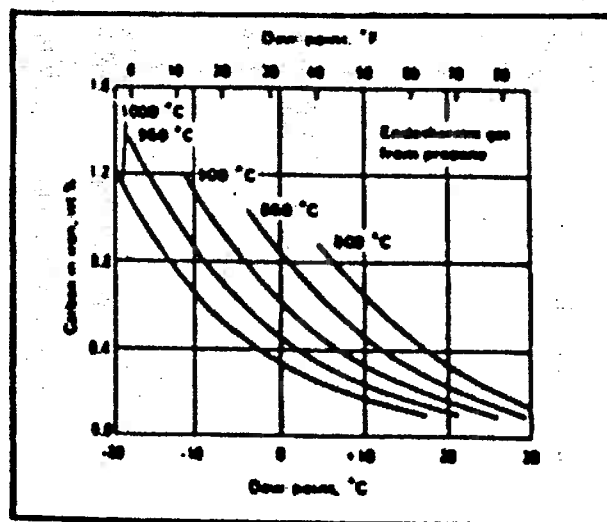


FIGURA 8 - Relação entre Ponto de Orvalho e Potencial de Carbono para o gás portador oriundo do propano.

Se grandes volumes com grande área superficial são processados ou se a atmosfera do forno está saturada, a taxa de hidrogênio produzido descrito na Equação 6, pode ser suficiente para mudar significativamente as relações mostradas nas figs. 2 a 8.

Quando a atmosfera tornar-se diluída com hidrogênio, o potencial de carbono correspondendo ao CO_2 presente, a f.e.m. do sensor de oxigênio será reduzida.

A relação entre o ponto de orvalho e o potencial de carbono não é altamente afetada, entretanto se não houver possibilidade que outros diluentes como por exemplo, o Nitrogênio (N_2), ter sido acrescentado no forno, uma atmosfera anormal baixa em CO , (17% ou menos para o gás portador derivado do metano, por exemplo) é uma indicação que a atmosfera está sendo diluída com hidrogênio.



3. TESTE DE LÂMINA PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CARBONO :

O método mais correto de se controlar um processo às vezes não é sequer viável. Ao tentarmos controlar o potencial de carbono de sua atmosfera com lâminas de ferro, no momento em que sair a análise da primeira lâmina de ferro, a carga já terá saído do forno e então não adiantará constatar que deveria ter cortado o propano já durante aqueles 2 minutos em que a lâmina ainda estava no forno. Aí só restarão a fuligem nas peças, a austenita retida, os carbonetos, etc..

Por ser um teste de resposta lenta, o teste de lâmina não serve para o controle do processo. Porém, é definitivo para monitorar qualquer sistema automático de controle de potencial de carbono. Para se ter certeza de que o Carbon Sensor (ou outro instrumento de medição) está correto ou não, pode ser feito o teste de lâmina e compara-se os resultados de %C analisado com o %C indicado no controlador.

Ensaio :

- a) De um rolo de fita com espessura de 0.50 mm com 0.1% de carbono (C) e, outro com 1.0 %C, cortar dois pedaços com peso de 0.5 e 1.0 grama, respectivamente.
- b) Lavar as peças com solvente clorado, seca-las, curva-las no sentido longitudinal, apenas o suficiente para poder amarra-las ao dispositivo e ter condições de introduzi-las no forno.
- c) Abrir a válvula de acesso e introduzir as lâminas na atmosfera do forno. Deixa-las expostas pelos seguintes tempos :



Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
950	10
900	20
850	45
800	90

- d) Recuar a haste com velocidade em torno de 15 mm por segundo. Tomar cuidado para que a retirada seja lenta suficiente, a ponto de não provocar a ignição do gás (atmosfera) que escapa na abertura da válvula, caso contrário, as lâminas poderão sofrer oxidação e o ensaio ficará comprometido. Com a haste recuada, aguardar um mínimo de 2 minutos, em seguida fechar a válvula.
- e) Retirar as lâminas do suporte à frio de forma que não sujem nem engordurem. Transferi-las para envelopes identificados com o teor de carbono.
- f) Descartar as lâminas que não se apresentarem limpas e brilhantes pois superfícies opacas indicam a presença de cementita e a oxidação falseia os resultados da análise.
- g) Na determinação do teor de carbono o analisador deve estar calibrado com um padrão compatível e, naturalmente, deve ter boa precisão e repetibilidade.
- h) Devem ser descartados os resultados que :
- Apresentem diferenças maiores que 0.05% entre os teores finais das duas lâminas, ou seja, do par com teores iniciais de 0.1 % C e 1.0 % C.



- Forem maiores que o teor de saturação da atmosfera à temperatura de exposição no forno. Neste caso, a metalografia detectará presença de cementita.

O ensaio de lâmina poderá também ser realizado via gravimétrica, nas seguintes condições:

1. O rigor de limpeza, deverá ser dobrado.
2. O manuseio, obrigatoriamente, deverá ser com luvas limpas e pinça.
3. A balança deverá ser semi-microanalítica, com precisão mínima de 0.0001 gramas.
4. A fórmula de cálculo será :

Potencial de Carbono = (ganho em peso / peso final) * 100 + % Carbono Inicial



4. GRADIENTE DE CONCENTRAÇÃO DE CARBONO E CARBONO SUPERFICIAL

O gradiente de concentração de carbono carburizante é influenciado pela temperatura e tempo de cementação, tipo de ciclo (várias combinações de cementação e tempo de difusão), potencial de carbono das atmosferas dos fornos e composição química dos aços.

A composição química dos aços mais usados para cementação estão relacionados na Tabela II:

- ✓ Na cementação o carbono é transferido da atmosfera cementante para todas as partes da superfície do aço.
- ✓ carbono então difunde-se lentamente em toda superfície do aço, estabilizando o gradiente de concentração de carbono superficial.

As energias das forças para as reações de cementação é chamada de Potencial de Carbono, ficando as partes do aço com alto teor de carbono superficial e baixo carbono no núcleo, portanto a tendência do carbono é mover-se da superfície para o centro do aço.

A atmosfera cementante tem o potencial de carbono maior que a superfície do aço. Se durante o processamento o potencial de carbono da atmosfera cair abaixo do potencial de carbono superficial do aço, o carbono será retirado da superfície do mesmo.

Na termodinâmica, o potencial de carbono foi definido como: A energia livre parcial molal de carbono.

Entretanto, é costumeiro em tratamento termo-químico identificar o potencial de carbono, com o carbono presente no ferro. O potencial de carbono das misturas



gasosas a uma certa temperatura é então definida como o carbono presente do ferro no equilíbrio com a atmosfera naquela temperatura.

A atmosfera cementante, freqüentemente tem potencial de carbono maior do que a solubilidade limite do carbono no ferro, em casos semelhantes é melhor referir-se a atividade do carbono na atmosfera do forno.

Composição química dos principais aços para cementação

Steel	Composition, %							
	C	Mn	P(a)	S(a)	Si	Ni	Cr	Mo
Carbon steels								
1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.035	0.045	...	...	...	...
1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.035	0.045	...	...	...	...
1019	0.15-0.20	0.70-1.00	0.035	0.045	...	...	...	...
1020	0.17-0.23	0.30-0.60	0.035	0.045	...	...	...	...
1022	0.18-0.23	0.70-1.00	0.035	0.045	...	...	...	...
1039	0.37-0.44	0.70-1.00	0.035	0.045	...	...	...	...
1524	0.19-0.25	1.35-1.65	0.035	0.045	...	...	...	...
1527	0.22-0.29	1.20-1.50	0.035	0.045	...	...	...	...
Resulfurized steels								
1113	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.24.033	...	...	...	...
1117	0.14-0.20	1.00-1.30	0.040	0.08-0.13	...	...	...	...
Alloy steels								
3310	0.08-0.13	0.45-0.60	0.025	0.025	0.20-0.35	3.25-3.75	1.40-1.75	...
3310 H	0.07-0.13	0.30-0.70	0.035	0.040	0.20-0.35	3.20-3.80	1.30-1.80	
4023	0.20-0.25	0.70-0.90	0.035	0.040	...	...	...	0.20-0.30
4027	0.25.030	0.70-0.90	0.035	0.040	0.20-0.35	...	...	0.20-0.30
4118	0.18-0.23	0.70-0.90	0.035	0.040	0.20-0.35	...	0.40-0.60	0.08-0.15
4118H	0.17-0.23	0.60-1.00	0.035	0.040	0.20-0.35	...	0.30-0.70	0.08-0.15
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.035	0.040	0.20-0.35	...	0.80-1.10	0.15-0.25
4320	0.17-0.22	0.45-0.65	0.035	0.040	0.20-0.35	1.65-2.00	0.40-0.60	0.20-0.30
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.035	0.040	0.20-0.35	1.65-2.00	...	0.20-0.30
4815	0.13-0.18	0.40-0.60	0.035	0.040	0.20-0.35	3.25-...	...	0.20-



					0.35	3.75		0.30
4820	0.18-0.23	0.50-0.70	0.035	0.040	0.20-	3.25-	...	0.20-
					0.35	3.75		0.30
5120	0.17-0.22	0.70-0.90	0.035	0.040	0.20-	...	0.70-	...
					0.35		0.90	
5140	0.38-0.43	0.70-0.90	0.035	0.040	0.20-	...	0.70-	...
					0.35		0.90	
8617	0.15-0.20	0.70-0.90	0.035	0.040	0.20-	0.40-	0.40-	0.15-
					0.35	0.70	0.60	0.25
8617H	0.14-0.20	0.60-0.95	0.035	0.040	0.20-	0.35-	0.35-	0.15-
					0.35	0.75	0.65	0.25
8620	0.18-0.23	0.70-	0.035	0.040	0.20-	0.40-	0.40-	0.15-
		0.901			0.35	0.70	0.60	0.25
8620H	0.17-0.23	0.60-0.95	0.035	0.040	0.20-	0.35-	0.35-	0.15-
					0.35	0.75	0.65	0.25
8720	0.18-0.23	0.70-0.90	0.035	0.040	0.20-	0.40-	0.40-	0.20-
					0.35	0.70	0.60	0.30
8822H	0.19-0.25	0.70-1.05	0.035	0.040	0.20-	0.35-	0.35-	0.30-
					0.35	0.75	0.65	0.40
9310	0.08-0.13	0.45-0.65	0.025	0.025	0.20-	3.00-	1.00-	0.08-
					0.35	3.50	1.40	0.15

(a) Maximum composition, %

A atividade do carbono pode ser definida em termos de potencial de O_2 , ou CO e CO_2 , presentes na atmosfera, quando os componentes gasosos da atmosfera de forno estão em equilíbrio.

Em algumas temperaturas, há uma parte do carbono que pode ser dissolvida em austenita. Este limite, é o limite da solubilidade do carbono no ferro, é mostrado pela linha **Acm** no diagrama da fase ferro - carbono da Figura 9.

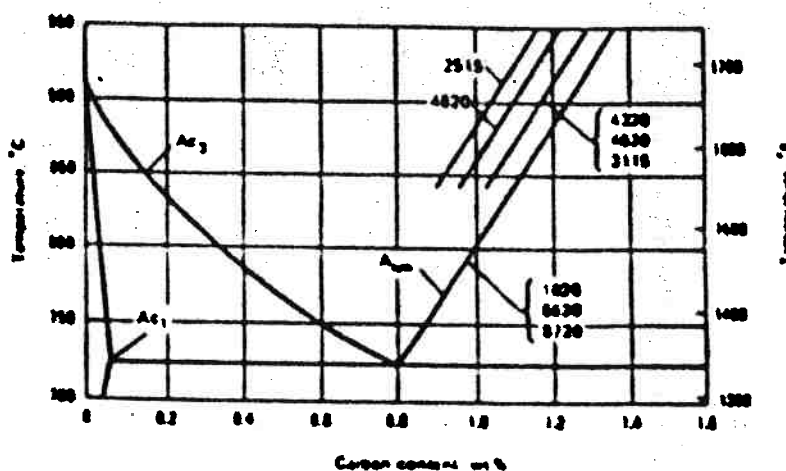


FIGURA 9 - Limite de solubilidade do carbono na austenita, para oito tipos de aços

A adição dos elementos de liga no ferro, tende a reduzir a solubilidade limite do carbono, os limites aproximados são mostrados para os diversos tipos de aços na Figura 9.

Na atmosfera cementante com um potencial de carbono bem acima do limite de solubilidade, o carbono presente na superfície do aço será superado no tempo a solubilidade limite. A austenita da superfície estará saturada em carbono e o restante de carbono estará presente como carboneto, (Fe_3C), no aço de baixa liga.

Os constituintes básicos dos aços são: Austenita, Ferrita, Cementita e Perlita.

Austenita: (do metalurgista Inglês Roberts-Austen), nos aços-carbono comuns, só é estável acima de 727°C ; consta de uma solução sólida de carbono no ferro grama e apresenta uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui boa resistência mecânica e apreciável tenacidade; é não magnética.



Ferrita: (do latim "ferrum") é ferro no estado alotrópico alfa, contendo em solução traços de carbono; apresenta também uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui baixa dureza e baixa resistência à tração, cerca de 28Kgf/mm^2 , mas excelente resistência ao choque elevado alongamento.

Cementita: (do latim "caementum") é o carboneto de ferro Fe_3C , contendo 6,67% de carbono; muito dura, quebradiça, é responsável pela elevada dureza a resistência dos aços de alto carbono, assim como pela sua menor ductilidade. Possui estrutura cristalina ortorrômbica.

Perlita: (nome devido à "nuance" das cores de madrepérola que esse constituinte freqüentemente apresenta ao microscópio) é a mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, na forma de lâminas finas de espessura raramente superior a um milésimo de milímetro, dispostas alternadamente. As propriedades mecânicas de perlita são, portanto, intermediárias entre as da ferrita e cementita, dependendo, entretanto, do tamanho das partículas de cementita. Sua resistência à tração é, em média, 75Kgf/mm^2 . A proporção de perlita num aço cresce de 0% para o ferro até 100% para o aço eutetóide (0,8% C), de modo que um aço com 0,5% de carbono, por exemplo, apresentará cerca de 65,0% de perlita.

Um gradiente particular de concentração de carbono desenvolvido durante a cementação gasosa, depende dos seguintes fatores:

- ✓ **potencial de carbono da atmosfera do forno**, quanto maior o potencial, mais rápido serão o suprimento de carbono para o aço e a subida do gradiente de concentração de carbono na superfície do aço.
- ✓ **A taxa de reação na superfície do aço**, a natureza a concentração das espécies moleculares presentes na atmosfera do forno afetam a taxa de reação, por exemplo: A reação superficial é mais rápida numa atmosfera de gás base endotérmico (portador) do que numa atmosfera de metano-hidrogênio.



- ✓ **Temperatura de cementação**, aumentando a temperatura, aumenta a taxa de reação na superfície do aço, e o mais importante, aumenta a taxa de difusão do carbono no aço. O potencial de carbono de uma atmosfera de gás portador com proporções fixadas de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio aumentam quando a temperatura diminui.
- ✓ **Tempo de cementação**, a profundidade de penetração de carbono aumenta quando aumenta-se o tempo.
- ✓ **As ligas presentes no aço**, exercem influências primárias no carbono da camada cementada e também exercem influências secundárias na taxa de difusão do carbono com o aço.

GRADIENTE DE CARBONO NORMAL

Um gradiente de carbono normal é produzido pela manutenção da austenita saturada na superfície do aço durante todo o ciclo. A Figura 10 ilustra a influência da temperatura de cementação no gradiente de carbono para cementação do aço 1020, num forno tipo Batch. Dados comparáveis também são dados para o aço 8620 cementado durante 7,5 horas em atmosfera contendo 12% de metano.

A temperatura de cementação para ambos os casos foram 870°C, 900°C e 925°C (1600°F, 1650°F e 1700°F), respectivamente.

As curvas do gradiente de carbono obtida num forno tipo Batch convencional, dando austenita saturada na superfície, são mostradas na Figura 11, para quatro tipos de aços (1020, 2512, 3312 e 4615), depois de 4 horas de cementação a 870°C e 925°C (1600°F e 1700°F) respectivamente.

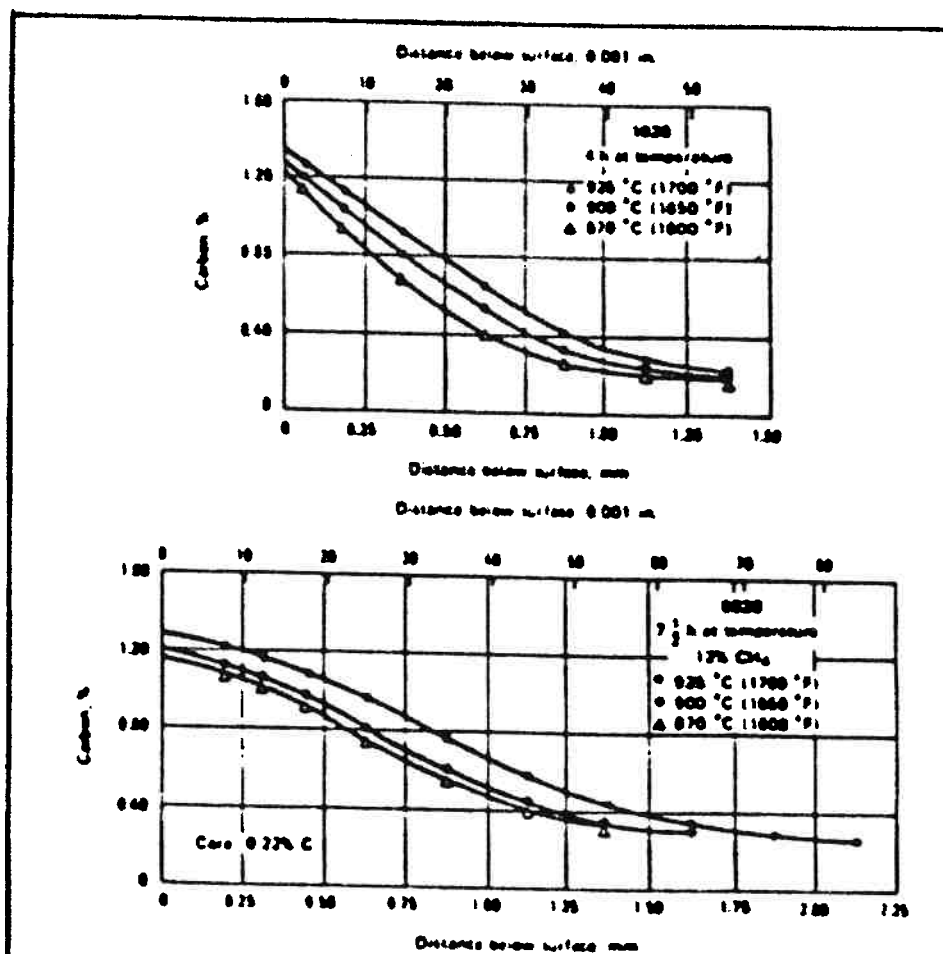


FIGURA 10 - Gradiente de carbono para os aços 1020 e 8620

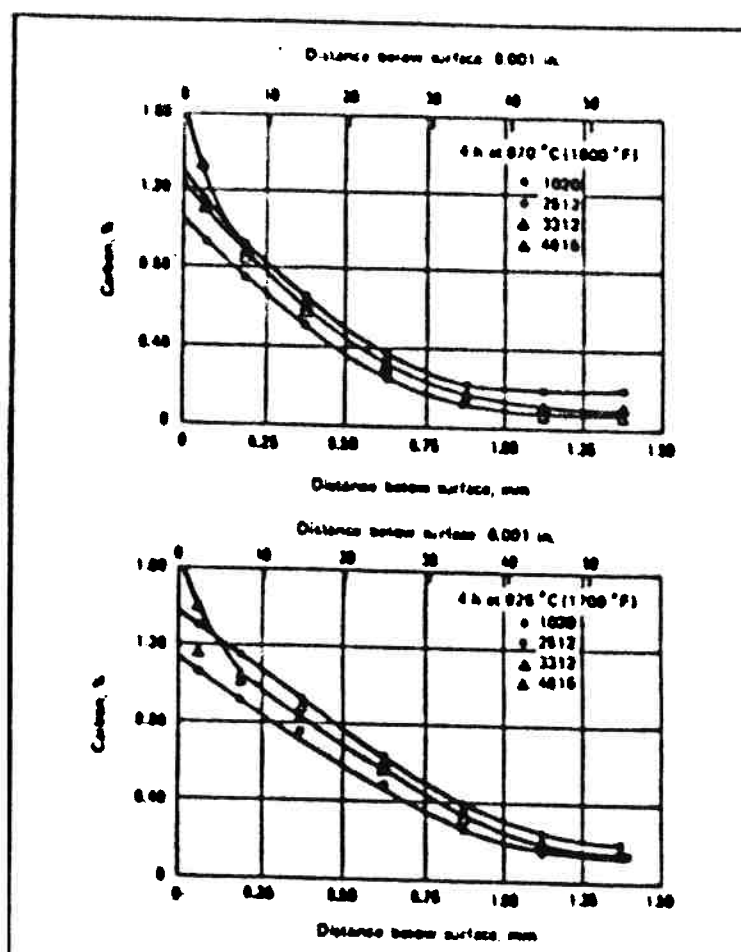


FIGURA 11 - Gradiente de carbono para quatro tipos de aços, após a cementação

Influências típicas do metano: potencial de carbono e tempo do gradiente normal de carbono no aço 1022, são mostrados nas Figuras 12 e 13.

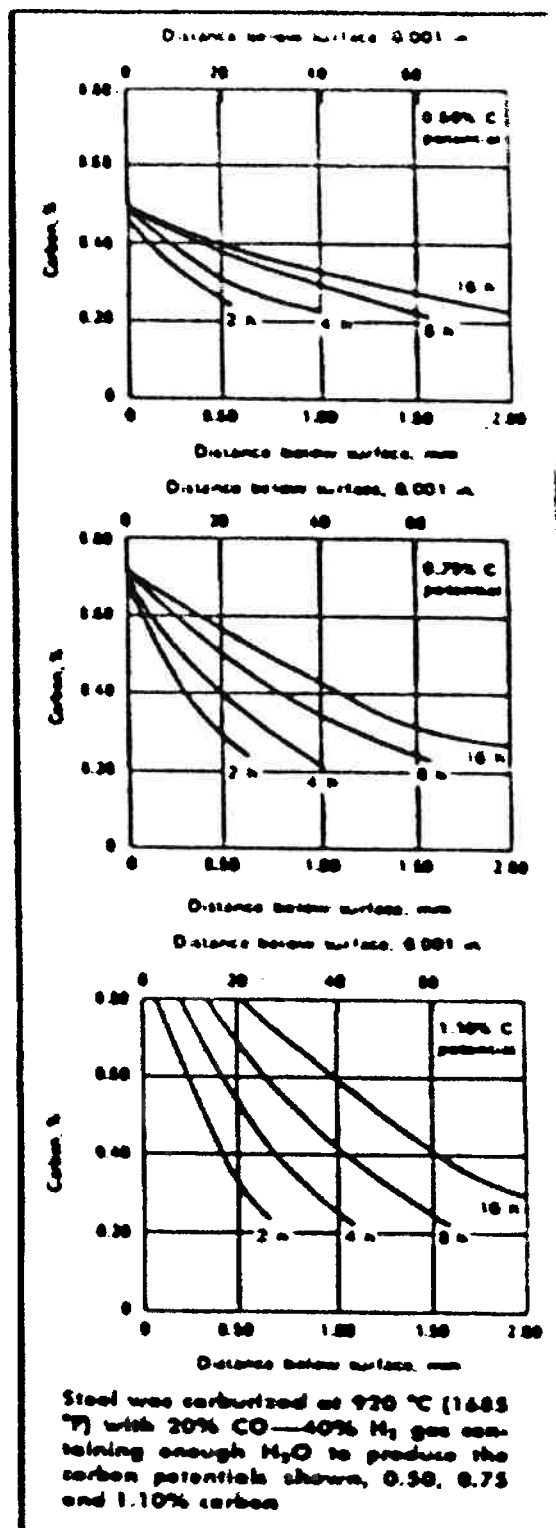
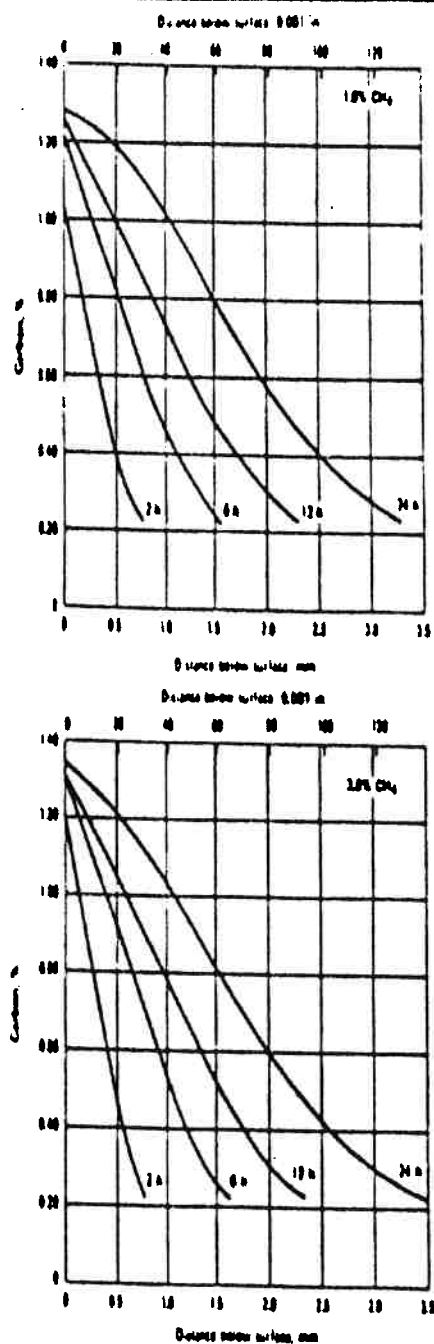


FIGURA 12 - Gradientes de carbono nos testes de barras de aço 1022



Feo bars were carburized at 920 °C (1685 °F) in 20% CO—40% H₂ gas with 1.6 and 2.8% CH₄ added

FIGURA 13 – Gradiente nos testes de barras de aço 1022



GRADIENTE DE CARBONO MODIFICADO

Várias modificações do gradiente normal de carbono são obtidos pelo controle de temperatura, tempo e composição da atmosfera. Os seguintes exemplos típicos da zona de controle dos fornos contínuos de cementação são mostrados:

Exemplo 1: A Figura 14 ilustra dois tipos de cementação gasosa obtidos no aço 4027 no mesmo forno contínuo operando identicamente com tempo e temperatura abaixo do ciclo, mas com diferentes condições de controle de atmosfera. O caso com alto carbono presente na superfície foi produzido sem consideração da alta demanda de carbono no início do ciclo de cementação e baixa demanda de carbono durante a parte final do ciclo.

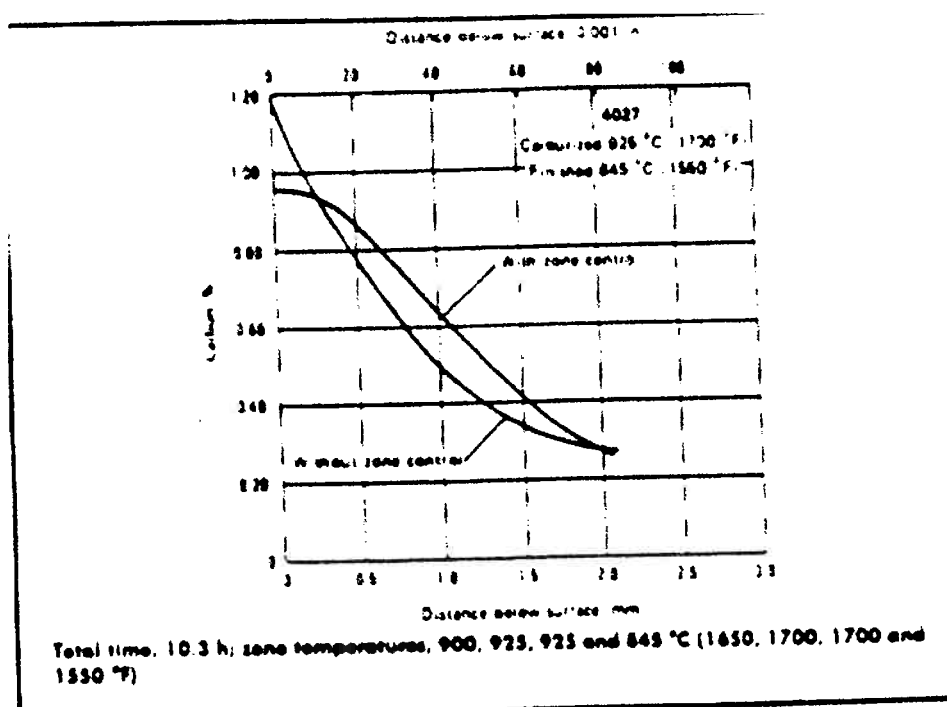


FIGURA 14 - Efeito do controle da atmosfera no gradiente de carbono na cementação do aço 4027, em forno contínuo

A distribuição uniforme da mistura do gás portador mais o gás de enriquecimento de hidrocarboneto foram admitidos em vários pontos ao longo do



forno, a relação do gás portador para o gás de hidrocarboneto era alta, suficiente para garantir mínima deposição de fuligem durante a cementação e partes de resfriamento do ciclo.

O outro caso mostrado na Figura 14 foi produzido nas idênticas condições exceto na distribuição da atmosfera no forno, todo gás de hidrocarboneto necessário foi admitido em vários pontos da zona de cementação, com a maior quantidade adicionada nas primeiras zonas do forno. O gás portador sem o gás de enriquecimento foi adicionado nas zonas de difusão e resfriamento.

EXEMPLO 2 - O aço 4815 cujos dados são mostrados na Figura 15, foi cementado em três zonas contínuas de um forno tipo Pusher. O potencial de carbono foi controlado manualmente, detalhes do tratamento usado para obter os três gradientes de carbono são dados na Figura 15.

CARBONO SUPERFICIAL PRESENTE

Como indicado na Figura 14. O controle do gradiente de carbono também afeta a concentração superficial de carbono, o carbono presente tem efeito positivo nas propriedades do aço e deve ser controlado para se obter ótimos resultados.

O carbono presente na solução determina a quantidade de austenita que será retida após a têmpera na composição do aço. A quantidade de austenita retida será em função do carbono presente dissolvido e porque afeta a dureza da camada cementada na têmpera (não atinge o máximo), é importante ter esse controle para se obter dureza superficial desejada.

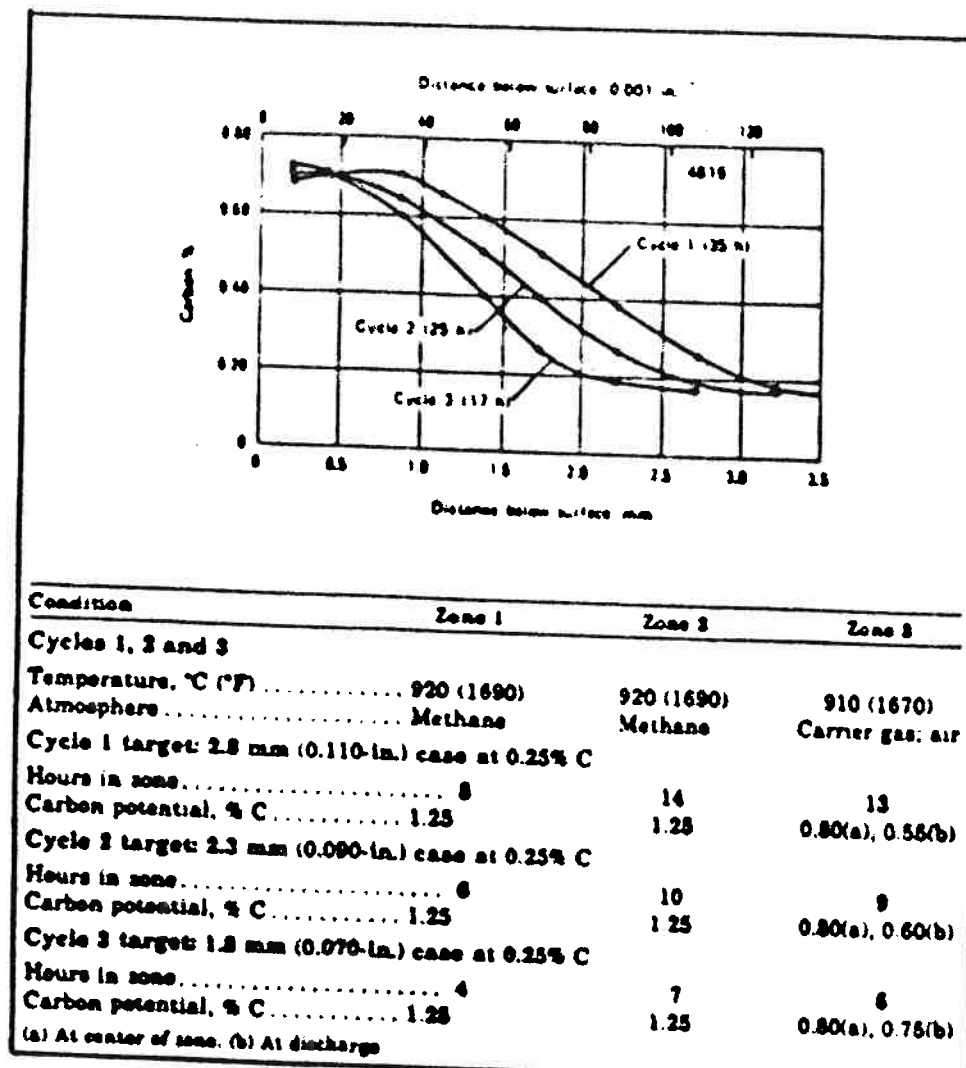


FIGURA 15 - Gradiente de carbono de três zonas de controle de um forno para cementação tipo Pusher.

O potencial de carbono, ciclo de cementação, temperatura e taxa de têmpera, ciclo de difusão e composição química do aço, afetam a quantidade de austenita retida após a têmpera.

O gradiente de carbono é relatado para dureza da camada cementada, como mostrado pelos dados da Figura 16 para o aço 1024.

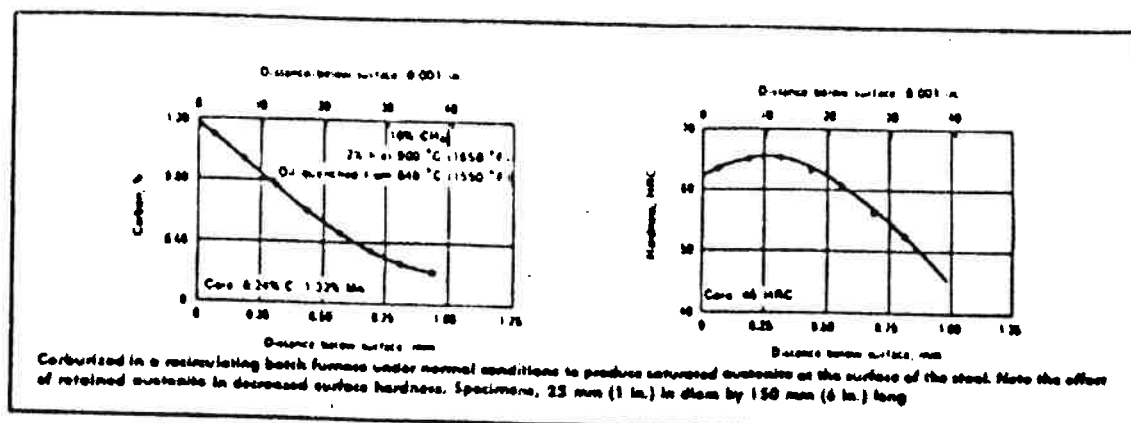


FIGURA 16 - Gradientes de carbono e de dureza para o aço 1024

Este aço foi cementado por 2 horas e 15 minutos a 900°C (1650°F) e, atmosfera contendo 10% de metano e foi temperado em óleo a 845°C (1550°F) e obteve dureza máxima em torno de 62 HRC, entretanto a dureza em torno de 66 HRC foi obtida com profundidade de 0,25 mm abaixo da superfície da camada cementada, indicando a presença de austenita retida na superfície.

Geralmente é aceitável, que a quantidade de austenita retida deve ser abaixo de 15%, para não causar danos de microfissuras e fadiga no aço, quando a austenita é finamente dispersada, motivo pelo qual pequenas quantidades de austenita retida não causam danos ao aço aparentemente, é que a presença de elementos de liga unidos na sua superfície, ajustam-se rapidamente e variam a carga uniformemente, dessa forma reduzindo áreas locais de altas tensões.

O efeito do carbono superficial presente nas microfissuras e fadiga tem sido assunto de controvérsias por muitos anos, testes de fadiga do ângulo de ataque de cilindros de laminação tem indicado que as microfissuras e fadiga sob cargas oscilantes aumentam com o aumento da dureza para os aços de médio e alto teor de carbono.



A importância do controle do carbono superficial em peças é um assunto discutido em fadiga de flexão, entretanto muitos testes práticos indicam que a resistência à fadiga de flexão aumenta quando a austenita retida decresce.

O efeito do carbono superficial presente na resistência à abrasão e desgaste por atrito é também discutido para se garantir uma conclusão geral. Austenita retida excessiva provoca deformação plástica na carga, resultando em ondulação ou defeito da “casca de laranja” (defeito superficial).

Dados estatísticos relatam o controle do carbono superficial presente, são dados nas figuras 17, 18 e 19 para vários planos de carbono e aços de baixa liga.

Esses dados práticos representam tipos diferentes, envolvendo vários tipos de fornos, composição química dos aços e controles variados, como indicados:

EXEMPLO 3 - Dados da Figura 17 comparam a concentração de carbono superficial abaixo de 0,25 mm, obtido em cementação gasosa, sendo 25 lotes em cada dos três tipo Batch, similares. Somando no total 75 testes práticos, mostrando uma grande faixa de variações que vão de aproximadamente 0,05 a 0,90% de carbono. As peças foram cementadas a 925°C (1700°F), com controle automático do ponto de orvalho, sendo que o ponto de orvalho do gás portador estava em + 2°C (35°F) e foi enriquecido com gás natural para manter o ponto de orvalho em -6°C (22°F) no forno.

EXEMPLO 4 - Dados da Figura 18 comparam a concentração de carbono superficial em 50 amostras de brocas em aço 4815 cementado em dois fornos tipo Poço, com concentração de 0,75% de carbono. Os fornos foram operados simultaneamente, usando o mesmo gerador de gás portador, cada forno tinha as seguintes dimensões: 0,90m (36 polegadas) de diâmetro por 1,80m (72 pol.) de profundidade e contendo uma carga de aproximadamente 1360Kg (3000 lb.). Foi usado um ciclo de cementação por difusão e um controlador automático de ponto de orvalho somente no gerador de gás portador.

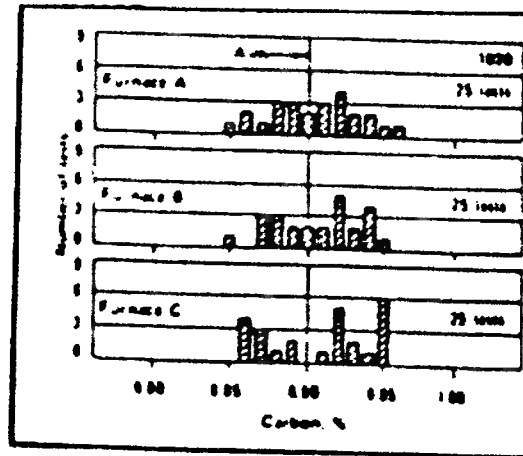


FIGURA 17 - Variação de carbono par o aço 1020 em três fornos tipo Batch, similares

EXEMPLO 5 - A figura 18 mostra a concentração de carbono superficial em 19 amostras de aço 4820 com profundidade de 0,08 mm (0,003 polegadas) cementadas em dois fornos contínuos, a concentração de carbono desejada era de 0,75 a 0,80%, cuja especificação era de 0.70 a 0,90%. Todos os resultados estavam dentro da especificação e muitos dos valores estavam dentro dos limites desejados, as amostras foram cementadas a 925°C (1700°F) usando um ciclo de difusão e temperado a 815°C (1500°F) em óleo a 60°C (140°F) e revenido a 620°C (1150°F), as amostras foram limpas com escova de aço e líquido abrasivo, a atmosfera na saída do forno foi automaticamente controlada e o ponto de orvalho estava em -15°C (+5°F) e no lado de descarga do forno +3°C (37°F), foram usados gás portador enriquecido com gás natural até a metade do forno e ar as saída do forno.

EXEMPLO 6 - Dados da figura 18 foram obtidos em 26 amostras de aço 4320, em condições semelhantes aos testes do Exemplo 5, exceto que o ponto de orvalho estava a -1°C (30°F) na saída do forno e as amostras foram revenidas a 650°C (1200°F), a concentração de carbono desejada era de $0,85 \pm 0,05\%$.

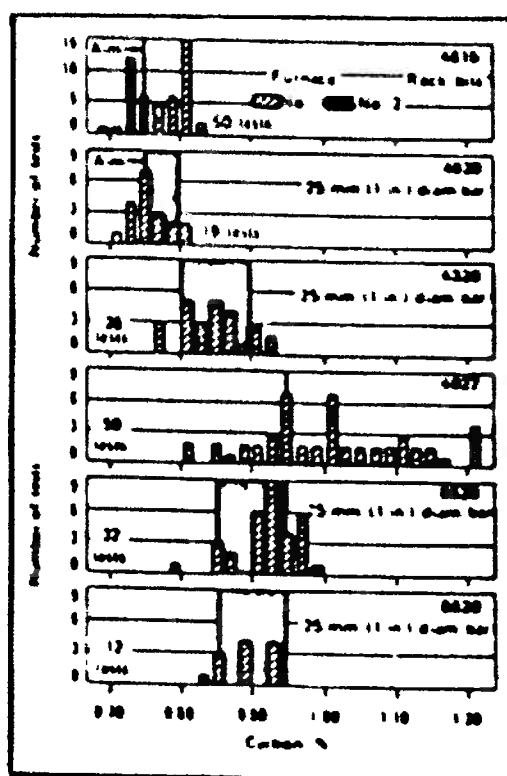


FIGURA 18 - Variação de carbono para aços liga, em diferentes condições

EXEMPLO 7 - A Figura 18 mostra o resultado de 50 testes que representam as variações da concentração de carbono para cementação contínua do aço 4027, estes resultados foram obtidos num período de 3 a 4 anos de operação, usando um controlador automático de ponto de orvalho.

EXEMPLO 8 - Dados da Figura 18 foram obtidos de 32 amostras do aço 8620, em condições semelhantes aos testes do Exemplo 6, exceto que a concentração de carbono desejada era de $0,90 \pm 0,05\%$.

EXEMPLO 9 - A concentração de carbono era de $0,90 \pm 0,05\%$ e a temperatura de cementação de 925°C (1700°F) num forno tipo Batch horizontal, os dados mostrados na Figura 18 foram os resultados de 12 testes baseados no potencial de carbono presente, primeiro 0,08 mm (0,003 pol.) de profundidade de corte, em barras redondas de 25 mm (1,0 pol.) de diâmetro em aço 8620, cementado e temperado em óleo a 845°C (1550°F) revenido a 650°C (1200°F) as amostras



foram limpas com escova de aço e líquido abrasivo. A cementação foi feita com gás endotérmico enriquecido com gás natural, não foi usado ar, o ponto de orvalho estava a -15°C ($+5^{\circ}\text{F}$) durante o ciclo de cementação, 12°C ($+10^{\circ}\text{F}$) para o ciclo de difusão a 925°C (1700°F) e -3°C ($+27^{\circ}\text{F}$) para o ciclo de têmpera a 845°C (1550°F).

EXEMPLO 10 - A Figura 19 indica a variação do carbono superficial do topo ao fundo do forno tipo Poço usado para cementação de pistas de rolamentos em aço 4620, o potencial de carbono estava em 1,00% neste Exemplo, é aparente que a concentração de carbono estava constantemente maior na parte inferior do forno, possivelmente indicando uma ligeira diferença de temperatura nesta área.

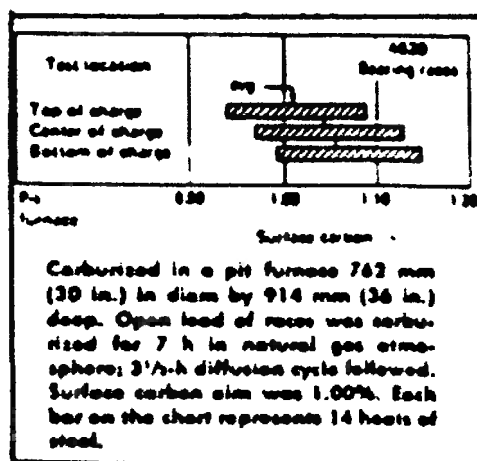


FIGURA 19 - Variação de carbono superficial para o aço 4620, em vários pontos do forno

BAIXO CARBONO SUPERFICIAL

Muitos aços podem se cementados com um teor de carbono superficial abaixo da saturação, por exemplo de 0,90 a 1,00% de carbono. Geralmente há uma forte tendência na cementação em praticar concentrações de carbono de



composição eutetóide (0,9% C) ou ligeiramente elevada para utilizar a máxima endurecibilidade do aço.

A máxima dureza dos aços ligados normalmente usados na cementação, é obtida com a concentração de carbono próxima de 0,80%, o excesso de carboneto normalmente encontrado com altas concentrações de carbono promove a formação de outros produtos de transformação como a martensita e pode também remover parte dos elementos de carboneto formado da austenita, afetando dessa forma a própria dureza. A concentração de baixo carbono superficial também permite economia de têmpera direta nos trabalhos em fornos de cementação com reaquecimento.

Têmpera direta de peças cementadas com alta concentração de carbono, favorece a retenção de austenita. Quanto à composição eutetóide (0,8% C), pode ser feito um ajuste nas tubulações dos fornos contínuos, pelos quais parte do gás portador e gás de enriquecimento de hidrocarboneto sejam introduzidos pela parte frontal da zona de cementação, quando a demanda de carbono for alta somente o gás portador deve ser injetado nas outras zonas do forno e o potencial de carbono deve ser ajustado para dar a concentração de carbono final desejada.

Este método de baixo carbono superficial requer longo ciclo, por várias razões, dado o carbono presente no núcleo, a taxa de difusão de carbono na austenita decresce com a redução de concentração do carbono superficial, também é necessário uma boa recirculação dos gases no forno. A atmosfera adjacente de trabalho torna-se rapidamente esgotada em carbono e se existir áreas estagnadas, a concentração de carbono será excessivamente baixa e as peças que estiverem nessas regiões terão a camada cementada com pouca profundidade.



OUTRAS ATMOSFERAS PARA CEMENTAÇÃO

Recentemente, grandes esforços estão sendo feitos, para reduzir o consumo dos gases de hidrocarbonetos usados nas atmosferas dos fornos, inúmeras alternativas para atmosferas convencionais das fases de cementação tem sido propostas.

Muitas dessas alternativas produzem atmosferas similares na composição dos gases portadores convencionais, gas-base da atmosfera, enquanto outros são radicalmente diferentes na composição, entre as formações estão:

- a) Atmosfera formada de misturas de propano, metano ou outros gases de hidrocarbonetos e ar, introduzidos diretamente na câmara do forno.
- b) Atmosfera formada com metanol e nitrogênio, com proporção molar de 1:2.

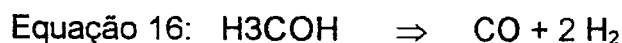
As últimas atmosferas, são à base de nitrogênio contendo metano ou propano, com ou sem adição de pequenas partes de ar, dióxido de carbono ou vapor d'água.

Para atmosferas à base de Nitrogênio, que são radicalmente diferentes na composição das atmosferas convencionais, o equilíbrio da composição do gás corresponde certamente ao potencial de carbono. Para manter o potencial de carbono numa única medida, a diluição do nitrogênio deve ser mantida constante.

Quando o nitrogênio presente está em 80% ou mais, o equilíbrio dióxido de carbono e ponto de orvalho, com valores extremamente baixos para atmosfera cementante, dificultam a mistura.



Uso do Metanol: Apenas pelo craqueamento do metanol já obtemos CO e H₂, como se observa pela reação da Equação 16, desta forma é usual "pingar" o metanol diretamente na câmara de cementação do forno quando se trabalha em altas temperaturas, acima de 900°C (1652°F).



Este sistema tem sido bastante usado por não haver necessidade de investimento em Gerador de gás portador, mas a grande aplicação é como atmosfera protetora (impedir oxidação das peças), mas diluída com nitrogênio.

Uso Etanol: Para qualquer hidrocarboneto, devemos ter uma reação de combustão ou craqueamento de forma a obter CO e H₂, como mostrado pela reação da Equação 17.



Calculando:



$$x * 0,21 * 2 = 1 \quad x = 2,38$$

$$y = x * 0,78 \quad y = 1,86$$

Portanto a relação etanol: ar, será de 1 : 2,38, porém na prática trabalha-se com excesso de ar para evitar a deposição de fuligem, assim a relação pode chegar a 1 : 3 e a composição do gás será: 29,15% CO, 43,74% H₂ e 27,11% N₂.



PRECAUÇÕES DE SEGURANÇA

Deve-se tomar algumas precauções para evitar acidentes quando se manuseia gases de cementação, geralmente são gases altamente tóxicos e inflamáveis, formando-se misturas explosivas, deverá ser estabelecido um programa de segurança, que deverá ser rigorosamente obedecido pelos operadores e na manutenção preventiva do equipamento.

O programa de segurança perfeito deve proteger o operador contra acidentes, proteger os equipamentos contra danos, proteger as instalações da fábrica e proteger também contra perda de materiais que estão em processamento.

Poderá ser simples alcançar esses objetivos, desde que todos os equipamentos de segurança estejam ao alcance dos operadores e que todos os esquemas de segurança utilizados são esquemas de advertência.

Os tópicos mais importantes que deverão ser analisados pelo pessoal de treinamento são:

- ✓ Perigo envolvido.
- ✓ Procedimento para injetar gás no forno, normalmente os equipamentos de segurança não permitem a introdução do gás no forno cuja temperatura esteja abaixo de 760°C (1400°F).
- ✓ Procedimento para remover a atmosfera do forno.
- ✓ Procedimento para purgar a câmara e vestíbulos do forno, que devem estar equipados com selos ou tampas de explosão, que evitam danos ao equipamento em caso de pequenas explosões.
- ✓ Procedimento em caso de falta de energia elétrica ou qualquer outra utilidade no equipamento. Os operadores devem ser submetidos a testes simulados de rotina para estarem aptos a resolver qualquer problema em caso de emergência.



- ✓ Fogo, os focos de incêndio devem ser localizados imediatamente e ter sempre disponível um sistema de combate de incêndio, com extintores; e operadores treinados na brigada de incêndio.
- ✓ Precauções no manuseio de gases e líquidos perigosos.

MANUSEIO DE ATMOSFERAS

A principal linha de conduta é a pertinência de um manuseio seguro do gás de cementação por atmosferas, que inclui o conhecimento de:

- ✓ A diferença entre um gás inerte e um gás combustível.
- ✓ A maior parte das atmosferas para cementação contém mais de 4% H₂ ou 12,5% CO, baixo limite para explosão no ar.
- ✓ A mistura ar-gás com pequena parte de oxigênio pode explodir. A tabela crítica de acordo internacional, limita a flamabilidade do hidrogênio, monóxido de carbono e metano, no ar, que são as seguintes: hidrogênio de 9,0 a 68,6% (requer o mínimo de 6,59% O₂); monóxido de carbono de 13 a 77,6% (requer o mínimo de 4,7% de O₂); metano de 5,5 a 13,6% (requer o mínimo de 18,1% de O₂).
- ✓ A temperatura mínima para ignição do hidrogênio e monóxido de carbono é em torno de 595°C (1100°F).
- ✓ A introdução do gás de cementação no forno ou parte dele, numa temperatura inferior a 760°C (1400°F) constitui um perigo de explosão.
- ✓ Para segurança contra riscos de explosões, os gases para cementação deverão ser introduzidos no forno, quando este estiver na temperatura de 760°C (1400°F) ou acima.
- ✓ Para purgar um forno, a quantidade de gás deverá ser no mínimo cinco vezes o volume de sua câmara.
- ✓ Antes de fazer qualquer reparo no interior do forno, deve-se desconectar a linha de gás ou fechar as válvulas de admissão do gás de cementação,



purgar o forno com gás inerte, como por exemplo o nitrogênio (N_2), abrir todas as portas e injetar ar atmosférico através de um ventilador externo continuamente.

- ✓ O monóxido de carbono (CO) é extremamente tóxico, os gases não queimados devem ser expedidos para fora do prédio.
- ✓ Se faltar energia elétrica ou acabar o fornecimento de gás para o forno, é necessário que se tenha um tanque de reserva para emergência do processo e para as cortinas de chama.
- ✓ O uso de gás combustível para atmosfera de cementação é acompanhado de grande possibilidade de perigo durante a partida e desligamento do forno, inclusive durante a falta de gás.
- ✓ Quando ocorrer a falta de gás, usa-se também na prática purgar a câmara do forno com gás inerte, como por exemplo o N_2 .



5. EQUIPAMENTOS

TIPOS DE FORNOS

Os fornos a gás para cementação tem larga variação quanto à sua construção física, mas podem dividir-se em duas categorias principais: Fornos tipo Batch (intermitente) e Fornos Contínuos, os dois tipos são amplamente diferenciados quanto ao método de manuseio. No forno tipo Batch, o carregamento e descarregamento é feito por carga, como se fosse uma batelada.

No forno Contínuo as peças entram e saem continuamente através de uma esteira ou calha transportadora, por exemplo, que percorre todo o sentido longitudinal do forno, o forno contínuo é favorável pelo grande volume de produção de peças similares com espessuras de camada cementada requerida na faixa de 0,4 a 3,0 mm.

Podemos classificar os Fornos tipo Batch (intermitente) como:

- ✓ Forno tipo poço.
- ✓ Forno tipo retorta rotativa.
- ✓ Forno tipo soleira rotativa.
- ✓ e outros.

Podemos classificar os Fornos Contínuos como:

- ✓ Forno contínuo de esteira transportadora.
- ✓ Forno contínuo de calha transportadora.
- ✓ Forno contínuo de retorta rotativa.
- ✓ Forno contínuo empurrador, (pusher)
- ✓ e outros.



INÍCIO DE OPERAÇÃO AO FORNO

O melhor método para iniciar o funcionamento do forno é remover todo ar atmosférico ou atmosfera combustível do seu interior, antes de ligá-lo; isso pode ser feito da seguinte forma, purga-se o forno com gás inerte N_2 ou CO_2 , com volume de cinco vezes a sua câmara.

INJEÇÃO DE GÁS NO FORNO

- ✓ Quando o forno estiver na temperatura de $760^{\circ}C$ ($1400^{\circ}F$) ou acima, abra todas as portas.
- ✓ Acenda todos os pilotos das cortinas de chama das portas e saídas de gases.
- ✓ Abra o gás para o forno
- ✓ Quando o gás começar a queimar no interior do forno, fechar as portas individualmente.
- ✓ O gás começará a ser queimado nas cortinas de chama.
- ✓ O forno estará pronto para funcionamento.

CEMENTAÇÃO COM GÁS PORTADOR, ENRIQUECIMENTO COM GÁS DE HIDROCARBONETO

Muitos fornos a gás para cementação usam combinações de gás portador enriquecido com gás de hidrocarboneto, o uso do gás de hidrocarboneto não diluído em fornos contínuos, tem sido virtualmente eliminados.

INTRODUÇÃO DA ATMOSFERA



Nos fornos tipo Batch, existem medidores de vazão para cada tipo de gás que são misturados e introduzidos na câmara de cementação em quantidades suficientes para garantir as condições de operação. Esta inclusão do fluxo de atmosfera suficiente para manter positiva a pressão interna do forno, previne a infiltração de ar e cementa as peças.

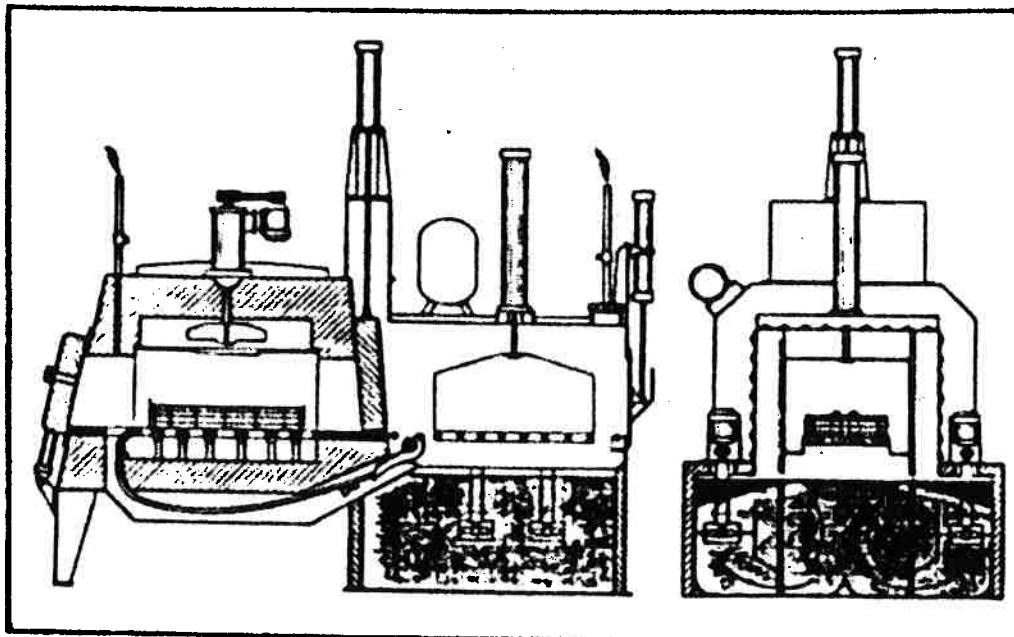


FIGURA 20 - Forno Batch tipo câmara horizontal com tanque de óleo de têmpera embutido

A localização da entrada de atmosfera no forno é muito importante, o ponto de maior eficiência para introdução deve ser onde tem boa recirculação de gás para mistura completa, mas num local que se evitasse o choque direto da atmosfera fria com a carga. Isto normalmente evitaria a formação de fuligem localizada e cementação não uniforme.

VELOCIDADES DE ESCOAMENTO

Devido o pequeno volume da câmara de um forno tipo Batch, pequeno volume de gás é requerido. Para um forno tipo Poço tendo as seguintes dimensões da



câmara: 0,60 m (25 pol.) no diâmetro de 0,90 a 1,20 m (36 a 48 pol.) de profundidade, a vazão de gás normalmente usada é de 1,40 a 2,80 m³/hora (50 a 100 pés³/hora) de gás portador e 0,20 a 0,40 m³/hora (8 a 16 pés³/hora) de gás natural. Se o mínimo de fuligem é desejado, a vazão de gás natural deve ser reduzida durante o avanço do ciclo, porque a taxa de absorção de carbono na superfície do aço decresce com o decorrer do tempo.

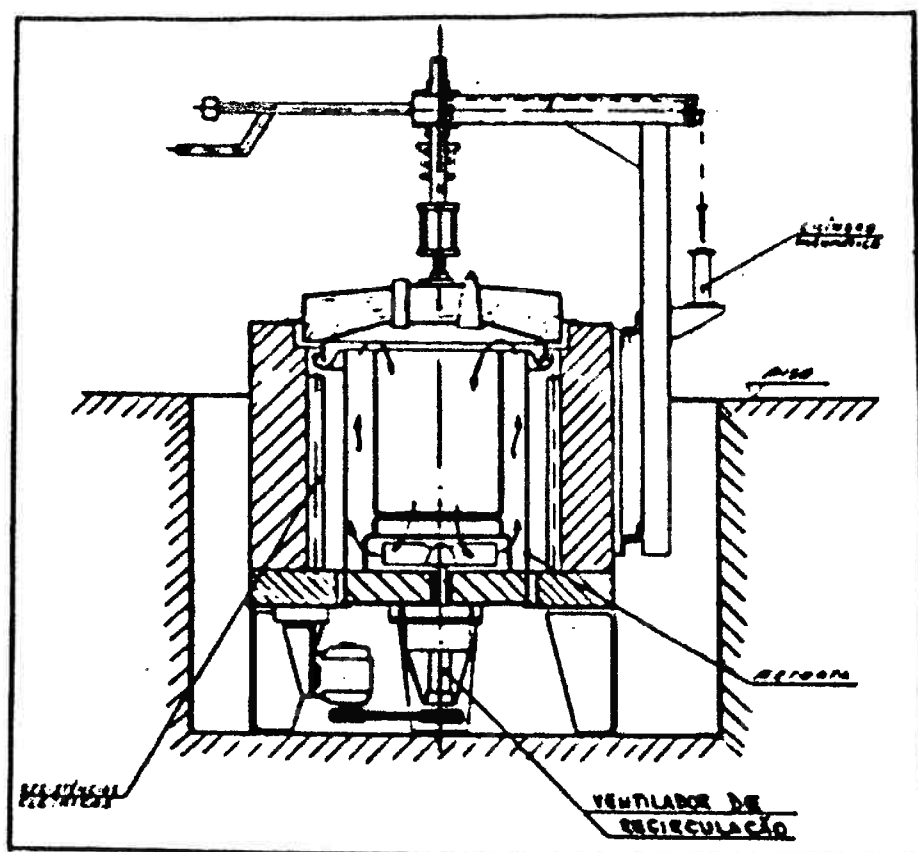


FIGURA 21 - Forno Batch tipo poço

Alta taxa de vazão do gás portador (com ou sem gás de enriquecimento) deve ser necessária para purgar os fornos tipo Batch, para prevenir a carga recentemente carregada no forno de oxidação. Esta particularidade é importante quando se trabalha com cobertura de cobre para proteção de áreas contra cementação, porque a proteção de cobre pode ser destruída rapidamente por uma atmosfera oxidante a alta temperatura.



A alta vazão de gás de hidrocarboneto de enriquecimento durante a primeira parte do ciclo de cementação deve ser baixada ou cortada durante os ciclos de difusão e resfriamento. Este “Programa de Controle” sendo manual ou automático, é designado para manter o controle do potencial de carbono durante todos os estágios de cementação do forno tipo Batch.

Nos fornos contínuos para cementação gasosa, a boa pratica de operação não é simplesmente suficiente para um bom programa de controle do fluxo de gás sobre um determinado período, pois é complexo o arranjo do fluxo de gás nas zonas de controle ao longo do forno. Para combinar um ciclo de saturação de carbono e um ciclo de difusão num forno contínuo, variadas vazões de gás são necessárias, a mistura do gás portador com o gás de enriquecimento são introduzidos em cada zona e variam de acordo com a demanda de carbono necessária.

A Figura 22 mostra um forno contínuo de múltipla fileira para cementação, adaptado para o método de saturação-difusão, onde são mostrados vários mainfolds (tubos de derivações múltiplas) para distribuição da atmosfera, devido a necessidade de se manter diferentes potenciais de carbono nas diferentes zonas de controle do forno. A atmosfera deverá ser corretamente direcionada e estabilizada até a parte final do forno.

Na operação do forno contínuo de múltipla fileira, as vezes é necessário operá-lo com velocidades diferentes em cada fileira, em condições de se produzir mais de uma espessura da camada cementada simultaneamente. O peso da carga carregada no forno deve ser balanceado para garantir homogeneidade de temperatura. É aconselhável estabelecer algum limite prático na diferença das espessuras das camadas a ser obtidas em cada fileira, o limite mais comum permite uma diferença em cerca de 0,40 a 0,50 mm (0,015 a 0,020 pol.).



Para grandes fornos contínuos, o fluxo requerido de gás portador deve ser suficiente para produzir pressão interna positiva adequada, de um a três volumes de troca por hora.

O gás natural como agente de adição ativo (enriquecimento), terá taxa de vazão de 3 a 15% do gás portador e para o gás propano a taxa será de 1 a 5%, fornecendo carbono equivalente à atmosfera.

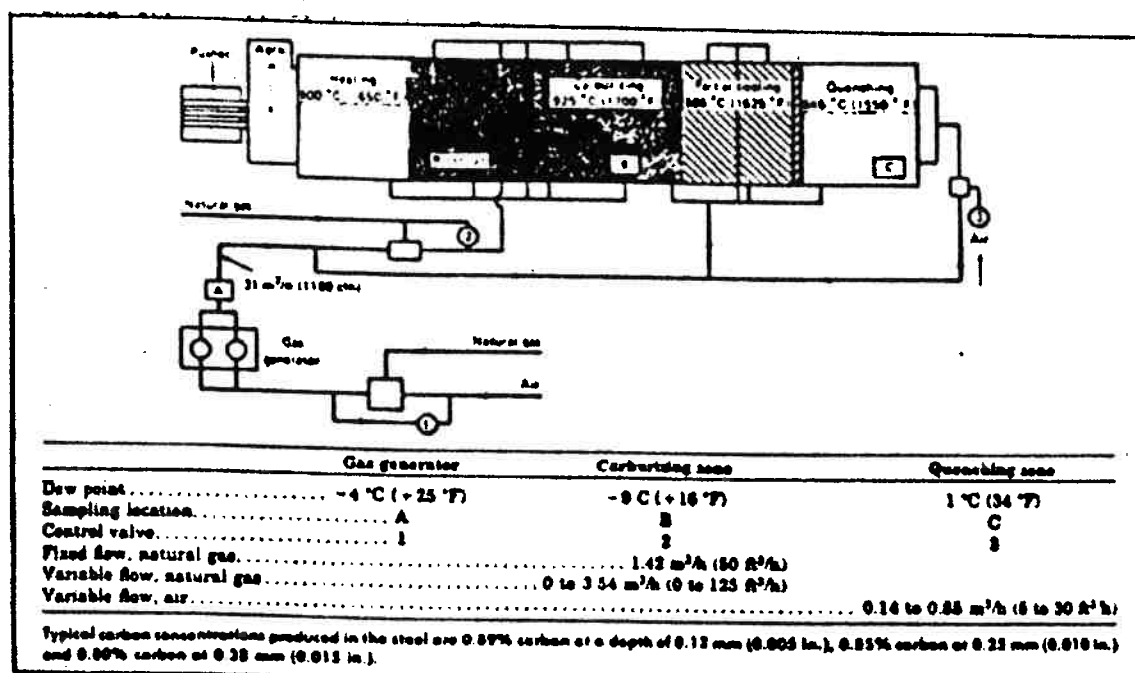


FIGURA 22 - Arranjo da tubulação de admissão de gás num Forno Contínuo

A taxa de fluxo de gás é continuamente medida e indicada visualmente por medidores de vazão, ou por manômetro conectado logo após uma placa de orifício com diâmetro conhecido.

Uma densidade de carga com grande área superficial requer uma relação maior entre o gás portador e o gás de enriquecimento, para garantir uniformidade na concentração de carbono e na espessura da camada cementada da carga, este



requisito é mais crítico em aplicações onde as condições de recirculação são baixas ou inexistente.

A pressão interna do forno em torno de 5,0 a 7,5 milímetros de coluna d'água (mmca) é comum e pode ser medida com precisão, através de um registrador de tiragem, ou de um manômetro de coluna d'água conectado numa tomada de saída de atmosfera do forno.

A presença de gases queimados nos canais de saída no topo do forno, não é uma indicação de pressão positiva, os gases quentes são mais leves que o ar e sobem. Enquanto estão queimando na saída do forno, podem provocar arraste de ar através de vazamentos das portas, da carcaça e também pelo eixo do ventilador, isso demonstra a necessidade de uma construção estanque, e manutenção periódica para mante-lo em boas condições de uso, quando se requer controle de carbono na atmosfera.

OPERAÇÃO PARA MISTURAR OS GASES

O gás portador normalmente é misturado com o gás hidrocarboneto de enriquecimento fora do forno, deve ser feito com misturadores individuais em cada ponto de entrada dos gases no forno, ou por uma ou mais estações de mistura dos gases, do qual a mistura é distribuída para todas as entradas do forno. Com estação de mistura central, uma relação constante da mistura pode ser mantida para alguma ou todas as zonas do forno.

Para uma relação constante na estação de mistura, deve-se ter um arranjo perfeito das placas de orifício nas linhas de fornecimento dos gases portador e os respectivos fluxos dos gases de ambos orifícios sejam mantidos em constante relação mesmo sob extensa variação da taxa de fluxo.



6.PROCESSO

VARIÁVEIS DE PROCESSO

O sucesso do processo na operação com gás de cementação, depende do controle de três variáveis principais: temperatura, tempo e composição da atmosfera.

- ✓ **Efeito da Temperatura:** A máxima taxa de carbono que se pode adicionar no aço é limitado pela taxa de difusão do carbono na austenita, essa taxa aumenta muito com a temperatura. A taxa de adição de carbono a 925°C (1700°F) é em torno de 40%, maior do que a 870°C (1600°F). A temperatura normalmente usada para cementação gasosa é de 925°C (1700), esta temperatura permite rápida taxa de cementação sem deterioração excessiva do forno, particularmente dos componentes metálicos. A temperatura de cementação as vezes é um pouco mais alta 955 ou 980°C (1750 ou 1800°F), certamente se a espessura da camada cementada exigir. Para camada cementada pouco profunda, na qual a profundidade especificada deve ser mantida com pequena variação, baixas temperaturas são freqüentemente usadas, pois a profundidade da camada pode ser mais precisamente controlada, com baixa velocidade de cementação obtida com temperaturas mais baixas. Para obtenção de resultados positivos em cementação, a temperatura deve ser uniforme. A uniformidade de temperatura em todos os pontos da câmara de cementação depende exclusivamente do tipo de forno, carga por unidade de comprimento, recirculação dos gases e taxa de aquecimento. Com alta densidade de carga, por exemplo, os fornos tipo Batch devem ter eficientes ventiladores de recirculação. Para uma carga densa, a diferença de temperatura entre as peças internas e externas da carga pode ser alta, isso interfere na espessura da camada cementada. A parte externa da carga é aquecida primeiramente por radiação e a taxa de aquecimento é rápida na temperatura de cementação, a eficiência de



recirculação dos gases diminui tal diferença, é limitado porque a capacidade de aquecimento do gás é baixo nesta temperatura. Na temperatura de cementação 845 a 870°C (1550 a 1600°F), a diferença dada no tempo requerido para que as diferentes peças da carga alcancem a temperatura de cementação tem menor efeito na espessura da camada. Outras causas da larga diferença de temperatura, são as altas proporções de área superficial para o volume das peças individuais e início de aquecimento.

- ✓ Nunca deve ser feito sobre a relação da superfície para o volume, mas o início de aquecimento deve ser regulado automaticamente pelo controlador de temperatura do forno, para minimizar a diferença de temperatura na carga.
- ✓ **Efeito do Tempo:** F. E. Harris desenvolveu a fórmula para o efeito do tempo e temperatura na espessura da camada cementada, para uma cementação normal, que é a seguinte:

$$\text{Espessura da camada cementada} = 31,6 \sqrt{t} / 10^{(6700/T)}$$

onde:

A espessura da camada cementada é dada em polegadas.

t = tempo em horas.

T = temperatura absoluta em graus Rankine (°F + 460).

A fórmula métrica equivalente, no sistema SI é:

$$\text{Espessura da camada cementada} = 660 * e^{-8287/T^*} \sqrt{t}$$

onde:

A espessura da camada cementada é dada em milímetros

t = tempo em horas.

T = temperatura em graus Kelvin (°C + 273,15).



Para uma temperatura específica de cementação, temos:

Espessura da camada cementada = $k \sqrt{t}$, em milímetros:

Espessura = $0,457 \sqrt{t}$, para $T = 870^\circ\text{C}$

Espessura = $0,533 \sqrt{t}$, para $T = 900^\circ\text{C}$

Espessura = $0,635 \sqrt{t}$, para $T = 925^\circ\text{C}$

Espessura da camada cementada = $k \sqrt{t}$, em polegadas:

Espessura = $0,018 \sqrt{t}$, para $T = 1600^\circ\text{F}$

Espessura = $0,021 \sqrt{t}$, para $T = 1650^\circ\text{F}$

Espessura = $0,025 \sqrt{t}$, para $T = 1700^\circ\text{F}$

Valores da espessura da camada cementada, calculada para o tempo de 2 a 36 horas, nas três temperaturas de cementações gasosas mais usadas, conforme Tabela III:

Time, h	Case depth(a), after carburizing at :					
	870 °C (1600 °F)		900 °C (1650 °F)		925 °C (1700 °F)	
	mm	in.	mm	in.	mm	in.
2	0.64	0.025	0.76	0.030	0.89	0.035
4	0.89	0.035	1.07	0.042	1.27	0.050
8	1.27	0.050	1.52	0.060	1.80	0.071
12	1.55	0.061	1.85	0.073	2.21	0.087
16	1.80	0.071	2.13	0.084	2.54	0.100
20	2.01	0.079	2.39	0.094	2.84	0.112
24	2.18	0.086	2.62	0.103	3.10	0.122
30	2.46	0.097	2.95	0.116	3.48	0.137
36	2.74	0.108	3.20	0.126	3.81	0.150

(a) Case depth, mm = $0.635\sqrt{t}$ (case depth, in. = $0.025\sqrt{t}$) for 925°C (1700°F); $0.533\sqrt{t}$ ($0.021\sqrt{t}$) for 900°C (1650°F); $0.457\sqrt{t}$ ($0.018\sqrt{t}$) for 870°C (1600°F). For normal carburizing (saturated austenite at the steel surface while at temperature).

Tabela III - Valores da profundidade da camada cementada calculados pela Equação de Harris



Harris também desenvolveu um método para calcular os tempos de cementação e difusão para produzir a camada cementada com uma profundidade pré determinada e a concentração de carbono superficial, que é a seguinte:

- ✓ tempo de cementação = tempo total $(C - C_i / C_o - C_i)^2$.
- ✓ Tempo de difusão = tempo total - tempo de cementação.

Onde:

tempo total em horas é calculado pela Equação da Tabela III.

C = concentração de carbono superficial final desejada.

C_o = concentração de carbono superficial no final do ciclo de cementação.

C_i = concentração de carbono inicial.

Este método é bem adaptado para os fornos tipo Batch (intermitente). O sucesso da aplicação requer um forno bem condicionado e um gás portador de baixo percentual de carbono. Toda adição de carbono necessária será feita por um gás de hidrocarboneto enriquecendo o gás portador, começa o ciclo de difusão.

EXEMPLOS DE CICLOS DE OPERAÇÃO

As condições típicas de operação que utilizam gases portadores de enriquecimento são mostrados graficamente nas Figuras 23 e 26 e Exemplos 11 a 14, resultados dos gradientes de carbono estão inclusos no gráfico abaixo de cada Figura.

EXEMPLO 11 - A Figura 23 mostra detalhes do ciclo usado para cementação gasosa de anéis de engrenagens num forno tipo Poço. O resultado do gradiente de carbono é também mostrado graficamente nesta figura, onde é visto que o carbono superficial estava próximo da composição eutetóide (0,8% C) e que a queda de carbono foi gradual e uniforme.

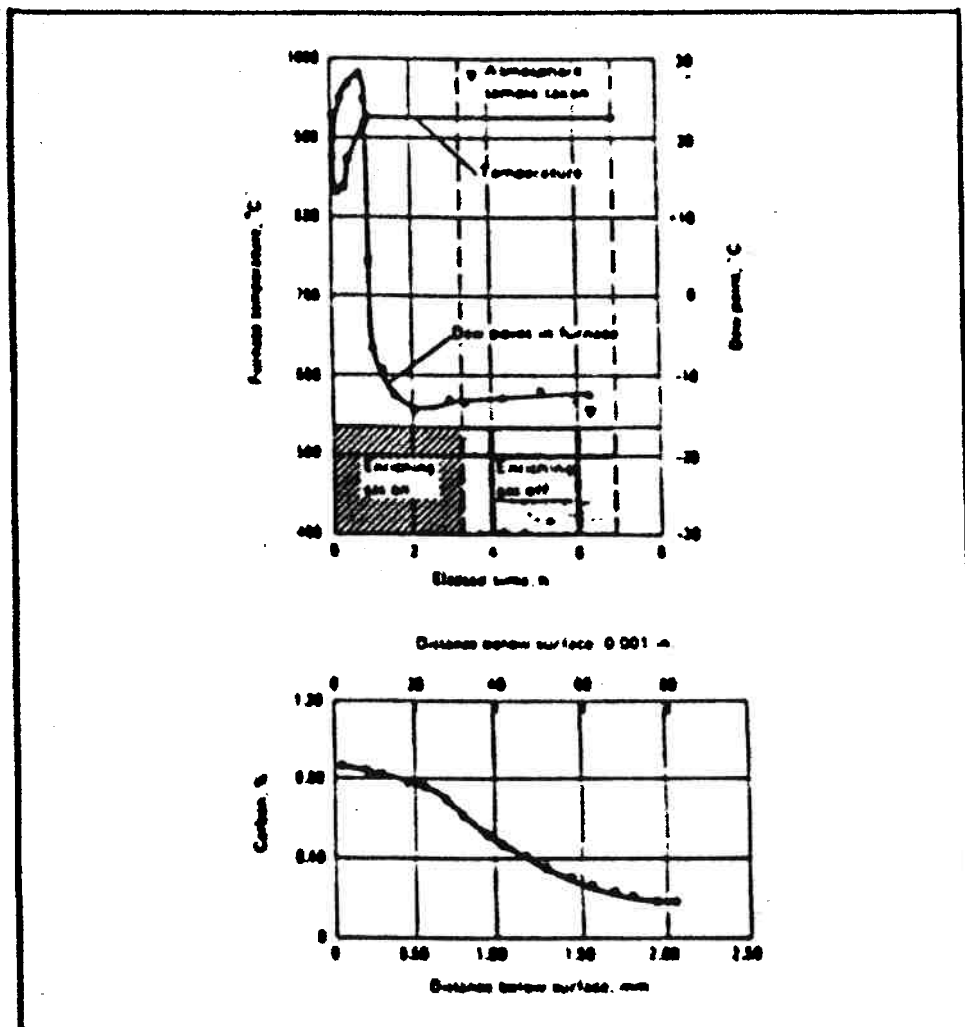


FIGURA 23 - Condições de cementação e gradiente de carbono para o aço 8620H

EXEMPLO 12 - A Figura 24 mostra detalhes de outro ciclo usado para cementação gasosa de 230 Kg (510 lbs) de anéis de engrenagens num forno tipo Poço. Neste Exemplo e no Exemplo 11, parte das peças foram resfriadas num poço subsequente à têmpera. Como o ciclo mostra, o carbono presente na superfície, inicialmente a 95%, mas cai rapidamente para próximo à composição eutetóide cerca de 0,10 mm (0,004 pol.).

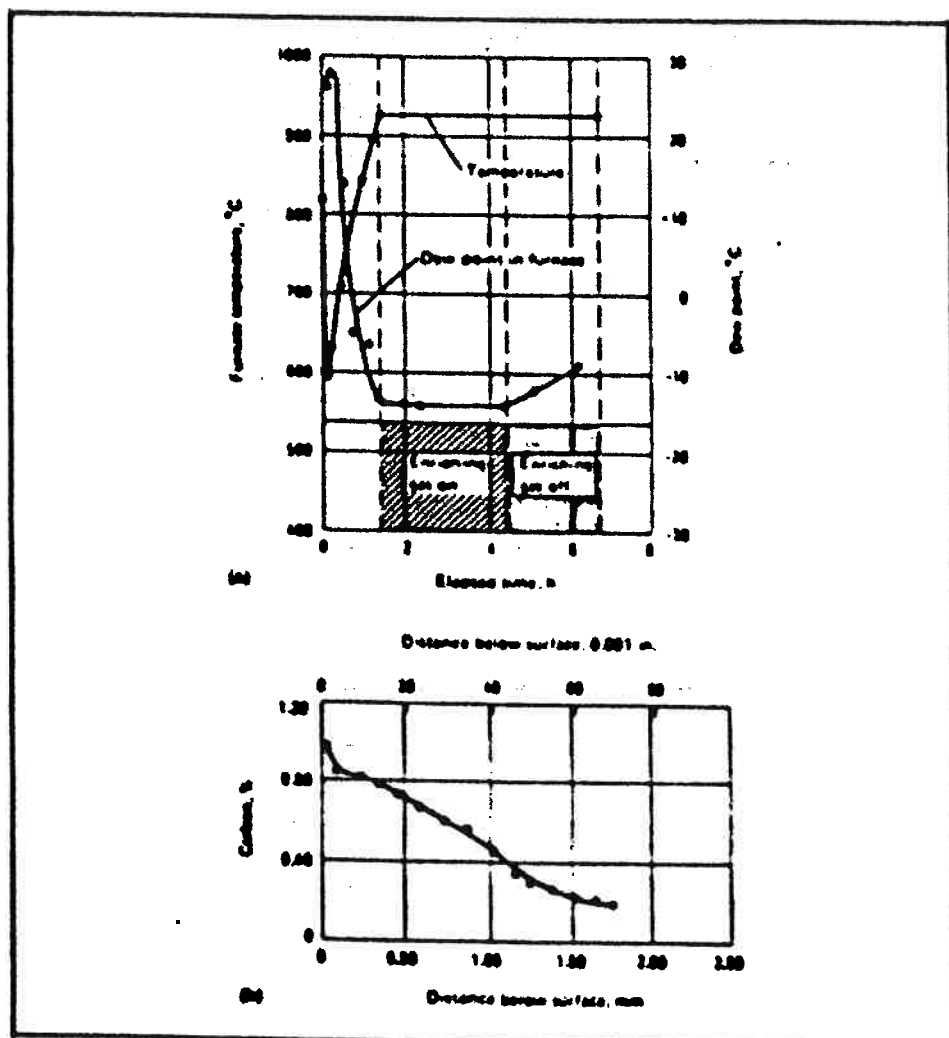


FIGURA 24 - Condições de cementação e gradiente de carbono para o aço 8620H

EXEMPLO 13 - A Figura 25 mostra detalhes de um ciclo e o resultado do gradiente de carbono para cementação de eixos num forno tipo Poço, temperando em seguida com o abaixamento da temperatura de 925°C para 845°C (de 1700°F para 1550°F), neste instante a queda no volume do gás de enriquecimento resultou numa rápida queda no potencial de carbono, abaixo da composição eutetóide.

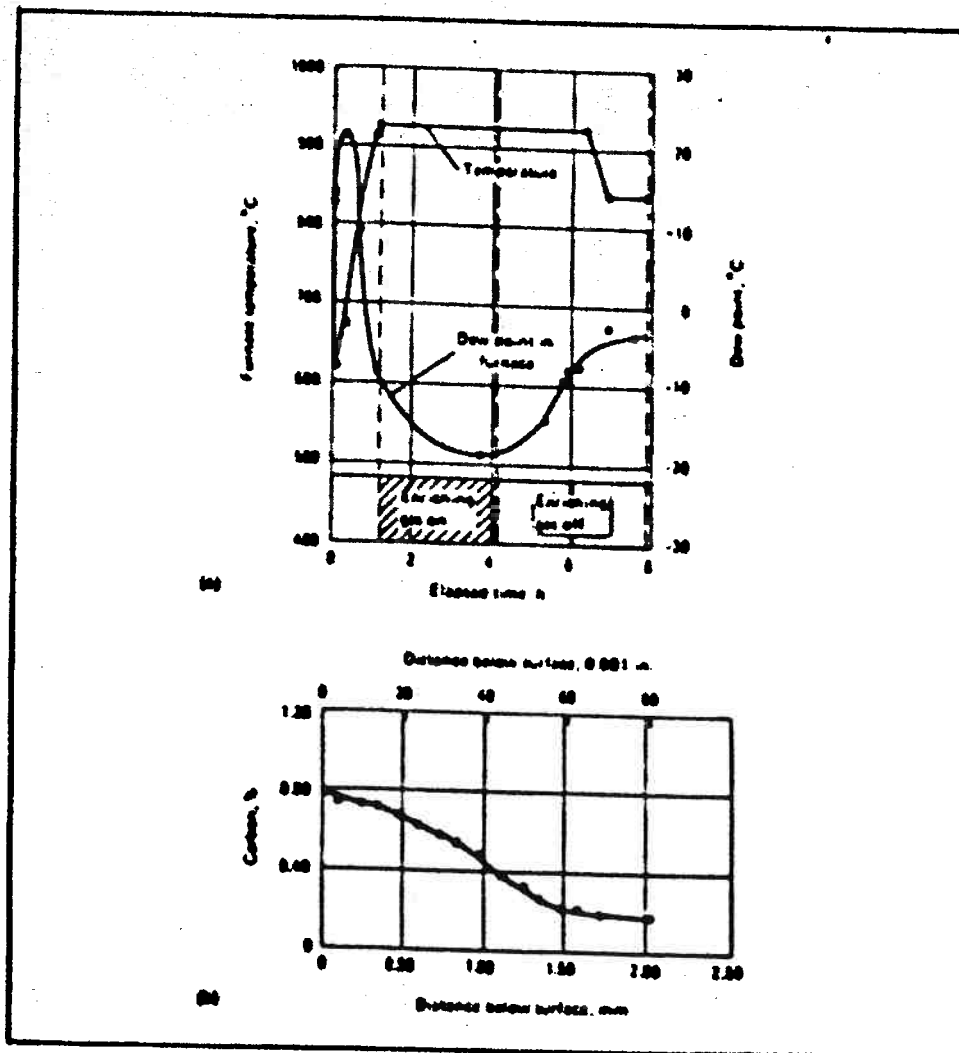


FIGURA 25 - Condições de cementação e gradiente de carbono para o aço 8620H

EXEMPLO 14 - A Figura 26 mostra detalhes de operação de um ciclo usado para cementação de eixos num forno tipo Batch com tanque de têmpera embutido. A maior parte do tempo de cementação 66% foi gasto no ciclo de difusão operando com potencial de carbono mais alto e maior profundidade de gás de enriquecimento para o gás portador é menor quando o gás propano é usado.

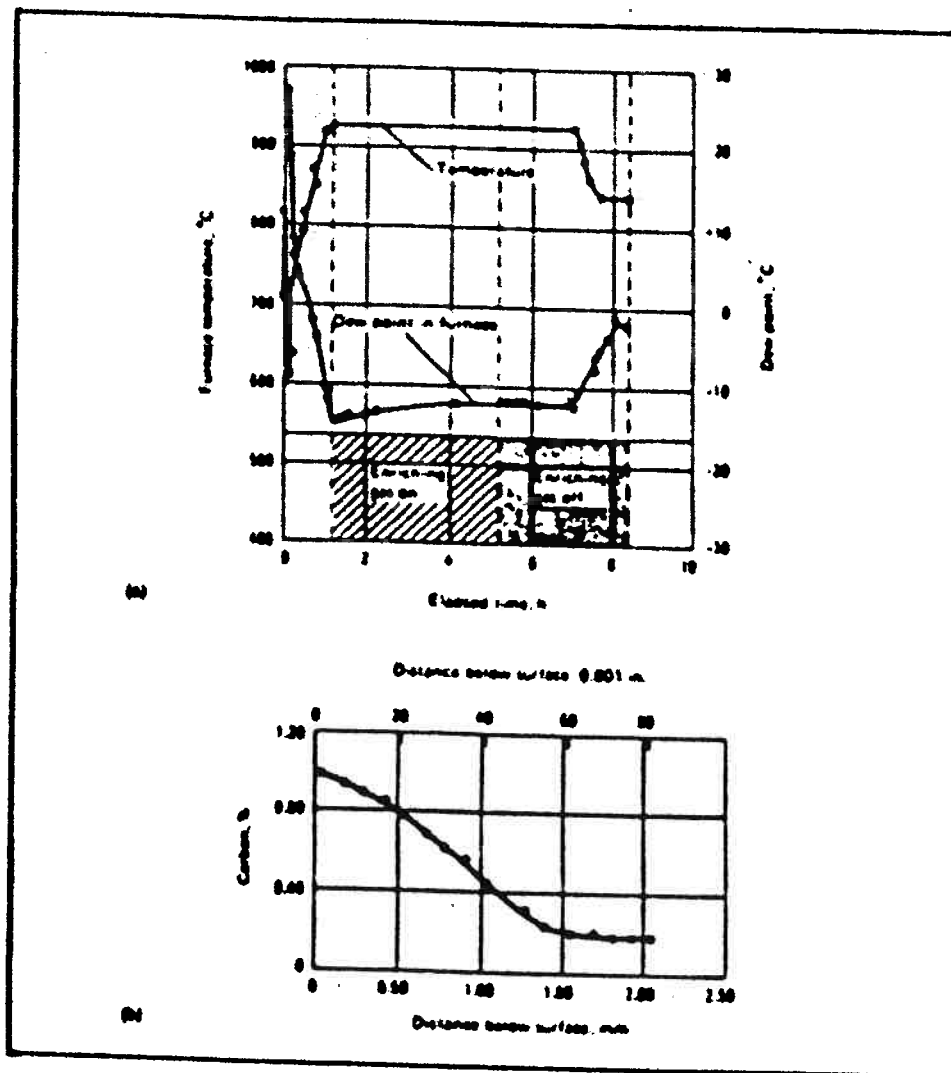


FIGURA 26 - Condições de cementação e gradiente de carbono para aço 8620H

Método Boost-Diffuse

"Boost-Diffuse" é uma técnica de cementação em atmosfera controlada onde o objetivo é obter a maior taxa possível de crescimento do teor de carbono na superfície da carga.

A velocidade de difusão aumenta consideravelmente com o gradiente de carbono da superfície para o núcleo da peça. Esta máxima taxa de difusão de



carbono será obtida, usando-se durante a primeira etapa do processo (Boost) um potencial de carbono próximo ao limite de saturação.

Na etapa final do processo (Diffuse), reduz-se o potencial de carbono da atmosfera no sentido de se obter o teor superficial ideal do aço em tratamento (superfície com dureza máxima, sem austenita retida), como resultado o potencial de carbono decresce enquanto a profundidade cementada continua crescendo.

As relações dos tempos de "Boost" (elevação do potencial de carbono) e "Diffuse" (difusão do carbono no aço) devem ser ajustados de acordo com as necessidades de dureza e profundidade de camada cementada desejadas para cada tipo de peça.

Grande parte do carbono será reduzida na camada superficial conforme designação F1, da Figura 27, correspondendo com o aumento de carbono a uma distância maior da superfície conforme F2, da Figura 27.

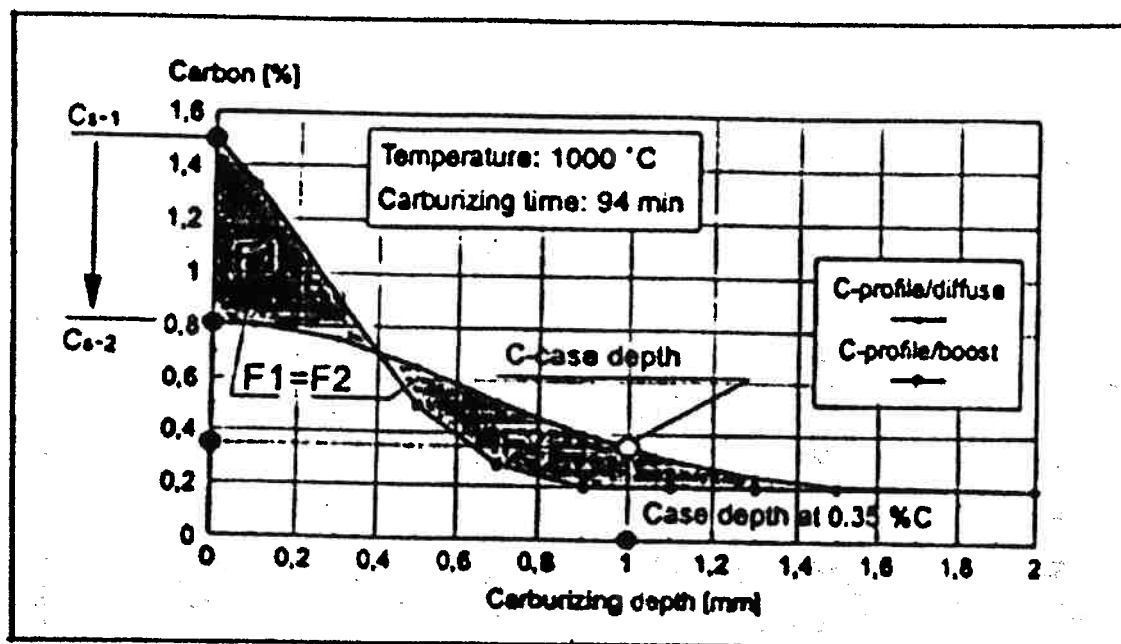


FIGURA 27 - Processo de cementação pelo método Boost-Diffuse



CONTROLE DA PROFUNDIDADE DA CAMADA CEMENTADA

A profundidade da camada cementada de um determinado aço depende diretamente da temperatura, tempo de permanência nesta temperatura e potencial de carbono. Na prática comercial essa profundidade é controlada com tolerância, dependendo do tipo de cementação, do tipo de condições do forno, do ciclo estipulado e das limitações de controle do processo. O uso final das peças cementadas é o principal determinante de como será aceita a variação da espessura cementada, se estreita ou ampla. As peças que não serão usadas em aplicações críticas não requerem um controle rígido da espessura cementada, pois teriam os custos aumentados, o que seria injustificável.

MEDIDA DA PROFUNDIDADE DA CAMADA CEMENTADA

Vários métodos para medição da profundidade da camada cementada são normalmente usados, porque o importante do método de medição é ser especificado com clareza, se não o tratador térmico terá perdas por não saber que profundidade de camada produzir. Não é raro para os engenheiros especificar cementações pela frase como: **“Espessura cementada de 1,25 mm (0,050 pol.)”**, o qual deixa o tratador em dúvida do que é desejado. Quando a espessura é apropriadamente especificada, com uma notação do método de medição, que não poderá ser mal interpretada daquilo que é desejado **“Espessura total da camada cementada”, “Espessura efetiva da camada cementada para 50 HRC” e “Espessura da camada cementada para 0,40% de carbono”**, são descrições específicas que não podem ser confundidas e são compatíveis com a perfeita prática da engenharia.

Os vários métodos de medição da camada cementada, tem sido desenvolvidos para encontrar necessidades particulares para diferentes tipos de trabalhos. Há



métodos, químicos, mecânicos e visuais (macroscópio e microscópio) para medição da espessura da camada cementada. Testes de amostras em condições brandas e endurecidas podem ser medidas pelos vários métodos existentes.

Medições da espessura da camada cementada obtidas por dois métodos diferentes, são comparadas na Figura 28, um método é de análise química do carbono presente em 0,40% do nível de carbono da camada cementada, a espessura cementada foi medida da superfície até a distância da superfície na qual se obtenha concentração de 0,40% de carbono. O outro método empregado foi a micro dureza transversal para determinar a efetiva espessura da camada cementada, que é a distância cuja dureza ainda seja 50 HRC. O primeiro método foi usado para obter os dados de uma amostra redonda de diâmetro 25 mm (1 pol.), o segundo foi obtido da secção transversal de um dente de engrenagem.

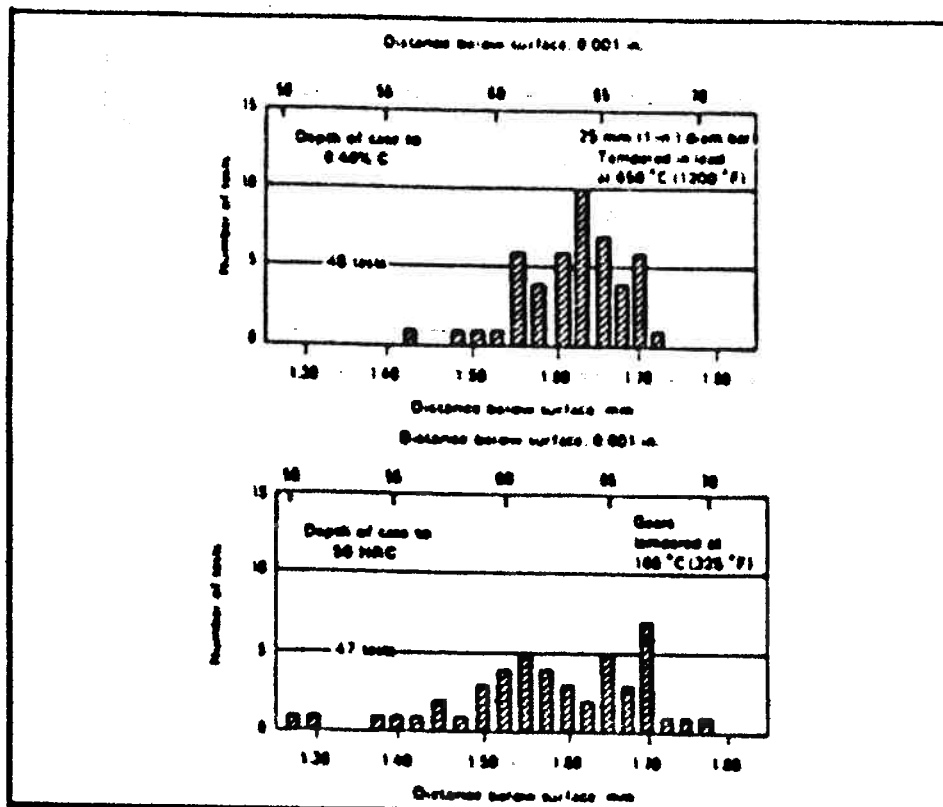


FIGURA 28 - Comparação entre a profundidade de camada com 0,40%C e dureza 50HRC para o aço 8620

REPRODUTIBILIDADE DE RESULTADOS

Mesmo quando a espessura da camada cementada for especificada sem equívocos e o método de medição for definido, a precisão dos resultados é menor do que as medidas puramente físicas, porque há possibilidade de erro humano.



Os dados da Figura 29 correlatam a espessura da camada cementada efetiva para 50 HRC, medida na mesma engrenagem de dois diferentes fabricantes, os valores foram obtidos pelo mesmo método de dureza transversal, o qual é considerado o de maior precisão para medição da espessura da camada cementada efetiva.

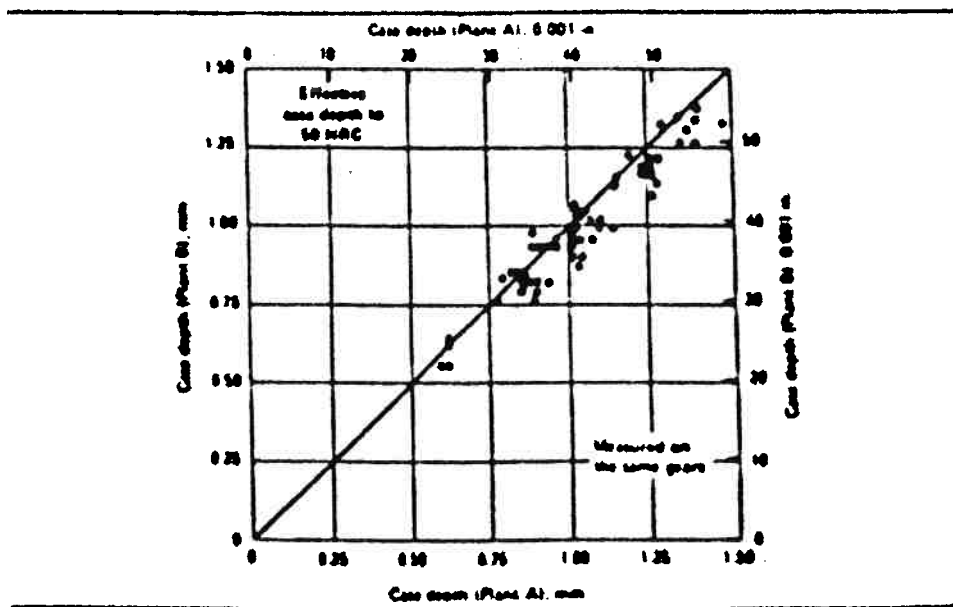


FIGURA 29 - Comparação das medidas de profundidade de camada em engrenagens similares, tratadas em dois fornecedores diferentes

Entretanto, várias discrepâncias nos resultados obtidos pelos dois fabricantes são aparentes. Para obter leituras da dureza transversal, as amostras foram cortadas perpendicularmente à superfície cementada na localização crítica, como para as engrenagens normalmente é no ponto de contato com o raio primitivo ou próximo dele. As amostras foram cuidadosamente esmerilhadas e polidas antes do teste de dureza.

Para comparar os diferentes métodos de medição da espessura nas mesmas amostras cementadas e temperadas, em aço 8620, foram preparadas cuidadosamente sendo posicionadas adequadamente uma das outras durante a



cementação e têmpera, todas as mostras foram cortadas da mesma barra, o procedimento dos testes foi o mesmo para cada laboratório e executados por funcionários experientes e qualificados para tal, os resultados estão mostrados nas Figuras 30 e 31 e divergem daquilo que se esperava em alguns casos.

SATURAÇÃO DE CARBONO

Uma excessiva quantidade de carbono livre na forma de fuligem ou carvão depositado na câmara de cementação do forno provoca descontrole do potencial de carbono, cementação irregular, deterioração das peças metálicas e refratário do forno, alto custo de limpeza e condições de trabalho desagradáveis.

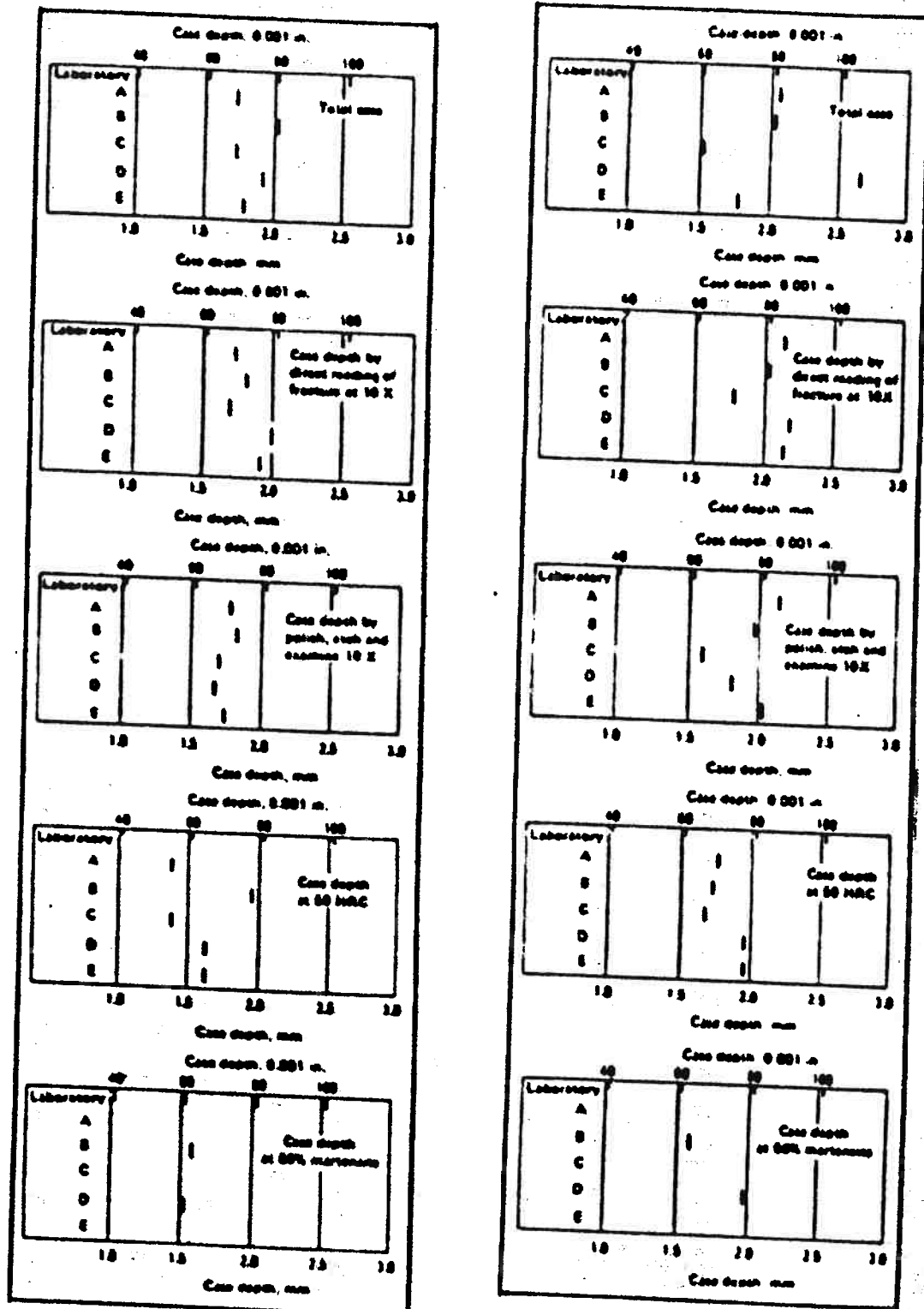
A fuligem também pode interferir na têmpera e contribuir para distorções excessivas, a saturação tem sido sempre um problema na cementação gasosa, e pode ser minimizada pela escolha de uma taxa de fluxo que forneça uma rápida taxa de cementação sem fuligem excessiva. Outro método eficiente inclui o uso de um ciclo de difusão, o qual em vários exemplos permite que a fuligem seja removida pela reação com gás portador ou com quantidades controladas de ar, introduzidos para esta finalidade, a saturação pode ser também altamente reduzida pelo uso de um controle automático de injeção de gás de enriquecimento.

Quando esse sistema é usado, sedimentam no óleo de têmpera, resultado da presença de fuligem nas peças temperadas e pode ser reduzida de um nível de 0,10% até simplesmente traços.

Em grandes fornos contínuos com tubos radiantes, onde a relação de volume de gás para área de cementação é muito maior, a atmosfera é alterada somente de uma a três vezes por hora, peças são freqüentemente processadas em fornos tipos Poço e transferidas para câmaras de resfriamento, onde uma usinagem final é necessária antes da têmpera, abaixo de tais condições as vezes é



vantajoso ter pequena quantidade de fuligem nas peças, para protegê-las de descarbonetação e oxidação durante a transferência.



FIGURAS 30 E 31 - Comparação das medidas da camada cementada em amostras similares de aço 8620, obtidas em cinco laboratórios diferentes



Deposição de fuligem em geradores de gás endotérmico podem ser minimizadas pelo ajuste de operação da relação ar-gás, para produzir gás portador com ponto de orvalho maior que -12°C ($+ 10^{\circ}\text{F}$); maior temperatura, variando o ponto de orvalho de -1 a -2°C (30 a 35°F) são recomendadas.

Outra maneira utilizada é operar o gerador com fluxo uniforme, permitindo a exaustão do excesso de gás em vez de tentar regular o fluxo para a demanda, se a demanda variar numa faixa muito ampla.

Muitos fornos contínuos para cementação são regenerados periodicamente, de preferência quando os fornos estiverem vazios em finais de semana para remoção da fuligem, este processo é realizado pela abertura parcial de portas, para permitir a entrada de ar atmosférico no forno, ou pela introdução controlada de ar através de um soprador externo, em vários pontos ao longo da câmara de cementação e abaixo da soleira do forno. A temperatura deve ser de 800°C pois a queima da fuligem é exotérmica. Quando o forno for ligado após a regeneração, a adição de gás de enriquecimento deverá ser feito para as primeiras 8 a 16 horas de operação, para condiciona-lo novamente e conseguir o potencial de carbono desejado.

CEMENTAÇÃO SELETIVA

Algumas peças, para aplicações específicas devem ser seletivamente cementadas, somente em algumas áreas. Algumas engrenagens por exemplo, são cementadas somente nos dentes ou superfície de engrenamento, para satisfazer as exigências de performance da peça.

A cementação seletiva pode também facilitar a usinagem ou soldagem das superfícies não cementadas. Na cementação seletiva, as superfícies que não serão cementadas devem ser adequadamente protegidas por uma camada de



revestimento ou escudo protetor, que é impenetrável pela atmosfera de cementação.

Vários métodos podem ser empregados para proteger ou tampar superfícies selecionadas da atmosfera de cementação, revestimento de cobre com espessura mínima de 13 microns (μm) é muito usado para esta finalidade, porque é relativamente fácil de aplicar, usinável e não contaminante para a atmosfera do forno.

Antes da cementação de um anel de engrenagem com 0,90m de diâmetro em aço 4620, por exemplo, pode ser revestido com cobre somente na área do diâmetro interno no flange para permitir usinagem final no cubo e nos furos roscados, após a cementação. Para prevenir o depósito de cobre nestas partes, as superfícies são cobertas com cera microcristalina para alta temperatura ou verniz de laca quimicamente resistente, o qual é removido antes da cementação.

Após a cementação o cobre pode ser removido com soluções decapantes adequadas, ou nas operações subsequentes de usinagem. Revestimento cerâmico, em forma de pintura, também é uma maneira econômica para proteger determinadas partes da peça, da cementação.

A superfície deve estar totalmente limpa antes da aplicação do revestimento cerâmico e a primeira camada deve estar bem seca antes da aplicação da segunda camada. Uma exigência fundamental para este tipo de revestimento é que tenha aderência total, para evitar imprevistos quando aquecida em atmosfera cementante.

Aplicação de revestimento cerâmico para buchas e entalhes de brocas, por exemplo, é normalmente empregado na produção de plugs de cobre, ou por enchimento com argila. O uso de plugs de cobre permite um ajuste mais estanque, portanto a pressão deve ser aliviada ou o plug se romperá com a expansão. Os furos passantes devem ser plugados em cada extremidade para



evitar a circulação dos gases cementantes e minimizar a cementação nessas partes.

Os furos roscados devem ser protegidos pela inserção de parafusos de cobre, as roscas macho devem ser protegidas com porcas também de cobre. Se os parafusos e as porcas usados forem de aço, as roscas devem ser protegidas com produto que facilite o desrosqueamento.

O sucesso do método de proteção usado contra cementação, depende muito do cuidado na aplicação. Proteções mecânicas são raramente eficientes na produção, o método mais positivo de garantir uma área específica livre da cementação, é planejar as seqüências de operação, como essas áreas serão usinadas após a cementação e antes da têmpera. Contudo, em muitos casos esta prática não é possível e os custos sempre serão maiores, porque a carga deve ser resfriada lentamente da temperatura de cementação, o que seria uma condição de recozimento antes da usinagem.

Manuseios adicionais também contribuem para aumentar os custos, quando esta prática é usada. Muitas vezes, as operações são planejadas, dessa forma forma a cementação é removida dessas áreas por retifica, permitindo assim o endurecimento no forno de cementação.

Esta prática normalmente é limitada para situações especiais e geralmente usada para espessuras de camada menor que 1,30 mm (0,050 polegadas). O local de amolecimento da parte cementada é freqüentemente usado na indústria automobilística pelo aquecimento por indução.

CEMENTAÇÃO HOMOGÊNEA

Os dois métodos: "Cementação - Difusão" e "Atmosfera Balanceada", são usados na produção de cementação para aplicações especiais, conhecidos



como: “Cementação Homogênea”. Nestes processos, peças com pequena seção transversal, aproximadamente 5,00 mm (0.1875 pol.) ou menos, são cementadas completamente em presença constante de carbono. Este processo oferece uma vantagem de proteger a peça, tal como uma estampagem dificultosa, será feita facilmente pelo baixo carbono do aço e então cementada por todas as partes pelo carbono presente que fornecerá a dureza desejada após o tratamento térmico.

O procedimento da “Atmosfera Balanceada” pode ser usado em peças com variações consideráveis nas seções.

“Cementação - Difusão” É limitado para peças com seções transversais uniformes.

EXEMPLO 15 - Uma instalação de tratamento térmico utiliza o processo de Cementação Homogênea em várias aplicações, onde a conformação, soldagem ou montagem, impedem o uso de aço de alto teor de carbono, por exemplo, dificuldades encontradas com soldas no aço 8650 para fabricação de elos de corrente, foram alterados pelo aço 8620, então soldados e homogeneamente cementados com potencial de carbono de 0,70%. Este procedimento produziu uma corrente uniforme com resistência equivalentes as do aço 8650 e com superior resistência ao desgaste, a espessura máxima dos elos era de 5,00 mm (0,1875 pol.).

EXEMPLO 16 - Em outra aplicação com sucesso, molas de embreagens feitas com aço 1010 e homogeneamente cementadas com potencial de carbono de $0,65 \pm 0,05\%$, as molas tinham 200 mm (8 pol.) no diâmetro de 1,40 a 1,50 mm (0,056 a 0,059 pol.) de espessura, produzidas com este aço, as molas tornavam-se mais baratas que as fabricadas em aço 1065, as quais eram difíceis de conformarem e grande parte eram sucateadas.



ALTA TEMPERATURA DE CEMENTAÇÃO

Refere-se ao uso de temperaturas de cementação acima de 955°C (1750°F), a máxima temperatura de cementação utilizada em aplicações práticas tem sido estimada em torno de 1010°C (1850°F). A vantagem da alta temperatura é que o processo de cementação é acelerado em temperaturas acima de 955°C (1750°F), dessa forma conseguindo-se a profundidade da camada cementada em menor tempo.

Em algumas aplicações, as vantagens podem ser eliminadas pela necessidade de maior frequência na reposição dos dispositivos e suportes de carga. Aceleração do processo pelo aumento de temperatura é demonstrado pelas curvas da Figura 32, a espessura da camada cementada e a concentração de carbono obtidas em 3,00 horas de cementação em temperaturas de 925 a 1065°C (1700 a 1950°F).

Estes dados foram obtidos com aço 1018, com potencial de carbono controlado automaticamente do começo ao fim em cada ciclo, pelo método do ponto de orvalho, para produzir uma superfície de carbono de 0,90 a 0,95%.

INFLUÊNCIA DA ALTA TEMPERATURA NA CONSTRUÇÃO DOS FORNOS

Vários problemas associados com o uso de altas temperaturas, tem desencorajado a aceitação prática desse processo. Os materiais dos fornos convencionais, tal como o aço 35Ni -15Cr, tem suas resistências mecânicas enormemente reduzidas quando exposto em temperaturas acima de 955°C (1750°F), enquanto sua capacidade de absorção de carbono aumenta progressivamente.



Um aumento na taxa de oxidação dos tubos radiantes metálicos usados em fornos a gás, é também uma desvantagem, tornando este tipo de processo inviável na maioria dos casos.

Em altas temperaturas, os controles do potencial de carbono e da espessura cementada são mais críticos e a atmosfera do forno tem necessidade de ser controlada automaticamente, também resultará um alto potencial de carbono e formação de carbonetos complexos nos aços-liga cementados, inclusive facilitará a retenção da austenita nas peças temperadas.

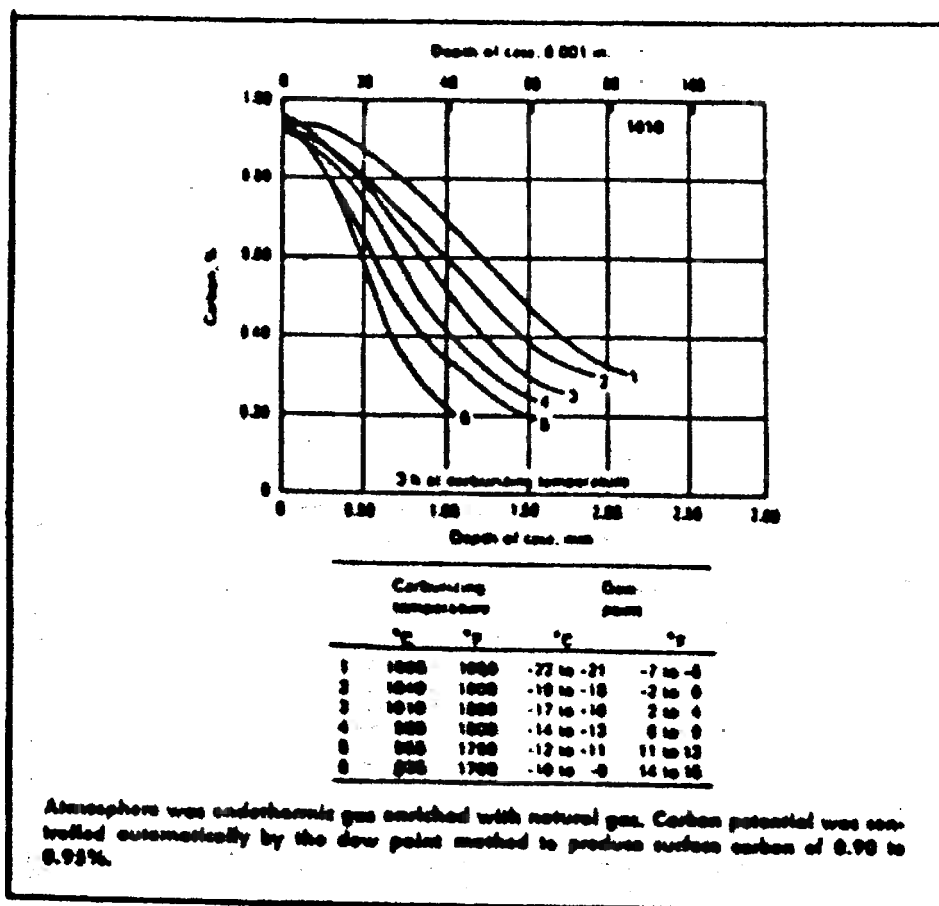


FIGURA 32 - Efeito da temperatura de cementação na profundidade da camada cementada do aço 1018, por 3 horas de patamar

A possibilidade dos efeitos adversos de crescimento de grãos e aumento das distorções acima de 955°C (1750°F) tem também contribuído para desestimular o uso de cementação gasosa em altas temperaturas. Contudo, a introdução de



novos tipos de aços fundidos para aplicações em altas temperaturas, como grelhas, suportes, trilhos e tubos radiantes, tem contribuído para a praticabilidade do processo.

Esses novos tipos de aços mantêm suas características e resistências mecânicas até a faixa de 1150°C (2100°F) e os custos tem sido reduzidos gradativamente nos últimos anos, conseqüentemente, os fornos contínuos atualmente podem ser designados para processos de cementação gasosa em temperaturas de até 1010°C (1850°F).

Os controles automáticos de potencial de carbono e atmosfera, também podem ser designados para temperaturas de até 1095°C (2000°F).

As aplicações de cementação gasosa em altas temperaturas são limitadas para alguns tipos especiais de peças, principalmente as feitas de aço inoxidável martensítico. Este processo poderá ser economicamente viável quando se obter uma produção contínua, de tal forma a ser comparada diretamente com as cementações gasosas convencionais feitas em temperaturas mais baixas.

TÊMPERA DIRETA OU REAQUECIMENTO

A têmpera direta tem custo menor que efetuar o resfriamento das peças e então reaquece-las para têmpera. Esta é a principal razão porque grande parte das peças cementadas são temperadas diretamente da temperatura de cementação em torno de 925°C (1700°F) ou da temperatura de aproximadamente 845°C (1550°F) sem resfriamento à temperatura ambiente. A diminuição da temperatura antes da têmpera pode ser feita das seguintes maneiras:

- a) Dentro da própria câmara de cementação do forno.
- b) Movendo a carga para outra zona com temperatura já apropriada para têmpera.



c) Transferindo a carga para outro forno.

O forno para cementação normalmente usado para têmpera direta, tem uma plataforma para apoio da carga e tanque de óleo embutido na mesma carcaça do forno. Os fornos contínuos tipo Pusher, por exemplo, são idealmente adaptados para têmpera direta e podem ser controlados para obter um ciclo desejado com ajustes das temperaturas nas diversas zonas. Têmpera direta em fornos tipo Poço geralmente é mais dificultoso e também perigoso.

Assume-se então que um ou outro tipo é mais, ou menos vantajoso, outros fatores que podem influenciar na escolha entre os fornos de têmpera direta e reaquecimento são:

- a) O tipo de aço que será cementado.
- b) Tamanho e forma das peças.
- c) Necessidade de seleção da cementação.
- d) Seqüência das operações subsequentes de fabricação das peças.

Muitos dos aços de alta liga, como aço de alto níquel, reterá excessiva quantidade de austenita quando temperado diretamente com temperatura em torno de 925°C (1700°F), entretanto é comum na prática, utilizar este tipo de aço para cementação-difusão, resfriamento lento e reaquecimento; contudo, a retenção de austenita vem gradativamente tornando-se um problema menor, devido a diminuição do uso de aços com alto teor de níquel para cementação. E o desenvolvimento de ciclos com temperaturas adequadas, resultarão numa razoável redução de austenita retida. Por exemplo, em alguns instantes da cementação do aço de alto níquel, a temperatura primeiro decresce abaixo da temperatura de têmpera em torno de 705°C (1300°F) e então eleva-se a 815°C (1500°F), antes da têmpera.



Algumas experiências freqüentemente são necessárias para obter-se ótimas micro estruturas para os aços de alta liga, este tratamento pode causar formação de carboneto no contorno do grão, o carbono presente na camada cementada de carboneto nos contornos dos grãos, durante o resfriamento para redução da temperatura antes da têmpera, se os contornos dos grãos forem afetados, podem ocorrer os seguintes fatores:

- a) Dificuldades no esmerilhar, controle de retifica.
- b) Redução das propriedades mecânicas.
- c) Rompimento da camada cementada nos cantos vivos durante limpeza mecânica.
- d) Fracasso no desempenho da peça, dependendo da aplicação.

O tamanho e a forma das peças normalmente são fatores na seleção do método a ser empregado, entretanto elas não devem ser apoiadas diretamente, no caso das peças que não forem temperadas, podem não apresentarem distorções quando temperadas diretamente, havendo maior possibilidade quando reaquecidas. De qualquer maneira, este fenômeno deve ser relatado para especificação das peças, porém não podem ser generalizadas, o tamanho e a forma da peça tornam-se um fator de escolha entre a têmpera direta ou a têmpera com reaquecimento. Cada tipo de peça necessita de uma consideração individual e se a distorção obtida na têmpera pode ser tolerada, raramente existirá vantagem no uso do reaquecimento.

Por exemplo, as peças mostradas na Figura 33, representando uma grande variedade de tamanhos, foram todas temperadas diretamente após a redução de temperatura para têmpera após a cementação gasosa, os resultados foram todos aceitos.

Áreas específicas usinadas após a cementação e antes da têmpera é um método positivo para obtenção de cementação seletiva, entretanto esta é uma



razão freqüente para utilização de resfriamento lento e têmpera com reaquecimento.

CONTROLE DIMENSIONAL

Antes de se fazer o tratamento termo-químico de cementação gasosa, as peças usinadas devem ter suas dimensões mais próximas possíveis das dimensões finais, pois o tempo do tratamento torna-se mais curto; apesar disso, deve ser reconhecido que algumas distorções serão encontradas em todas as peças cementadas, embora essas distorções sejam influenciadas exclusivamente pelo tamanho e formato das peças, outros fatores significativos são:

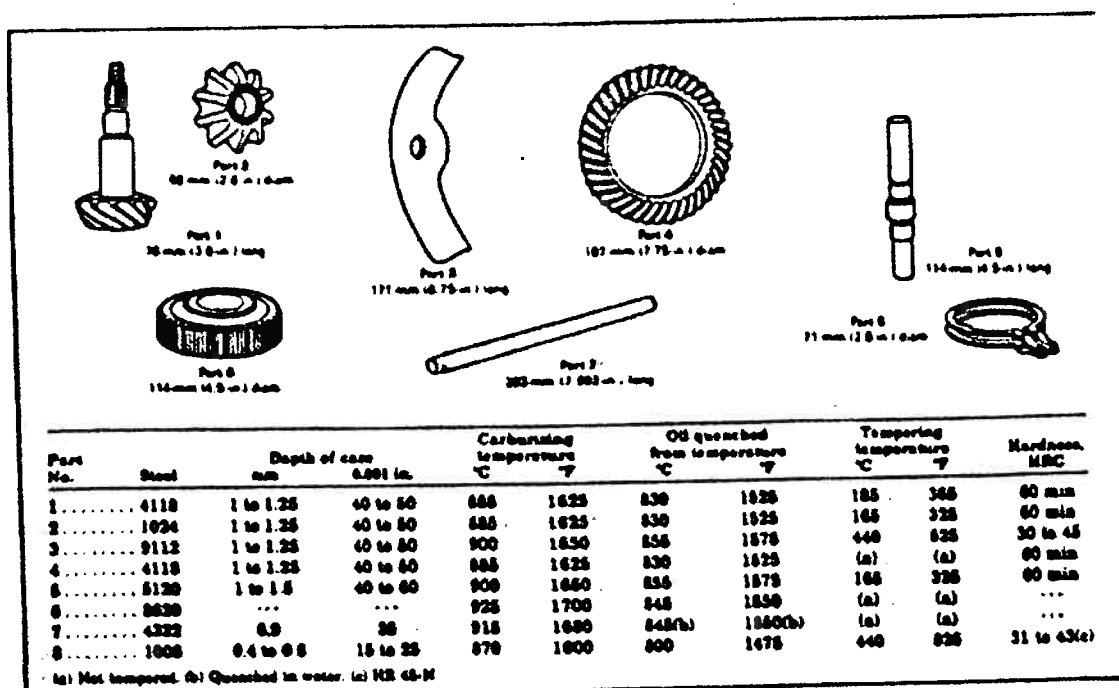


FIGURA 33 - Dados obtidos em peças temperadas após a cementação

- Tensões residuais nas peças antes do tratamento térmico.
- Tensões induzidas, causadas por aquecimento não uniforme.
- Método de empilhamento e posicionamento das peças durante o aquecimento e têmpera.



- d) Crescimento da superfície durante a cementação.
- e) Temperatura e têmpera.
- f) Severidade da têmpera.
- g) Composição química do aço.

Várias maneiras devem ser analisadas para reduzir as distorções encontradas em algumas peças específicas, porém todas elas aumentam os custos do tratamento térmico, conseqüentemente cada situação deve ser analisada para determinar a maneira mais econômica para o tratamento térmico desejado.

A determinação das distorções feitas nos testes de peças, justamente com aços e ciclos de tratamento térmico idênticos, foram de pequeno valor em testes simulados nas mesmas condições das peças anteriormente tratadas.

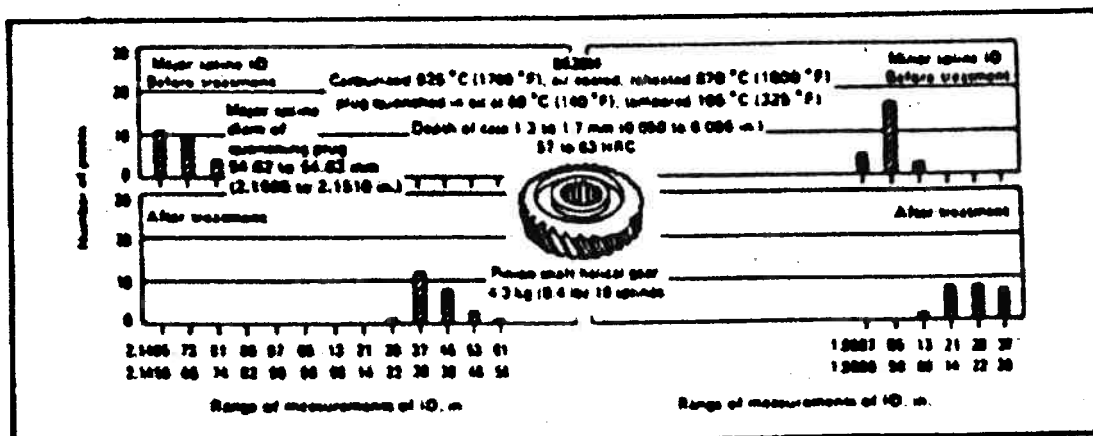


FIGURA 34 - Dimensões da engrenagem antes e após a cementação e têmpera

A engenharia de fabricação agora tem acesso à realidade dos problemas de distorções. No tratamento térmico de um lote de 50 peças tratado num equipamento da produção, empregando as boas técnicas, mas sem cuidados especiais de carregamento e têmpera, as dimensões significativas das peças foram então medidas e registradas, as Figuras 34 e 38 mostram os resultados típicos de como estudá-las. Peças similares submetidas ao mesmo tratamento



não se distorceram uniformemente, portanto muitos dados sem significados podem ser obtidos pelas medições idênticas das peças, desses dados podem ser determinados ou não a distorção máxima, o que exigirá que as peças sejam usinadas, caso contrário serão refugadas.

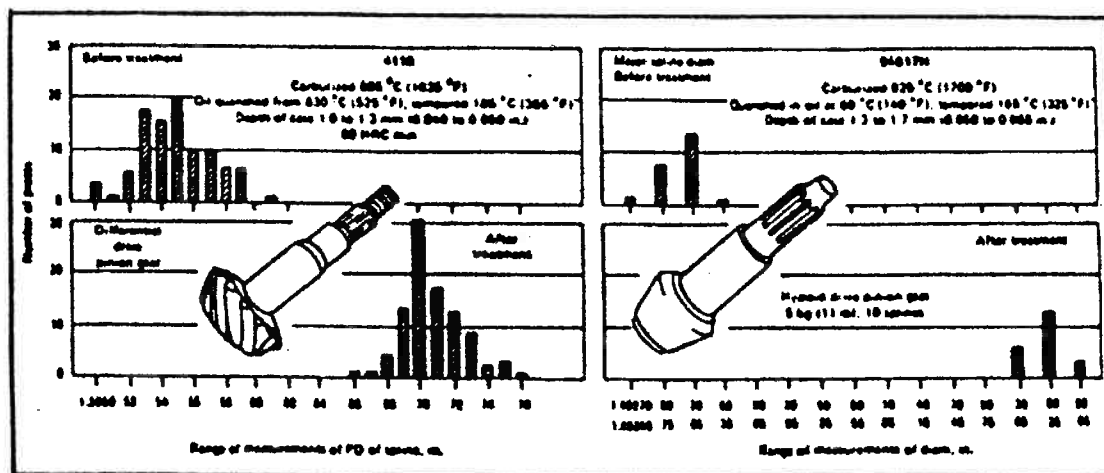


FIGURA 35 - Dimensões de dois pinhões antes e após a cementação e têmpera

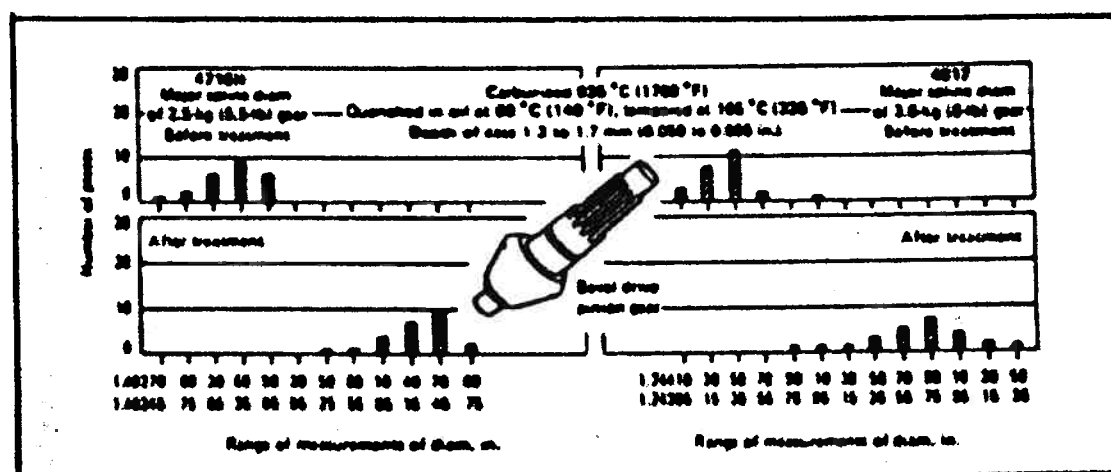


FIGURA 36 - Dimensão do pinhão antes e após a cementação e têmpera

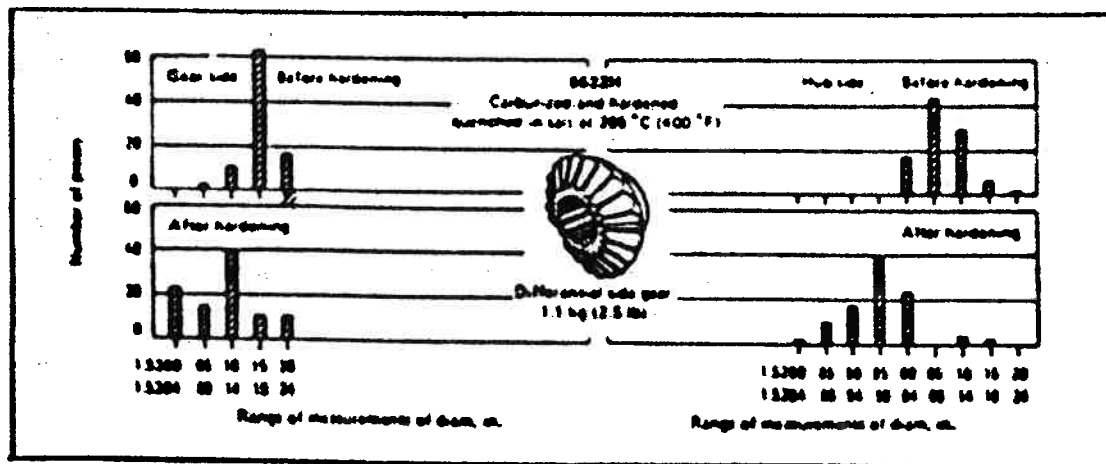


FIGURA 37 - Dimensões da engrenagem antes e após a cementação e têmpera

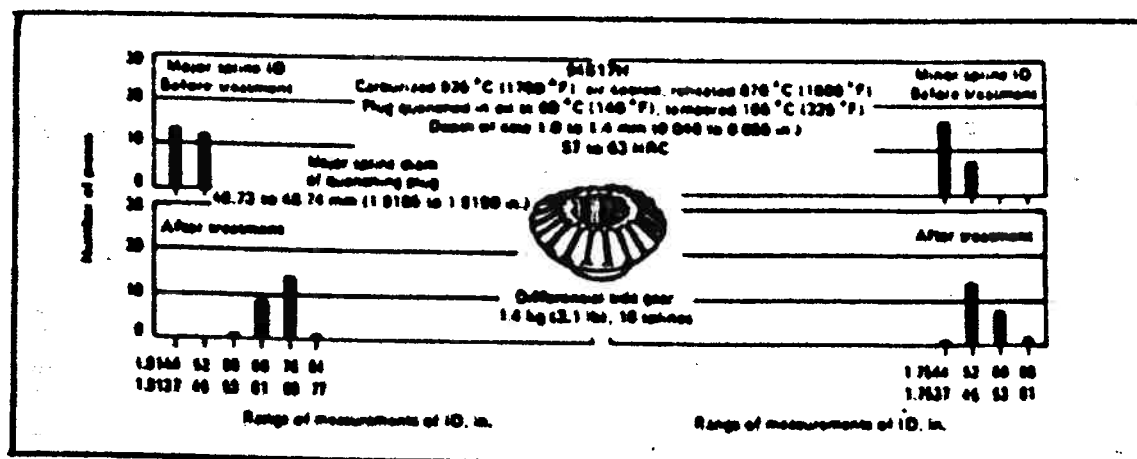


FIGURA 38 - Dimensões da engrenagem antes e após a cementação e têmpera



MÉTODOS PARA REDUÇÃO DAS DISTORÇÕES

Pode ser aconselhável com uma alternativa subsequente a usinagem, esforçar-se para a diminuição da distorção, vários métodos para reduzi-las são disponíveis, os quais serão discutidos em ordem ascendente de custos:

a) MARTÊMPERA

Envolve têmpera em sal fundido ou óleo quente, é o método mais econômico para redução das distorções, normalmente o custo ocasionado é relacionado com a amortização dos custos dos equipamentos.

b) POSICIONAMENTO DAS PEÇAS

O posicionamento fixo das peças complexas durante o ciclo de cementação e têmpera, efetivamente reduzem as distorções das peças, mas torna o processo mais oneroso, normalmente em torno de 50%, esse percentual acrescido, oriundo dos custos iniciais de construção e reposição dos dispositivos especiais para fixação das peças, o que também resulta na redução da carga útil no forno, normalmente a metade da capacidade do equipamento é ocupada por esses dispositivos.

Os dispositivos e a martêmpera as vezes são usados em combinações, para redução das distorções.

c) PRESSÃO NA TÊMPERA

A pressão na têmpera e outros meios de posicionamento fixo das peças, são métodos efetivos para redução das distorções, contudo esses métodos aumentam consideravelmente os custos, as vezes chegando a dobrá-los, as razões são as seguintes:



- ✓ Custo dos equipamentos.
- ✓ Os ciclos de cementação e têmpera tornam-se mais longos, porque as peças devem ser resfriadas lentamente e então reaquecidas para têmpera.
- ✓ As peças devem ser manuseadas individualmente na têmpera.



7. REVENIMENTO

REVENIMENTO DE PEÇAS CEMENTADAS

A dureza da cementação decresce com o aumento da temperatura de revenimento, como mostrado nas Figuras 39 e 40, são de amostras cementadas e temperadas diretamente no óleo, a 925°C (1700°F), os valores da dureza Rockwell C mostrados, foram convertidos em Rockwell A para dureza superficial de Vickers para dureza transversal, das amostras cortadas com 75 mm (3 pol.) de comprimento, cada ponto mostrado é a média de duas amostras.

Os dados da Figura 40 são de amostras com camadas cementadas de 1,00 a 1,30 mm (0,040 a 0,050 pol.) em aço 1018 e 1117 que foram rea aquecidos a 780°C (1440°F) e temperadas verticalmente em água com agitação, as amostras de aço liga cementadas foram rea aquecidas a 845° (1550°F) e temperadas verticalmente em óleo com agitação. Após o revenimento foram cortadas peças com 19 mm (0,75 pol.) de comprimento de cada barra e foram feitas medições de dureza superficial em espaços deslocados de 90°, as durezas obtidas estavam próximas, portanto uma única curva foi mostrada para cada grupo de tipo de aço. Os valores da dureza Rockwell C, correspondentes para as posições J3 e J8 na endurecibilidade das amostras dos aços ligados foram as seguintes

AÇO	DUREZA, HRC	
	J3	J8
8617H	30	18
8720H	41	25
8822	49	37

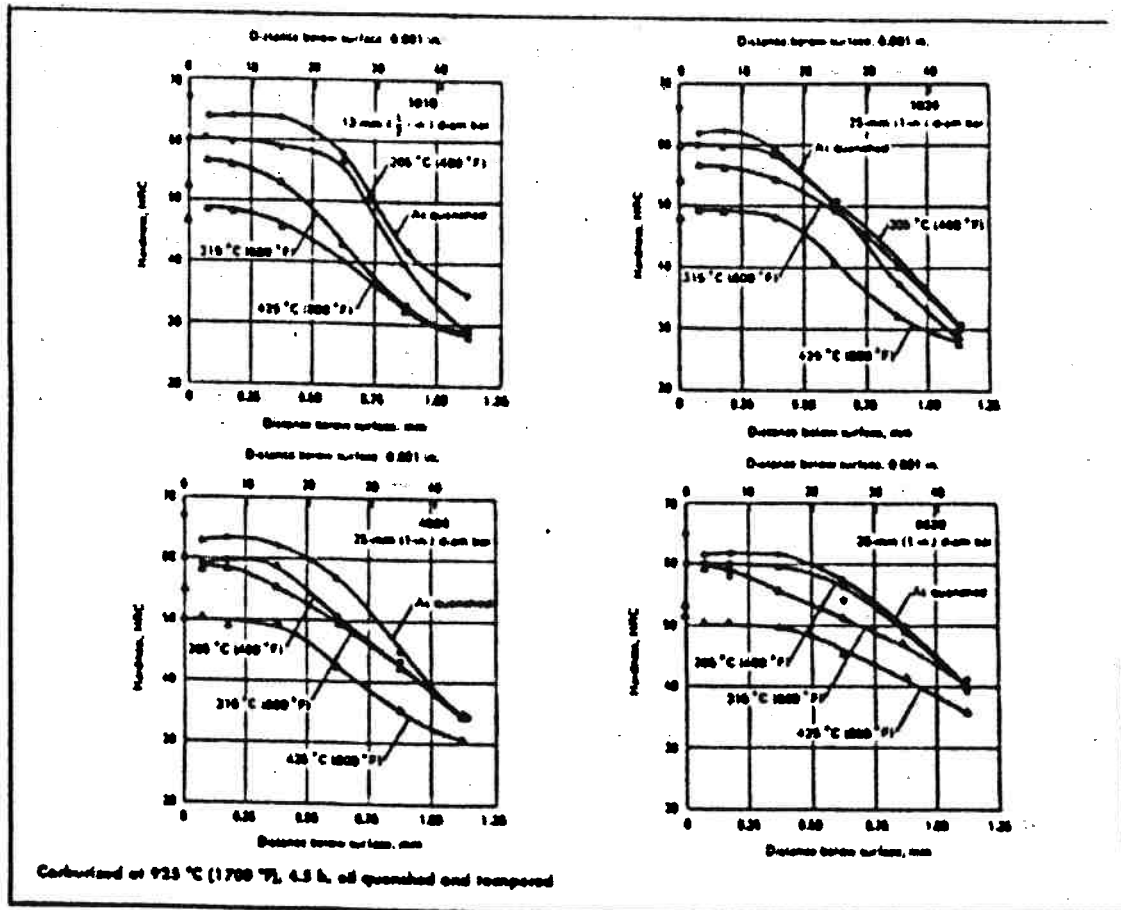


FIGURA 39 - Efeito do revenimento na dureza das peças cementadas

Muitos tratamentos térmicos de cementação e têmpera são feitos sem a realização do revenimento, entretanto muitas peças são revenidas numa variação de 150 a 190°C (300 a 375°F) cuja dureza é pouco reduzida, mas pode acrescentar tenacidade e reduzir a susceptibilidade a fissuras durante a usinagem.

Para alguns pinhões e engrenagens quando utilizados aplicações críticas, a experiência tem provado que após a têmpera, o revenimento em baixa temperatura na faixa de 150 a 190°C (300 a 375°F) é benéfico. As peças



cementadas utilizadas em aeronaves são obrigatoriamente revenidas, nestas aplicações e revenimento propicia benefícios na resistência ou lascamento de partículas.

Contudo, em centenas de aplicações não críticas, tem sido difícil ou quase impossível de se provar a necessidade do revenimento, embora exceções são as vezes feitas para encontrar exigências especiais, as peças raramente são revenidas em temperaturas superiores a 190°C (375°F) quando há necessidade de alta dureza superficial.

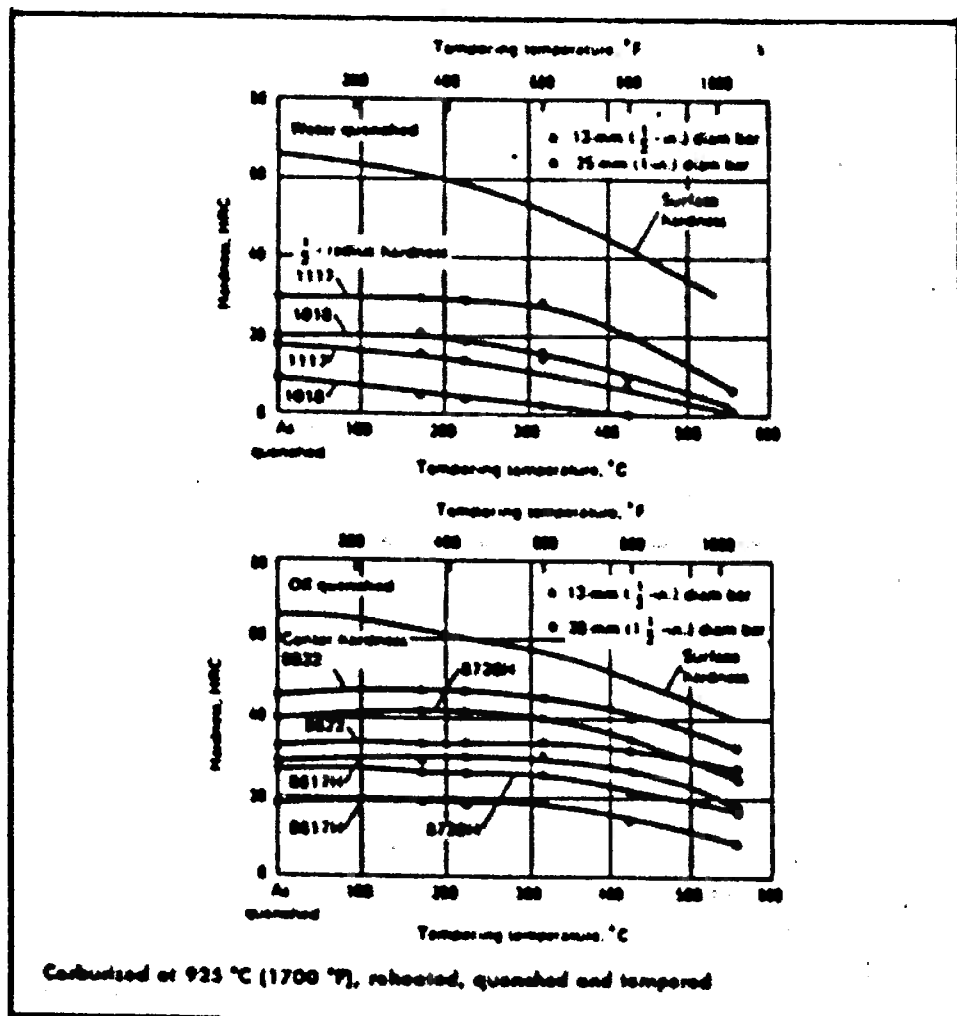


FIGURA 40 - Efeito do revenimento na dureza das peças cementadas.



8. CONCLUSÃO :

Como foi exposto neste trabalho, vimos que o aço para atender à determinadas aplicações, deve ter suas características físicas e químicas alteradas, neste caso, pelo tratamento termo-químico de cementação gasosa.

Entretanto para se conseguir os efeitos desejados, o tratador deverá controlar todas as variáveis do processo, como : temperatura, tempo e potencial de carbono. Levando em conta o tipo de aço a ser tratado, o tipo de forno que será utilizado, os gases que constituirão a atmosfera do forno e o perfil da camada cementada especificada. A prática correta do processo de cementação gasosa, envolvendo a escolha correta do forno a ser utilizado e um ciclo de trabalho apropriado para cada tipo de aço é essencial para que os melhores resultados sejam obtidos e se tenha maior confiabilidade nos materiais empregados.

Esse tipo de tratamento do aço é facilmente encontrado no mercado, sendo fornecido por empresas especializadas, que possuem fornos com controle automático das variáveis do processo e equipamentos adequados para o controle de qualidade das peças cementadas.

A tendência atual é haver maior informatização dos fornos, com programas totalmente controlados por computador, onde o trabalho humano se resume em programar o computador e operações de carregamento e descarregamento do forno. E ainda, novos tipos de processos de tratamentos termo-químicos estão sendo desenvolvidos e postos em prática, dentre as quais destacamos a cementação por plasma, que provavelmente será muito utilizado no futuro, pois apresenta melhor controle do processo, redução de custos e também a proteção do meio ambiente devido a não emissão de poluentes para a atmosfera.

Novos tipos de fornos também estão sendo construídos com instrumentos sofisticados, como por exemplo, controladores lógicos programáveis, que



controlam simultaneamente o tempo, a temperatura e o potencial de carbono, contribuindo significativamente para o bom desempenho do processo.

Devido as exigências atuais dos clientes e consumidores, as indústrias de tratamento termo-químico vem buscando novas tecnologias no sentido de melhorar a qualidade dos produtos com conseqüente redução de custos.



9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A. S. Metals; "Metals Handbook" ; Ohio; Metals Park Heat Treating (1981); vol. 4; 9a. ed.;
2. V. Chiaverini; "Aços e Ferro Fundidos"; São Paulo; Associação Brasileira de Metalurgia; 5a. ed.;
3. V. Chiaverini; "Tratamento Térmico das Ligas Ferrosas"; São Paulo; ABM;
4. Russel, K. C., Aaronson, H. I., "Precipitation Process in Solids", The Metallurgical Society of AIME, 1976;
5. Honeycombe, R.W.K., "AÇOS : Microestrutura e Propriedades", Fundação Calouste Gulbenkian / Lisboa, 1982;
6. Manual de Instruções do Forno de Cementação Gasosa; Combustol Indústria e Comércio Ltda;
7. Manual de Instruções do Gerador de Gás Endotérmico; Combustol Indústria e Comércio Ltda;
8. Tschiptschin, A.P. e Goldenstein, H., "Metalografia dos Aços", EPUSP;
9. Metals Handbook – Desk Edition – ASM – 1986.