

PROCESSOS CLÁSSICOS DE CEMENTAÇÃO - RESUMO

O presente trabalho, apresenta estudos teóricos do processo de cementação e faz uma análise detalhada de seus tipos, obtenção dos meios, controles, vantagens e desvantagens de cada um deles.

São enfocados os processos de cementação usuais em nosso meio industrial, ou seja, o sólido, à carvão, e o gasoso em suas versões à gás endotérmico e gotejamento. Não foi mencionado o processo líquido, pois os autores consideram-no como sendo carbonitretação.

São apresentados também aspectos práticos e dados reais de cada processo.

Engº Hélio Gomes Mathias

- Professor da FEI, FATEC, Faculdade de Engenharia de Santos.

Engº José Francisco de Oliveira

- Chefe do Departamento de Tratamentos Térmicos e Superfície da Mercedes Benz do Brasil S/A: professor da FATEC SP.

Engº Manoel Mendes

- Gerente do Depto. de Pesquisa e Desenvolvimento da Combustol Ind. e Com. Ltda.: professor da FEI e FATEC-SP.

Engº Luiz Nelson Miserochi Dias

- Gerente do Depto. de Tratamentos Térmicos da Combustol Ind. e Com. Ltda.: professor da FATEC-SP.

1. Introdução

O presente trabalho visa dar aos leitores um esboço do que vem a ser o processo de cementação. Sem fugir da nossa realidade, são enfocados processos usuais atualmente existentes no nosso meio industrial.

O trabalho inicia-se com algumas considerações sobre aspectos teóricos do processo e as leis que o regem. Em seguida há um explicação geral dos processos de cementação sólida e a gás, por gotejamento e a gás endotérmico.

São descritos os processos, como se dá o enriquecimento em Carbono, como controlar a distribuição desse potencial, suas vantagens, desvantagens e casos reais.

Não se menciona o processo líquido ou em banho de sais, pois os autores consideram-no um processo de carbonitretação e não um processo de cementação, pois os mesmos utilizam-se de Cianetos que após as devidas reações banho-peça liberam para a superfície da peça além de Carbono o Nitrogenio.

Embora já existem pesquisas a respeito de cementação iônica, à vácuo, por leito fluidizado, por composição de atmosferas a base de Nitrogenio, Propano e ar ou Nitrogenio e Metanol, esses processos não foram abordados pois alguns deles somente se encontram em fase experimental em nosso parque industrial.

2. Considerações Gerais

Cementação é o enriquecimento em carbono, geralmente limitado às camadas periféricas, realizado em temperaturas acima de A_{c1} e A_{c3} , em meio capaz de fornecer aquele elemento. (ABNT - F - TB - 58).

O carbono penetra no interior do aço por difusão. Após a cementação é realizada geralmente uma têmpera para se obter um endurecimento maior da camada enriquecida em carbono.

A baixa solubidade do carbono na ferrita implica em que a cementação seja efetuada no campo austenítico. O teor de carbono na camada cementada está geralmente entre 0,7 e 0,9 %C, obtendo-se assim um máxima dureza superficial, após a têmpera, chegando até 800-900 Vickers.

As características das peças cementadas dependem em primeiro lugar do gradiente de carbono da superfície para o núcleo. A técnica consiste em assegurar que este gradiente dê por um lado um teor superficial de carbono suficiente para obter a dureza desejada após a têmpera, evitando a formação de cementita ou autenita retida e por outro lado uma espessura de camada correta.

Dois definições de camada cementada são usadas, a efetiva que é medida após a têmpera até um limite de dureza vickers determinado, e a total que é a medida simplesmente da camada cementada, utilizando-se para isso uma lupa graduada.

Na realização da cementação não ocorre um equilíbrio estático - entre a atmosfera e o aço, na realidade ocorre um equilíbrio dinâmico entre a velocidade de chegada do carbono na superfície da peça e a velocidade de difusão do carbono nessa peça.

Para solucionar este problema é necessário conhecer o potencial de carbono da atmosfera, a natureza e a cinética das reações de cementação e as leis de difusão de carbono no aço.

2.1. Potencial de carbono

Quando uma folha de aço delgada, é elevada à uma determinada temperatura em contato com uma atmosfera cementante, verifica-se que ocorre um aumento de peso e que ele se enriquece em carbono.

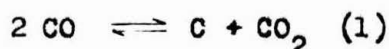
Tôda a modificação da composição da atmosfera ou da temperatura leva à uma modificação da composição da chapa e à fixação, depois de um certo tempo, de um novo teor de C. Um equilíbrio estabelecido entre a atmosfera e o aço terá um teor de carbono que é característico da atmosfera realizada e da temperatura. Isto, por definição, é o potencial de carbono desta atmosfera naquela temperatura.

Seu conhecimento é indispensável para uma operação de cementação.

O potencial determina igualmente o gradiente de carbono no aço.

2.2. Papel cementante do monóxido de carbono.

No processo de cementação o monóxido de carbono fornece átomos ao aço, segundo a reação:



A reação é reversível e conduz a um equilíbrio. Havendo presença de dióxido de carbono a reação se inverte: uma parte do carbono do aço reage com o dióxido de carbono para obter novamente monóxido de carbono. O dióxido de carbono é um gás descarbonetante, desde que em excesso.

Desde que o equilíbrio é estabelecido entre o gás e o aço, as pressões parciais de CO e CO₂ são bem definidas à qualquer temperatura. - Elas relacionam o teor em carbono de austenita, pela relação:

$$K_1 = \frac{P^2(\text{CO})}{P(\text{CO}_2) \times a} = \text{cte}$$

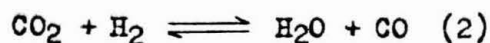
a - é a atividade do carbono na austenita. Este coeficiente está relacionado ao teor de carbono e é igual a 1 (um) desde que a austenita esteja saturada.

A atmosfera pode ter outros constituintes, além de CO e CO₂. - Neste caso teremos novas reações. Entretanto uma vez atingido o equilíbrio, o teor de carbono no aço é sempre dado pela constante K₁. Sendo a atmosfera diluída por outros constituintes, as pressões parciais de CO e CO₂ serão menores.

2.3. Atmosfera à base de CO e H₂

As atmosferas industriais são obtidas por combustão endotérmica de hidrocarbonetos ou pela decomposição de líquidos orgânicos ricos em CO e H₂.

Na reação (1) ocorre a formação de um mol de CO₂ para cada mol de carbono liberado. O CO₂ e o H₂ reagem, formando gás d'água.



Das reações (1) e (2) se obtém:



Esta reação de equilíbrio é caracterizada pela constante:

$$K_3 = \frac{P(\text{CO}) P(\text{H}_2)}{P(\text{H}_2\text{O}) x_a}$$

O vapor d'água é descarbonetante igualmente como o CO₂.

O monóxido de carbono e o hidrogenio estão presentes e em gran de proporção na atmosfera cementante.

O conhecimento da pressão do vapor d'água permite determinar o valor de atividade, pois, há um teor de carbono da austenita em equilíbrio com atmosfera.

O potencial de carbono pode ser determinado e na função do ponto de orvalho ou da % CO₂ da atmosfera.

2.4. Influência da composição química do aço.

Em presença de aço carbono ou aço liga as mesmas reações de cementação são processadas, conduzindo aos mesmos valores das constantes de equilíbrio. Entretanto os teores de equilíbrio são diferentes. O efeito dos elementos de liga nos aços modificam a relação que existe entre o teor de carbono na austenita e os valores de atividade.

O níquel e o silício, principalmente, abaixam o teor de carbono no equilíbrio, assim como os outros elementos aumentam.

A influência dos elementos de liga é tanto maior quanto maior o potencial de carbono.

Aços ao Boro se distinguem por uma forte tendência à carbonetação.

2.5. Cinética da reação gás-metal

As reações da atmosfera e entre a atmosfera e o aço não são instantâneas, a velocidade de penetração do Carbono no aço é muito lenta. O Carbono que penetra na superfície do aço se difunde para o interior da peça. Esta penetração de Carbono na superfície da peça depende da velocidade de fornecimento de Carbono ao aço e da velocidade de difusão.

Na prática, o potencial de Carbono superficial do aço deve ser sensivelmente igual ao potencial de Carbono da atmosfera ao longo de algumas horas, portanto a cementação é controlada pela difusão.

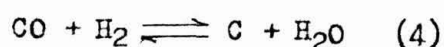
Para acelerar a cementação provoca-se um desequilíbrio obtendo um potencial de carbono da atmosfera mais elevado que o potencial desejado.

A reação de cementação por monóxido de carbono é muito lenta e pouco eficaz. Na decomposição do metano, ocorre um ligeiro aumento na velocidade. Pela presença do H₂ a velocidade aumenta rapidamente.

Newmann e Wyss mostraram que a velocidade é máxima quando a atmosfera é composta de H₂ e CO em iguais proporções (50% / 50%).

A penetração do carbono no aço é ainda determinado por outras reações que aquelas de decomposição direta do monóxido de carbono ou metano.

Segundo Collins e colaboradores a reação



é a mais rápida.

Em primeiro estágio, o H₂ sefa absorvido na superfície do aço sob forma atômica. O choque de uma só molecula de CO será então necessário para introduzir um átomo de carbono na estrutura cristalina de austenita, então a cementação direta por CO necessita o choque simultâneo de duas moléculas. A reação é tanto mais provável quanto mais elevada é sua velocidade, entretanto, ainda que esta reação seja mais rápida, ela não é suficiente para assegurar a cementação por si só, pois nela há formação de vapor d'agua.

Para que a cementação possa prosseguir é necessário eliminar o vapor d'agua, ou por uma renovação rápida da atmosfera ou pela injeção de um hidrocarboneto.

O mecanismo de penetração do carbono não é conhecido com certeza numerosas reações intermediárias são susceptíveis de se produzir entre os diversos constituintes presente na atmosfera, que não são conhecidas a sua cinéticas.

A cinéticas das reações podem ser influenciadas pelo estado da superfície do aço, por sua composição, pela velocidade de renovação da atmosfera em contato com a peça ou pela presença de certos elementos que podem servir como catalizadores.

2.6. Difusão do Carbono no aço

As reações de cementação tem por consequência um aumento do teor de Carbono na superfície da peça. Como analisamos anteriormente, o Carbono penetra no aço por difusão, e essa difusão dos átomos de Carbono segue as leis de Fick.

1ª lei de Fick

O número de átomos que atravessa uma superfície unitária por unidade de tempo é proporcional ao gradiente de concentração

$$J = - D \frac{dC}{dx}$$

O fluxo dos átomos ocorre de forma a diminuir o gradiente de concentração .

A 2ª lei de Fick relaciona a variação de concentração com o tempo e pode ser expressa como se segue:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}$$

O coeficiente de difusão aumenta rapidamente com a temperatura e depende da composição química. Assim o Silício abaixa a difusão e o Níquel, Cromo e Molibdênio aceleram a difusão.

Com o apoio das duas leis de Fick é possível teoricamente conhecer a distribuição do Carbono em uma peça cementada.

2.7. Consequências da difusão

O fluxo de Carbono é dirigido perpendicularmente à superfície. O teor de Carbono em um ponto e a profundidade da camada cementada é função da concavidade da peça.

Nas partes salientes ocorrerá uma maior quantidade de Carbono difundido, podendo ocorrer uma super cementação, obtendo após a têmpera uma dureza mais elevada. Este fenômeno é acentuado pelo aquecimento mais rápido e pela melhor renovação do gás.

2.8. Escolha do potencial de Carbono na câmara do forno

O teor superficial de carbono não atinge seu valor de equilíbrio imediatamente. Para obter características corretas na camada é necessário

levar-se em conta o potencial da atmosfera e o tempo de cementação.

Assim, para camadas mais finas, o potencial será fixado a um valor mais elevado do que o desejado.

Ao contrário, para espessuras maiores, a diferença entre os dois valores será desprezível.

Para camada profundas é talvez mais interessante, se as instalações o permitirem, fazer variar a composição da atmosfera. No início do tratamento utiliza-se uma atmosfera fortemente cementante que permite obter rapidamente o teor desejado na superfície ou mesmo ultrapassá-lo. Reduz-se em seguida o potencial de carbono da atmosfera para deixar difundir o carbono para o interior da peça. Reduz-se assim o risco de uma super cementação, e os carbonetos eventualmente formados durante a primeira parte do tratamento tem a possibilidade de se dissolver.

Esta técnica permite uma economia de tempo da ordem de 20 a 60% e atenua o gradiente de C na peça, o que é particularmente interessante.

3. Cementação Sólida

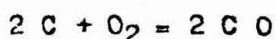
Este tipo de cementação também conhecida como cementação em caixa, ou a carvão, é sem dúvida o processo mais antigo que se conhece para endurecer o aço.

A mistura CARON (1910) foi o primeiro "carvão" utilizado com composição bem definida, 60% de carvão de madeira e 40% de carbonato de bário, onde o primeiro é a fonte de carbono e o segundo é o "ativador". A composição dos "carvões" que se encontram hoje no mercado são variantes de CARON e lamentavelmente estes produtos continuam sendo importados sem a menor necessidade.

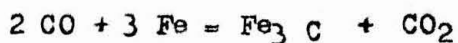
O CARON sofreu modificações de composição, foi introduzido o carvão coque com o objetivo de aumentar a condutibilidade térmica e a resistência mecânica do "carvão", isto porque o carvão de madeira é bom isolante e tem baixa resistência à compressão. Quanto ao "ativador" carbonato de bário, sua porcentagem foi diminuída até 0,5% segundo a bibliografia consultada e adicionados outros como acetato de bário, carbonatos de cálcio, só-

dio e potássio.

As reações do processo que conduzem à cementação podem ser descritas da seguintes maneiras: o carvão, à temperatura elevada, reage com oxigênio existente na caixa, formando o monóxido de carbono.



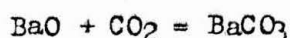
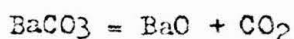
O monóxido de carbono é o elemento cementante segundo a reação:



O dióxido de Carbono reage com o carvão fechando o ciclo.



Esta explicação é lógica porque colocando-se carvão de madeira em um forno a vácuo não ocorre cementação. Se usarmos somente carvão de madeira para cementação resulta peças sujas e uma cementação irregular. Ao adicionarmos a esse mesmo carvão carbonato de bário, a cementação é regular e as peças saem limpas. As reações que envolvem o carbonato de bário são:



Repetindo-se a mesma experiência somente com carbonatos de cálcio ou potássio não há nenhuma melhoria no processo. O carbonato de sódio dá resultados inferiores ao carbonato de bário, mas, superiores ao carvão puro. O cloreto de bário dá resultados semelhantes ao carbonato de bário.

Constata-se que é o íon bário o elemento chave da cementação regular, não que o bário seja um ativador, mas um preventivo que impede o depósito da fuligem sobre as peças. A ausência dessa fuligem acarreta a cementação regular, fenômeno idêntico ocorre na cementação gasosa. A ação preventiva da precipitação é proporcional ao teor do carbonato de bário e aumenta até 6%.

O teor de carbonato de bário usual é entre 0,5 e 6% que resulta peças mais ou menos limpas e em consequência superfícies mais ou menos absorventes. O valor encontrado em um carvão comercial bem conhecido no mercado foi de cerca de 2%.

No tocante a cinética da reação de cementação o processo é ti

do como lento. Isso se deve a dois fatores independentes:

- 1) a atmosfera é constituída somente por CO₂.
- 2) baixa velocidade de aquecimento da caixa mais carvão (fig.1)

A parte tecnológica desse processo é simples. Deve-se escolher o material da caixa de forma criteriosa; tem-se usado o 25/20 ou 35/15. - Quanto às dimensões, estas devem ter o estritamente necessário, devido ao problema do tempo de aquecimento. A temperatura usual para cementação esta em torno de 930°C.

No que se refere a tempos de cementação podemos dar o seguinte exemplo:

caixa com $h = 400$ mm e $\phi = 400$ mm, colocando-se cinco coroas - com $\phi_e = 367$ mm e utilizando-se um forno câmara com 84 Kw de potência. - Estando o forno em temperatura e carregando-se doze caixas constata-se:

- 1) tempo para atingir a temperatura de cementação (910°C) = 6 horas.
- 2) tempo de cementação para uma camada efetiva entre 1 e 1,2mm: 13 horas.

Segundo um produtor de carvão nós temos valores proximos da curva de gradiente de carbono com os seguintes valores:

22h a 850°C (% C na superfície > 1,5%)

12h a 900°C (% C na superfície = 1,1%)

7 h a 950°C (% C na superfície = 1,1%)

Dando aproximadamente 0,4% C a 1,5mm.

Já outro fabricante nos informa os seguintes valores para diversos aços:

<u>Temperatura °C</u>	<u>% C na Superfície</u>	<u>Camada Total mm</u>	<u>Tempo</u>
880°C	1,0 a 1,2	0,75 a 1,1	6,25 h
930°C	0,8 a 1,2	0,75 a 1,4	6,25 h
1000°C	0,8 a 1,2	1 a 1,6	6,25 h

Após a utilização do "carvão" em uma cementação é necessário - adicionar carvão novo, isto porque há perda por queima e de eficiência, - esta adição é um valor empírico que se descobre com a prática para termos sempre um valor constante de carbono na superfície.

Não há nenhuma teoria que correlaciona a composição com o potencial de carbono do aço. Isto mostra claramente o empirismo do processo.

Após a cementação pode-se fazer têmpera direta ou o resfriamento para têmpera posterior; deve-se evitar o esfriamento lento da caixa por que ocorrerá um empobrecimento ou descarbonetação da superfície devido a reação $\text{CO}_2 + 2\text{CO}$ (reção de Boudouard).

No que se refere às vantagens deste processo podemos citar: operação simples, pessoal não especializado, resultados reprodutivos e não há o perigo de explosão. As desvantagens são: processo sujo e em desuso, utiliza muita mão de obra e perde-se energia para aquecer caixa e carvão.

4. Cementação por gotejamento

Este processo, apesar de bastante antigo, tem ainda atualmente grande aplicação, não só no Brasil, como também na Europa e no Japão.

O método consiste em produzir o gás cementante pelo gotejamento de líquidos orgânicos e seu craqueamento dentro do próprio forno.

Normalmente utilizam-se simultaneamente dois líquidos; um com a função de gerar um gás de base, carregador, e outro que fornece o gás cementante. Para a primeira finalidade podem ser utilizados, por exemplo: metanol, etanol, isopropanol. E como fonte de cementante: acetona, acetato de tila, acetato de metila. A tabela I apresenta, de maneira resumida,

As características destes compostos.

Os fornos utilizados para este processo são normalmente os de tipo poço com cadinhos, como o ilustrado na figura 2; contudo fornos horizontais intermitentes, com resfriamento à óleo complementar e fornos contínuos podem ser adaptados, através de pequenas alterações para este processo.

Quanto as temperaturas de trabalho para este processo são as usuais aos outros processos de cementação, sendo bastante utilizadas temperaturas em torno de 920°C ;

Duas técnicas de trabalho com este método de cementação podem ser utilizadas, diferenciadas pela relação de líquido carregador para líquido cementante na mistura:

- líquidos com proporção constante
- líquidos com proporção variável;

4.1. Líquidos com proporção constante

Neste caso a mistura já preparada e com uma relação constante de líquido carregador/líquido cementante, por exemplo 90% de isopropanol e 10% de um solvente alifático é gotejada no forno, sempre nesta proporção.

Este sistema de trabalho adota duas fases para um ciclo total de tratamento:

a) um período inicial, chamado de cementação, onde o líquido é gotejado no forno, com uma vazão constante e máxima durante o ciclo. - Neste período estabelece-se a saturação em carbono da camada superficial.

b) um período final, de difusão, onde a vazão do líquido é pequena, ou mesmo nula. Com este artifício, tem-se uma diminuição do teor de carbono superficial, cuja tendência, com o tempo, é de difundir-se para o interior do material, aumentando assim a camada efetiva.

4.2. Líquidos com proporção variável

Neste segundo caso, os dois líquidos são introduzidos no forno, simultânea mas separadamente, durante todo o período do tratamento. - Assim, a proporção de carregador/cementante pode ser ajustada durante todo o processo, em função do controle da demanda instantânea de carbono, - através do ponto de orvalho ou do teor de CO_2 . Normalmente a vazão do líquido carregador é constante, variando-se sómente a do líquido cementante.

4.3. Controle do processo

O método dos líquidos em proporção constante não permite um controle muito apurado, apresentando entretanto resultados satisfatórios quando se trabalham com cargas mais ou menos fixas, necessitando, para cada lote, um certo número de cargas experimentais, para definir as variáveis do processo, quais sejam: tempo de cementação, tempo de difusão, vazão do fluido à ser pingado.

Uma vez definidas estas grandezas, os resultados tem se mostra

do reprodutíveis.

Já o processo dos líquidos em proporção variável permite um melhor controle de todo o ciclo, sendo as possibilidades de controle as mesmas do processo de cementação tradicional com endogás.

4.4. Casos práticos

A cementação de engrenagens com $\phi_e = 188$ mm de aço 20 Mn Cr5 - para uma profundidade de cementação de 1 mm (550 Hv) e um teor superficial de carbono em torno de 0,8%, foi feita pelo método do gotejamento em suas duas versões (exemplos a e b) e, comparativamente, com endogás (exemplo c). A temperatura utilizada foi de 920°C e o forno o de tipo poço aquecido elétricamente (100Kw).

Exemplo a- cementação por gotejamento utilizando uma mistura - cementante de Isopropanol + 10% solvelte alifático (a)

Tempo de cementação = 1h 45min.

Tempo de difusão = 1h 45min.

(a) com as seguintes características:- Densidade, a 20/40°C = 0,765

- Intervalo de destilação (°C) : 148 - 205

- Ponto de Fulgor (°C) - 39

- Aromáticos (%) = 15

Exemplo b - cementação por gotejamento utilizando metanol como gás de base e acetato de etila como gás cementante.

Tempo de cementação = 4h 25 min.

Exemplo c - cementação à gás, com endogás e adição de propano

Tempo de cementação = 5h 15 min.

Como vimos, a cementação por gotejamento permite tempos mais - curtos de cementação que o processo convencional com endogás e propano. A figura 3 complementa estas observações.

O processo de cementação por gotejamento, além de ser uma alternativa válida quando a obtenção de propano ou gás natural é problemática, é também um processo interessante do ponto de vista energético, pois os tempos de tratamento são menores e não há necessidade de gerador de gás.

Tabela I - Características de decomposição e de cementação de alguns compostos utilizados na cementação por gotejamento

compostos	reações (a)	equivalente em Carbono (g) (b)	C/H (c)
metanol	$\text{CH}_3\text{OH} \quad \text{CO} + 2\text{H}_2$	-	0,25
Etanol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \quad (\text{C}) + 3\text{H}_2 + \text{CO}$	46	0,33
Isopropanol	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH} \quad 2(\text{C}) + 4\text{H}_2 + \text{CO}$	30	0,37
Acetona	$\text{CH}_3\text{COCH}_3 \quad 2(\text{C}) + 3\text{H}_2 + \text{CO}$	29	0,50
Acetato de etila	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 \quad 2(\text{C}) + 2\text{CO} + 3\text{H}_2$	44	0,50
Acetato de metila	$\text{CH}_3\text{COOCH}_3 \quad (\text{C}) + 2\text{CO} + 3\text{H}_2$	74	0,50

(a) As reações indicadas devem ser interpretadas como a soma das reações de decomposição e de cementação. supõe-se reações ideais, ou seja, que não haja formação de CO_2 , H_2O ou CH_4 , sendo os produtos das reações CO , H_2 e (C) Carbono livre.

(b) Equivalente em Carbono:- expressa a quantidade em gramas do composto necessário para a formação de um átomo grama de Carbono

(c) A relação C/H da fórmula molecular do composto é considerada um índice da capacidade de cementação do gás gerado. Desta forma compostos cuja relação C/H são inferiores a 0,33 são apropriados para geração de gás carregador e/ou protetor.

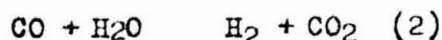
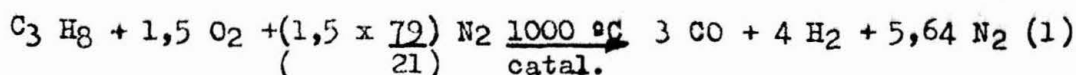
5. Cementação à gás Endotérmico

5.1. Geração de atmosfera

Para se obter o gás endotérmico faz-se passar através de uma retorta aquecida externamente (aproximadamente 1000°C) uma mistura prévia de ar e propano na proporção de aproximadamente 7 : 1.

Dentro dessa retorta existe um catalizador a base de Níquel (briquetes de material refratário embebidos numa solução de um sal de Níquel). A função do níquel como catalizador é fazer com que na reação de Combustão parcial da mistura ar + propano, esta se desloque no sentido de se obter CO e não CO₂. (fig. 4).

Reação que ocorrem:



Após a saída da retorta o gás é esfriado bruscamente abaixo de 400 °C para estabilização do CO (Boudouard $2 CO \rightleftharpoons C + CO_2$ (3))

O controle dessa atmosfera gerada pode ser feita através da % CO₂ ou do ponto de orvalho (reação 2)

A composição teorica do gás endotérmico a partir de propano é a seguinte:

Pela reação I se calcula:

$$CO = \left(\frac{3}{12,64} \times 100 \right) \% \quad 23\%$$

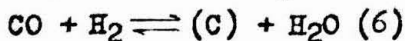
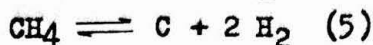
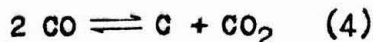
$$H_2 = \left(\frac{4}{12,64} \times 100 \right) \% \quad 31\%$$

$$N_2 = \left(\frac{5,64}{12,64} \times 100 \right) \% \quad 45\%$$

Existem limites para trabalho com o gerador ou seja devemos trabalhar com ponto de orvalho ao redor de 0°C/+ 4 °C. O motivo a que se prende esta faixa é que se o ponto for mais baixo teremos um entupimento da retorta com fuligem; se for mais positivo teremos uma condensação de água na linha o que não deve acontecer.

5.2. Atmosfera Endotérmica utilizada para cementação

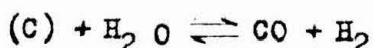
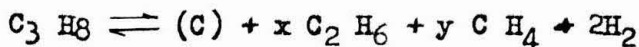
Quando se introduz a atmosfera endotérmica preparada, no forno, varias reações de oferta de carbono ocorrem, ou seja:



Esta última (6) é a mais importante e a que mais carbono pode ofertar à superfície do aço.

Em todos os casos o carbono ofertado pelas reações reagem com o ferro do aço enriquecendo-o.

A reação (6) libera vapor d'água, o que não é benéfico para o processo de cementação e para tanto é necessário que se introduza no forno um hidrocarboneto qualquer, que no nosso caso específico é o propano, que age da seguinte forma:



Para sabermos com que ponto de orvalho devemos trabalhar no forno durante o tratamento de cementação lançamos mão das curvas de equilíbrio (fig. 5).

Nessas curvas, para cada temperatura de trabalho temos o ponto de orvalho para um teor de Carbono de 0,7 a 0,9%, que são os potenciais normais mais para uma boa cementação.

O processo pode se dividir em duas partes ou seja uma de cementação propriamente dita onde utilizamos gás endotérmico e gás de enriquecimento e ficamos somente com o endogás. Essa segunda parte é denominada de difusão.

Para que se tenha uma boa condução de cementação é necessário - uma boa movimentação do gás cementante no interior do forno. Isto se consegue por meio de ventiladores adequados que movimentam esse gás.

Durante o processo devemos controlar as quantidades de gas Endotérmico e propano; o ponto de orvalho ou % CO_2 durante todo o processo; a temperatura; o tempo e por fim o resultado final que é a camada obtida.

5.3. Dados práticos

Forno Câmara com o tanque de óleo incorporado:

1) 940°C

ponto de orvalho -8°C/- 10°C

4 horas cementação

1 hora de difusão

Profundidade total da camada 1,1 mm.

2) 1010°C

ponto de orvalho -13°C/- 15°C

13 horas de cementação

2 horas difusão

Profundidade total da camada 3,00 mm

Forno Contínuo

1) 920°C

Ponto de orvalho -5°C

7 Horas de cementação

Profundidade de camada 1 mm

2) 920°C

Ponto de orvalho -5°C

12 horas de cementação

Profundidade de camada 1,5 mm

5.4. Vantagens e desvantagens

a) vantagens

1) A mistura gasosa é bem definida, e controlável durante todo o processo de cementação

2) Constitue-se num processo sem poluição ambiental

3) possui uma velocidade de cementação, bastante satisfatória

4) permite têmpera direta evitando-se dessa maneira qualquer oxidação posterior a cementação.

5) A camada cementada apresenta espessura e teor de carbono - mais uniforme

b) Desvantagens

- 1) Necessita de pessoal de operação mais qualificado
- 2) Como os componentes gasosos da mistura são combustíveis, e portanto explosivos em certas condições, torn -se necessário cuidados especiais no manuseio das mesmas.

6. Conclusão

Muito embora, para melhor compreensão didática se faça uma divisão em cementação sólida e gasosa, vimos pelo exposto neste trabalho que os dois processos se fundamentam na oferta de carbono para a superfície do aço na reação $2\text{CO} \rightleftharpoons (\text{C}) + \text{CO}_2$ em fase gasosa.

A diferença se faz sentir que na cementação gasosa temos ainda a presença de Hidrogênio, que funciona como um ativador para se obter velocidades de cementação mais elevadas.

Os casos apresentados são reais, do dia a dia do homem que trabalha na indústria, no ramo de tratamentos térmicos, bem como as vantagens e desvantagens apresentadas de cada processo são frutos da experiência diária.

7. Bibliografia

1. Metals Handbook vol 2 - 8ª ed. - American Society for Metals
2. Collin, R.; Gunnarson, S.; Thulin, D.; - Influence of reaction rate on gas carburizing of steel in a $\text{CO-H}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O-CH}_4\text{-N}_2$ atmosphere.
3. Collin, R.; Gunnarson, S.; Thulin, D.; A Mathematical model for predictive Carbon concentration profiles of a gas carburized steel.
4. Chiaverini, V. Aços e ferros fundidos.
5. Durferrit - Kohlunngs Granulat
6. Goerig C. - Einsatzhartepulver
7. Barreiro, J.A. - Tratamentos térmicos de los Aceros
8. Lajtin, Y.M. - Metalografia y tratamientos térmicos de los **metales**
9. Wyss, U. - Principe de la cementation gazeuse et du recuit en atmosphère protectrice selon en nouveau procédé par instillation. Revue de Métallurgie - Junho 1963
10. Wyss, U. - Drip feed carburizing - Metal Progress- Novembro 1978
11. Bourdil, Cadilhac e outros - Traitment thermique des aciers sous atmosphere. Traitment thermique. Inicio da publicação- Janeiro de 1976.

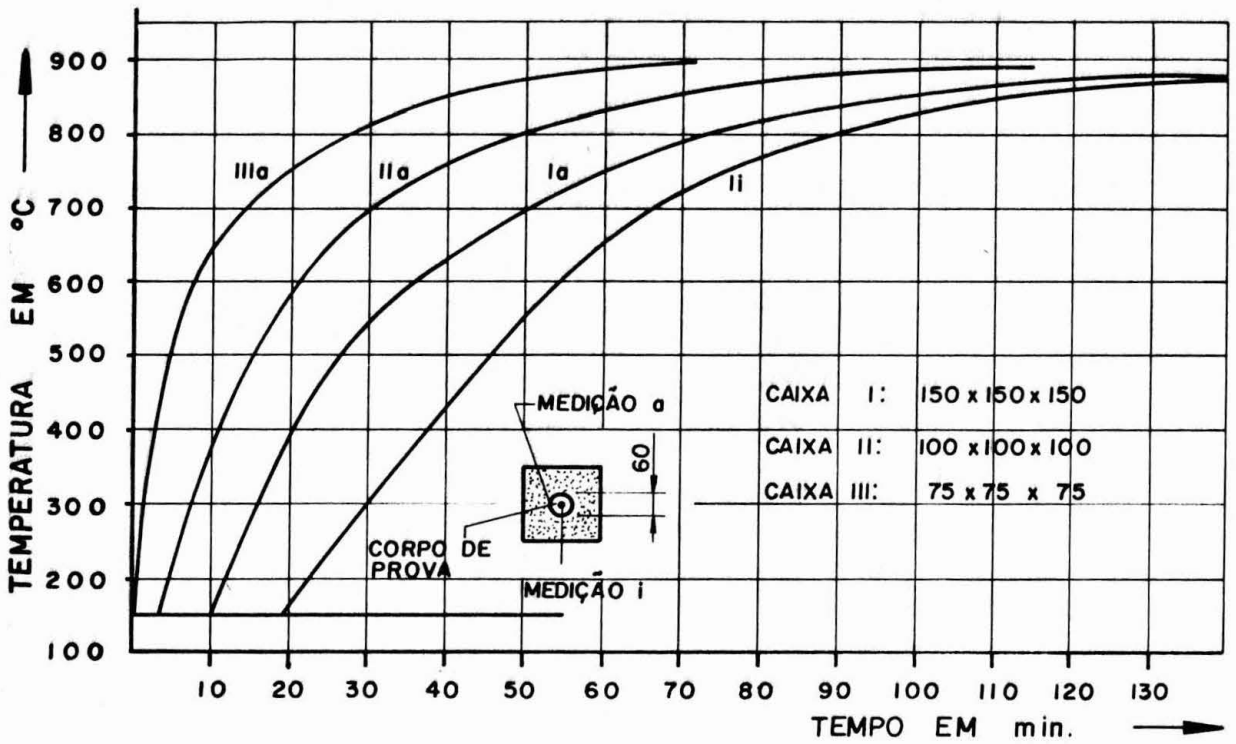
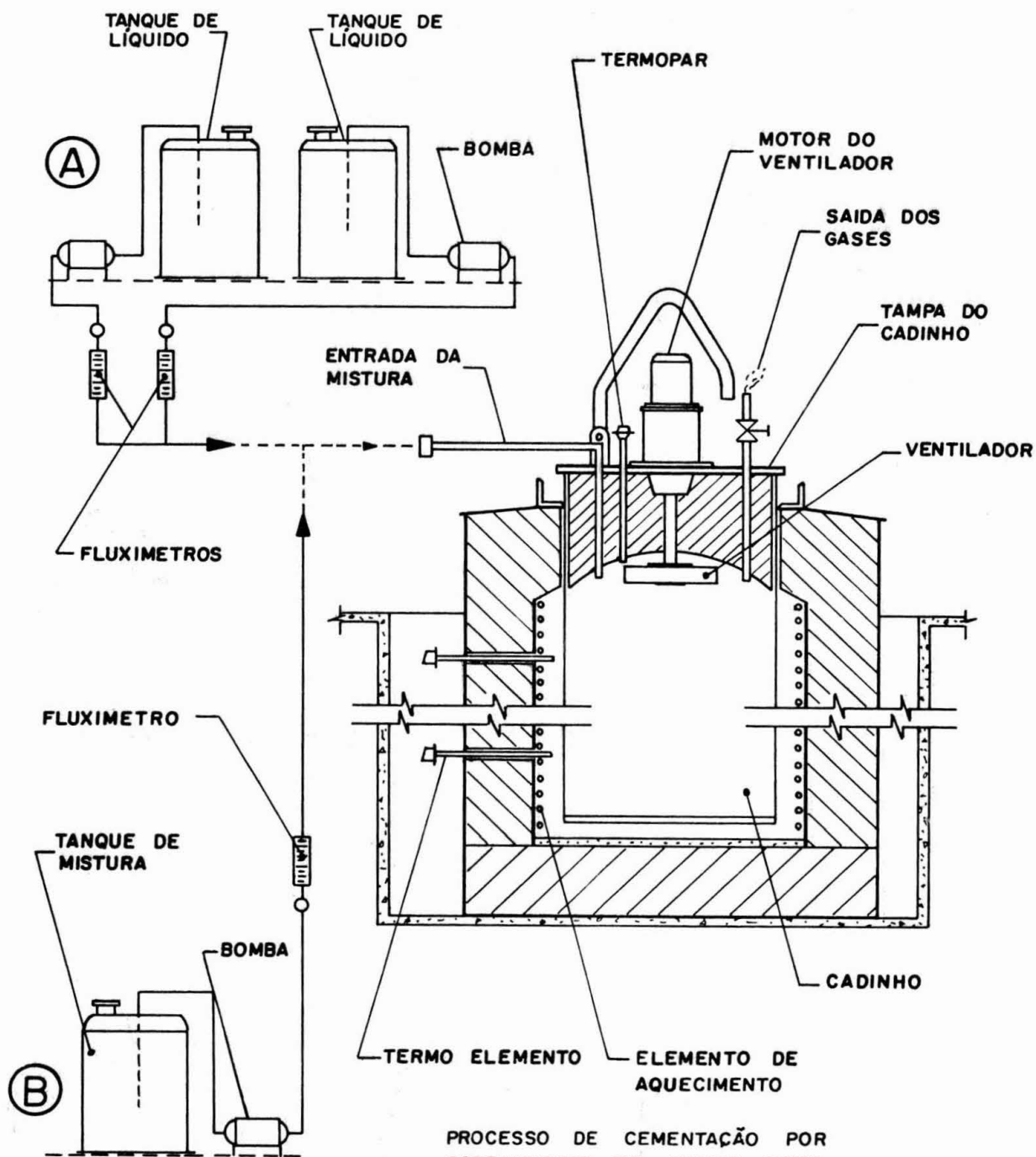


FIGURA 1 - AQUECIMENTO DA CAIXA DE CEMENTAÇÃO .

(A) PROCESSO DE CEMENTAÇÃO POR GOTEJAMENTO EM FORNO POÇO PELA TÉCNICA DE GOTEJAMENTO SEPARADO DE 2 LÍQUIDOS .



(B) PROCESSO DE CEMENTAÇÃO POR GOTEJAMENTO EM FORNO POÇO PELA TÉCNICA DE GOTEJAMENTO DE UMA MISTURA CONSTANTE DE LÍQUIDOS .

FIGURA 2 - PROCESSO DE CEMENTAÇÃO POR GOTEJAMENTO .

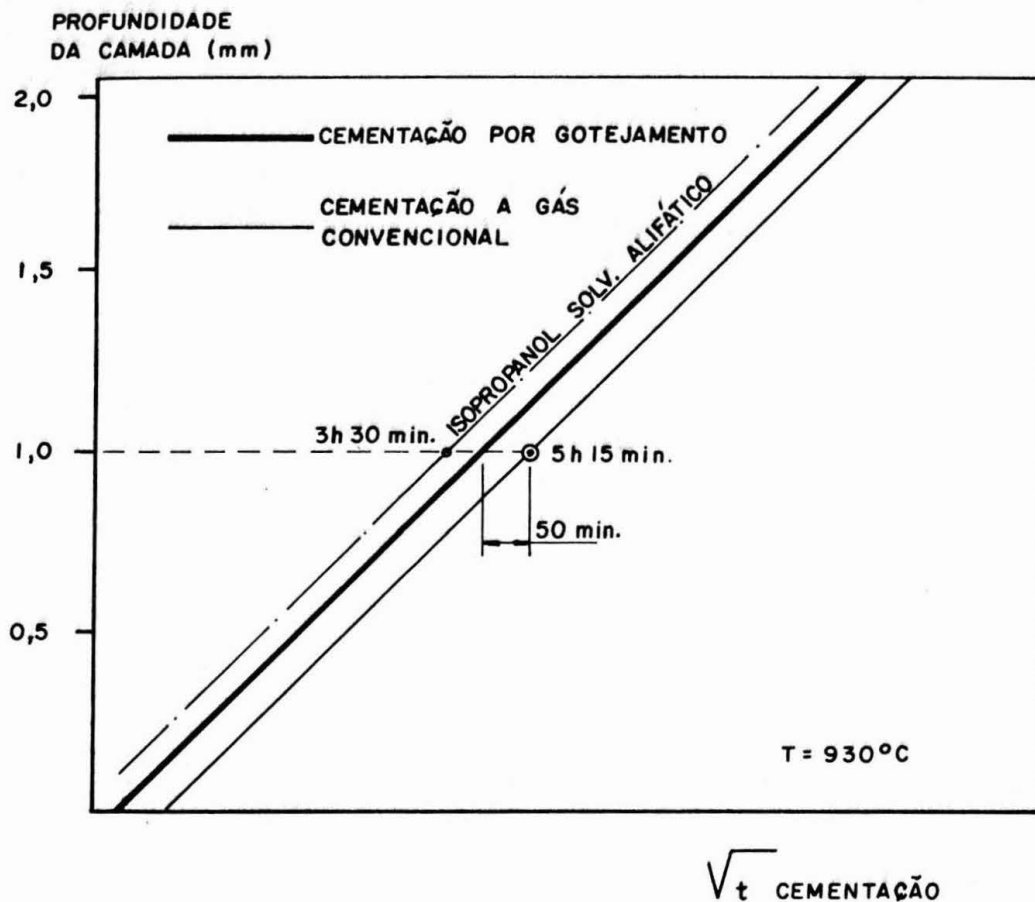


FIGURA 3 - TEMPOS DE CEMENTAÇÃO PARA O PROCESSO POR GOTEJAMENTO E PARA O PROCESSO CONVENCIONAL COM ENDOGÁS E PROPANO.

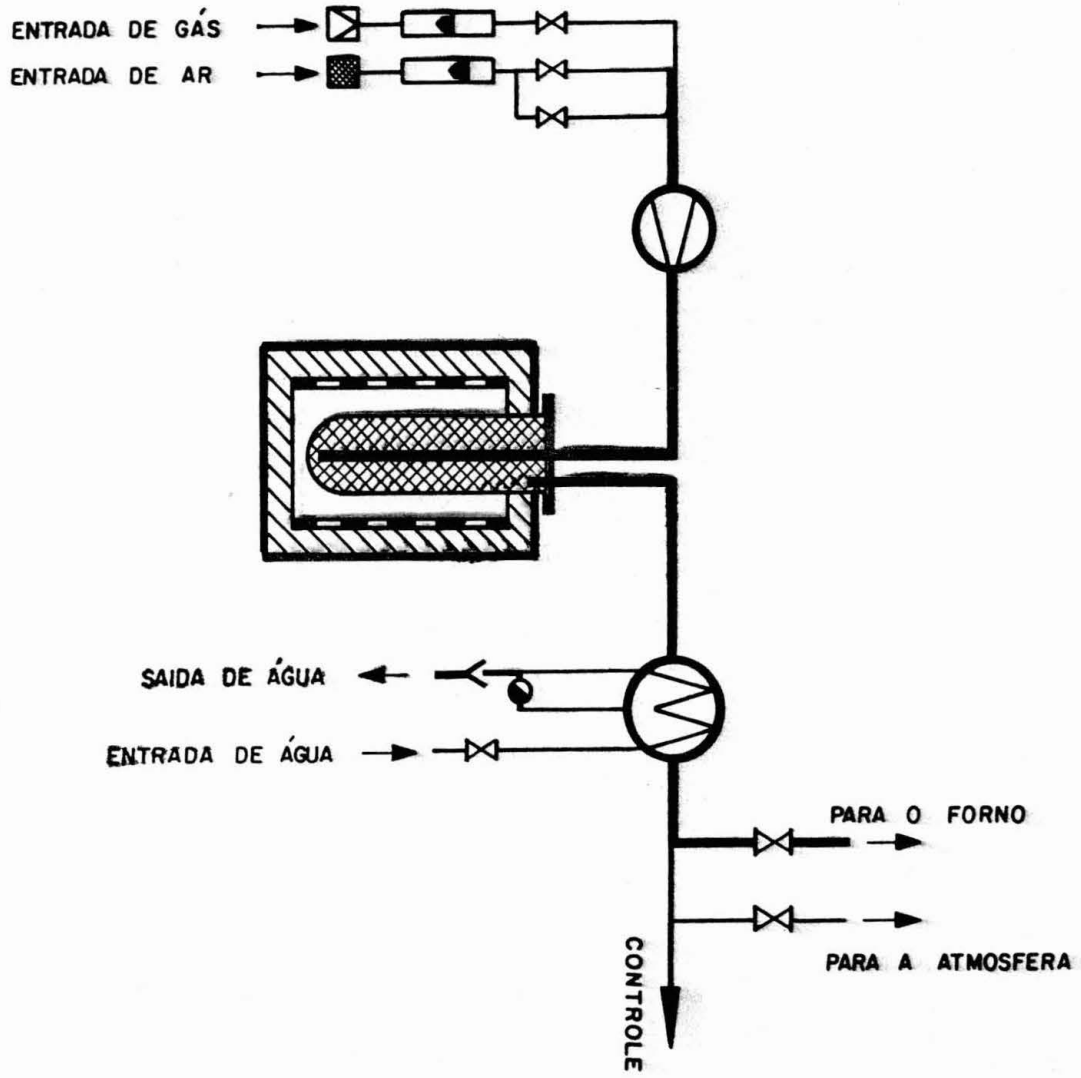


FIGURA 4 - ESQUEMA DO GERADOR ENDOTÉRMICO .

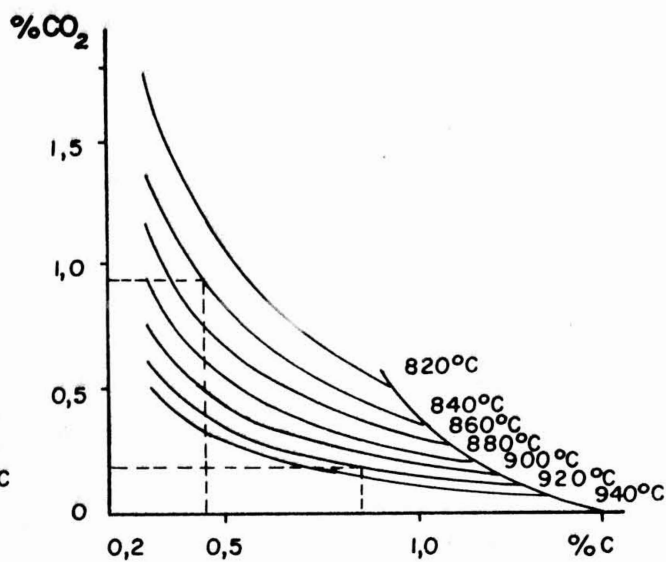
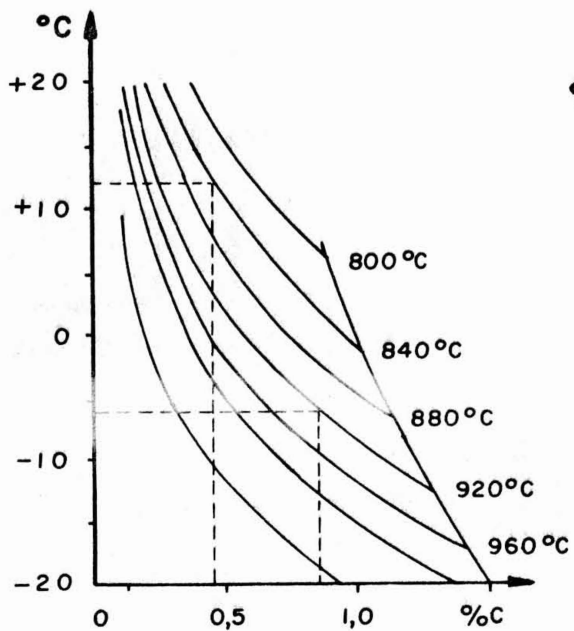


FIGURA 5 - PONTO DE ORVALHO
X %C NO AÇO .

% CO₂ X %C NO AÇO .