

Tratamientos Termoquímicos

Profa.Dra. Lauralice Canale

Tratamentos Termoquímicos

- Os tratamentos termoquímicos promovem um endurecimento superficial pela modificação da composição química e microestrutura em regiões superficiais.
- Seu objetivo é o aumento de dureza e resistência ao desgaste de uma camada superficial, mantendo-se a microestrutura do núcleo dúctil e tenaz.
- Os tratamentos termoquímicos mais importantes industrialmente são:
 - ✓ Cementação
 - ✓ Nitretação
 - ✓ Carbonitretação
 - ✓ Cianetação
 - ✓ Boretção

ACC1

NITRETAÇÃO

CIANETAÇÃO

CARBONITRE-
TAÇÃO

CEMENTAÇÃO

BORETAÇÃO

ADIÇÃO DE C

ADIÇÃO DE N

ADIÇÃO DE
C E N

ADIÇÃO DE
C E N

ADIÇÃO DE B

Sólida
Líquida
Gasosa
Plasma

Líquida
Gasosa
Plasma

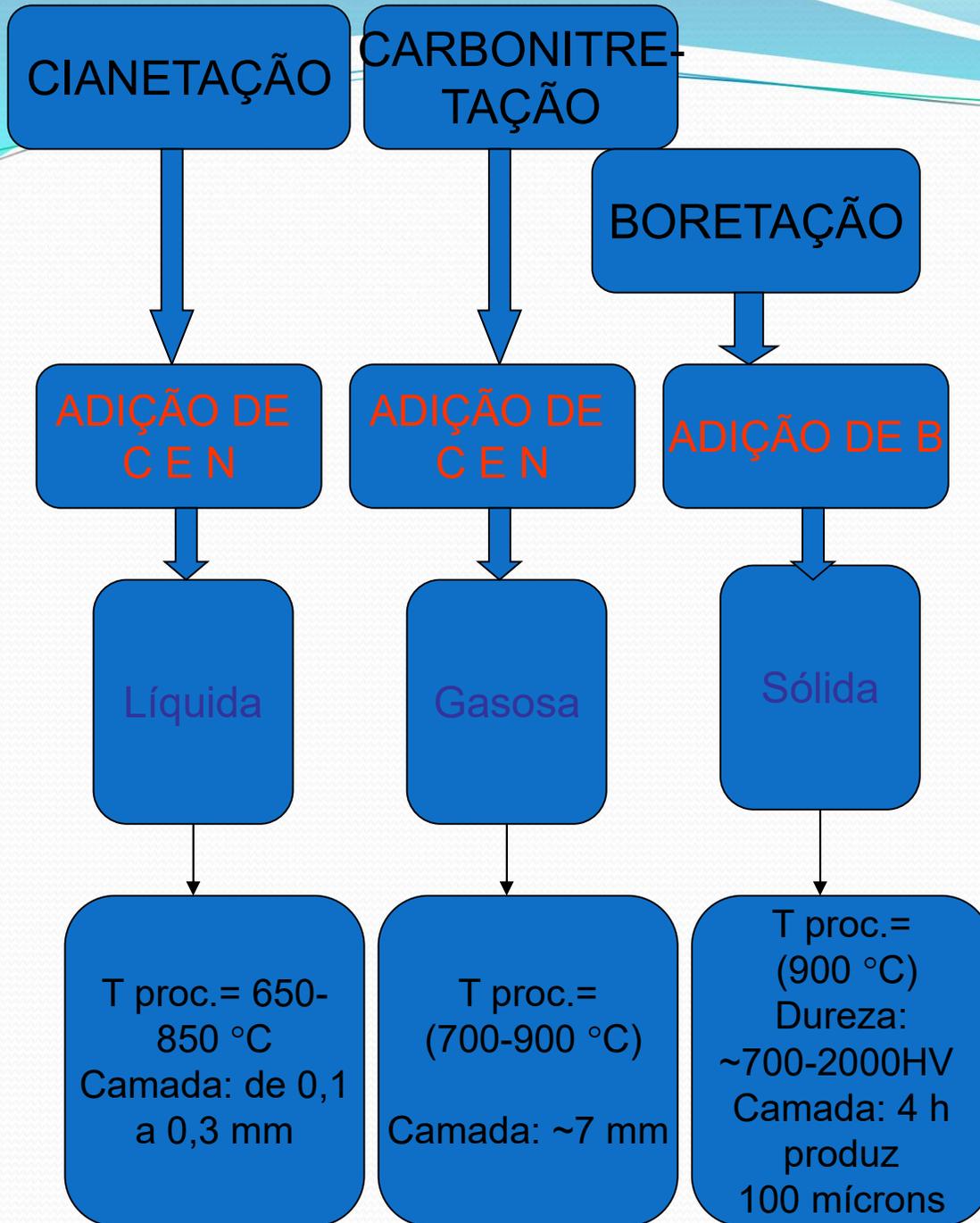
Líquida

Gasosa

Sólida

T proc.= acima
da temp. crítica
(850-950 °C
ou mais)
Dureza: ~65H_{RC}
Camada: até
10 mm

T proc.= abaixo
da temp. crítica
(500-600°C)
Dureza: ~1000-
1100HV
Camada: até
1 mm



Tratamentos Termoquímicos

- Coeficiente de Difusão

$$D = D_0 \exp \left(- \frac{Q_d}{RT} \right)$$

D - coeficiente de difusão

D_o - constante característica

Q_d - energia de ativação para a difusão

R - constante dos gases = 1,987 cal/mol.K

- ↑ T → melhora a difusão

DIFUSÃO

- Máxima Solubilidade na Austenita



N	→	2,8% a 650°C
C	→	2,11% a 1148°C
B	→	0,1% a 1149°C

Por meio das Leis de Difusão obtêm-se uma equação que descreve o perfil de distribuição do soluto em uma matriz qualquer.

Processo de Difusão

- 2ª Lei de Fick

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

- Coeficiente de Difusão

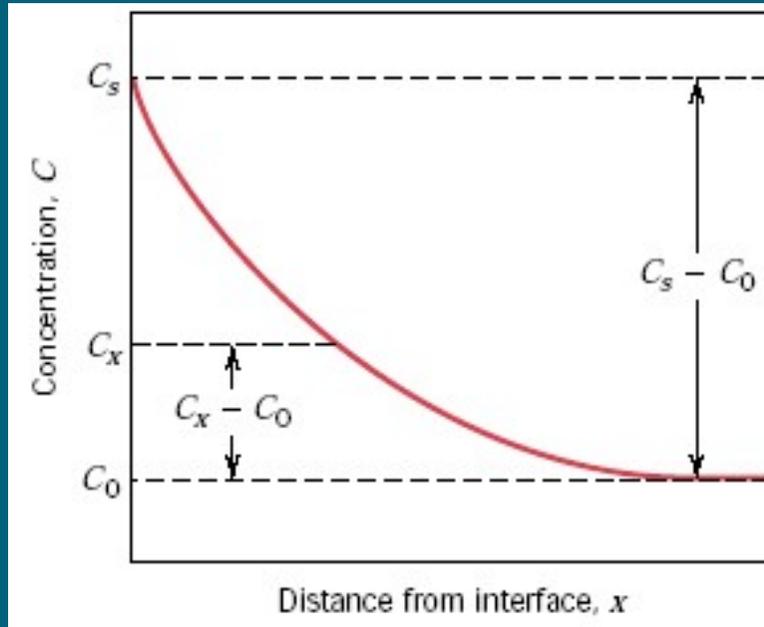
$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

UMA solução da segunda lei

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

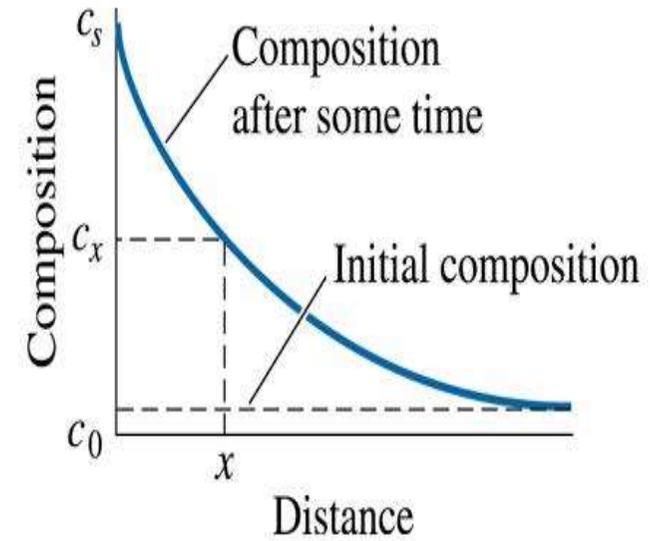
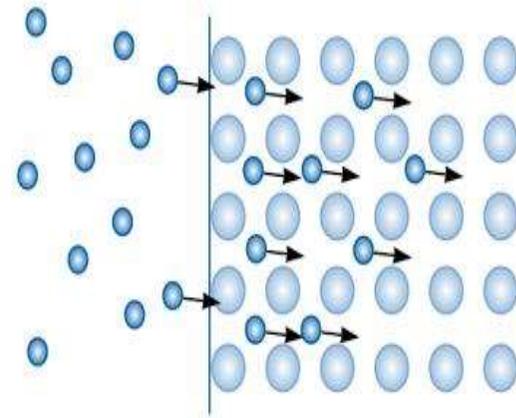
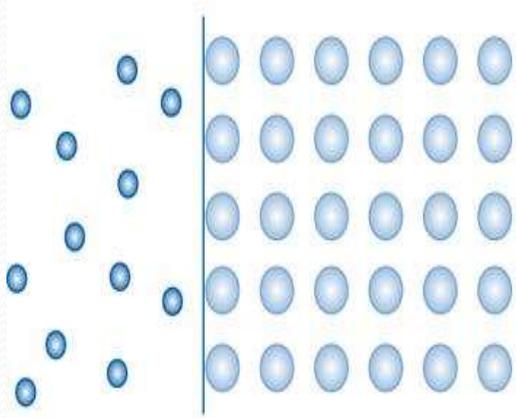
- Sólido semi-infinito de superfície plana
- $C = C_0$ para qualquer x quando $t = 0$
- Para $t > 0$, $C = C_s$ para $x = 0$ e $C = C_0$ para $x = \text{infinito}$

UMA solução da segunda lei



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

Função erro de Gauss



Diffusion of atoms into the surface of a material illustrating the use of Fick's second law

Equações utilizadas no cálculo do tempo de cementação

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

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

$D_0 = 0.23 \text{ cm}^2/\text{s}$ $Q = 32.90 \text{ cal/mol}$

$R = 1.987 \text{ Kcal/mol}$

T (graus K)

Função erro

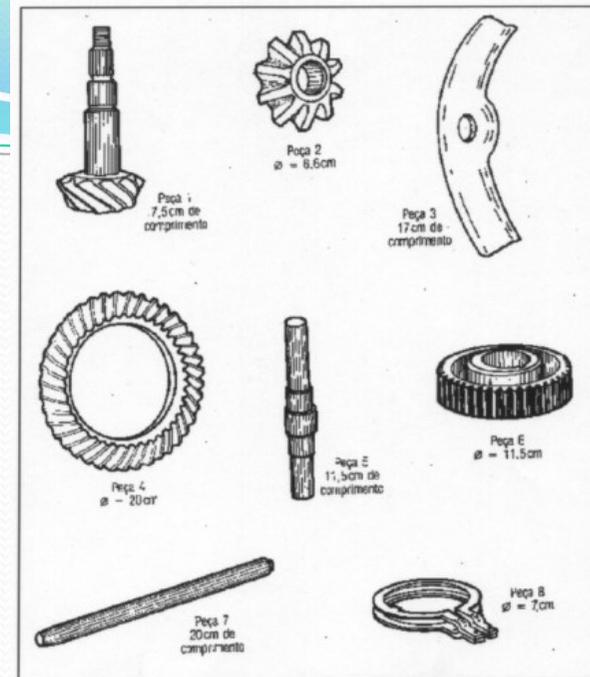
TABLE 5-3 ■ *Error function values for Fick's second law*

Argument of the error function $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	Value of the error function $\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$
0	0
0.10	0.1125
0.20	0.2227
0.30	0.3286
0.40	0.4284
0.50	0.5205
0.60	0.6039
0.70	0.6778
0.80	0.7421
0.90	0.7970
1.00	0.8427
1.50	0.9661
2.00	0.9953

Note that error function values are available on many software packages found on personal computers.

Cementação

- Consiste na difusão de carbono para a superfície do componente, aquecido em temperaturas suficientes para produzir a microestrutura austenítica. A austenita é posteriormente convertida em martensita por meio de têmpera e subsequente revenimento.
- A cementação é realizada somente em aços ao carbono e aços baixa-liga com teores de carbono inferiores a 0,25%.
- O conteúdo na superfície fica próximo do eutetóide (0,8%C)

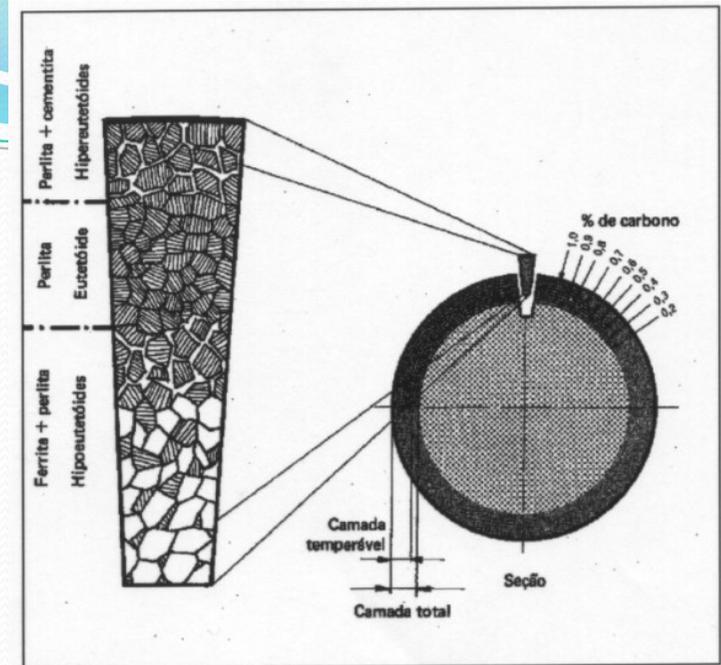


PEÇAS CEMENTADAS

Cementação

A profundidade da camada cementada depende:

- Do tempo
- Da temperatura
- Da concentração de carbono inicial no aço (Quanto menor o teor de carbono mais fácil a cementação)
- Natureza do gás de carbonetação ou do agente carbonetante
- Velocidade do fluxo do gás (se for o caso)



CAMADA CEMENTADA

Cementação

A cementação pode ser realizada por quatro processos

- Por via gasosa
- Por via líquida
- Por via sólida
- Por plasma

Cementação por Via Gasosa

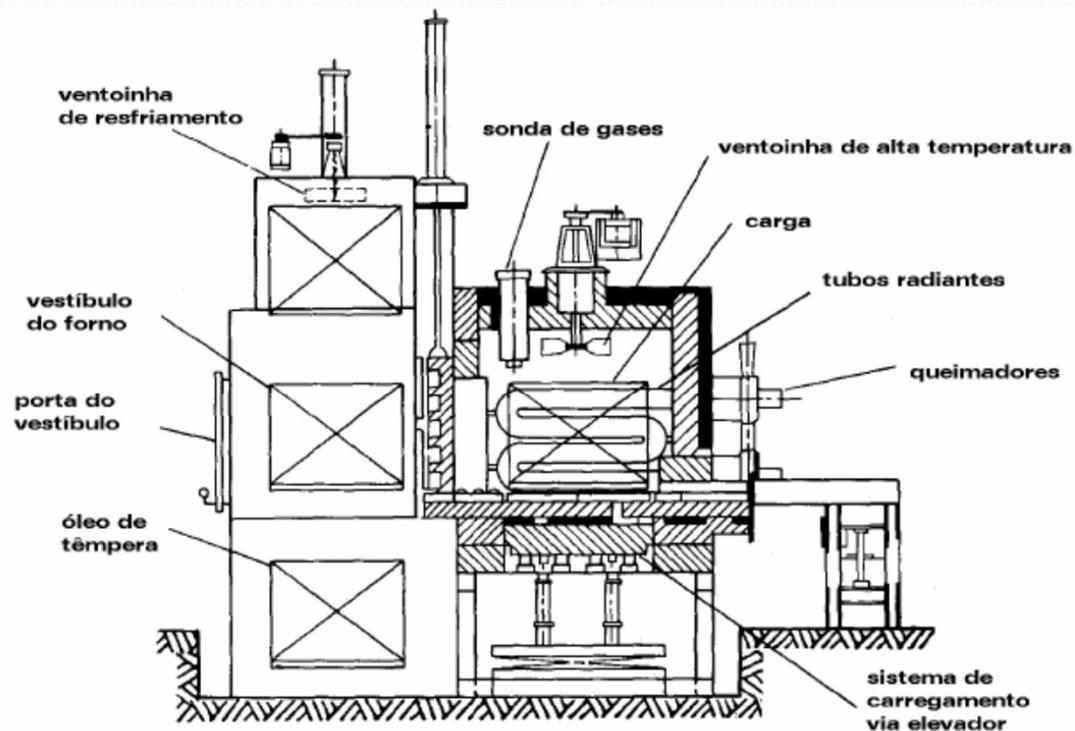
- É o mais importante processo de cementação industrial.
- O aporte de carbono é fornecido pela atmosfera gasosa do forno, que inclui hidrocarbonetos, como o metano, propano e butano ou hidrocarbonetos líquidos vaporizados.
- A atividade de carbono é controlada de modo a produzir camadas superficiais com teores de carbono entre 0,8 e 1,0% de C

Cementação por Via Gasosa

- As variáveis mais importantes do processo são a temperatura, o tempo e a composição da atmosfera.
- Outras variáveis incluem o grau de circulação da atmosfera no interior do forno e o teor de elementos de liga presentes no aço.

Cementação por via Gasosa

- A temperatura e a mistura carbonetante necessitam rígido controle durante o processo
- As instalações são complexas e dispendiosas
- As reações são complexas.



Cementação por via líquida

- As camadas cementadas pelo meio líquido são similares às obtidas com o meio gasoso, entretanto, os ciclos são mais curtos devido ao período de aquecimento ser mais rápido. Os banhos de sal apresentam coeficientes de transferência de calor muito elevados por apresentarem, simultaneamente, condução, convecção e radiação e são divididos em duas categorias:

Cementação por via líquida

- **Banhos de baixa temperatura** – operam em temperaturas entre 845 e 900°C e são indicados para camadas com profundidades entre 0,13 a 0,25 mm.
- **Banhos de alta temperatura** - operam em temperaturas entre 900°C e 955°C. São indicados para profundidades de camada entre 0,5 mm e 3,0 mm, entretanto, sua principal característica é o rápido desenvolvimento de camadas entre 1 e 2 mm

Cementação por via líquida - banhos

Composição dos banhos empregados em cementação líquida:

Constituinte	Composição dos banhos [%]	
	Banhos de baixa temperatura (entre 845°C e 900°C)	Banhos de alta temperatura (entre 900°C e 955°C)
Cianeto de sódio (NaCN)	10 a 23	6 a 16
Cloreto de bário (BaCl)	-	30 -55
Outros sais alcalinos terrosos (Cloretos de cálcio e estrôncio)	0 a 10	0 a 10
Cloreto de potássio (KCl)	0 a 25	0 a 20
Cloreto de sódio (NaCl)	20 a 40	0 a 20
Carbonato de sódio (NaCO ₃)	30 máx.	30 máx.
Aceleradores que não contenham metais alcalinos terrosos (dióxido de manganês, óxido de boro fluoreto de sódio e pirofosfato de sódio)	0 a 5	0 a 2
Cianato de sódio	1,0 máx.	0,5 máx.
Densidade do sal fundido	1,76 g/cm ³ a 900°C	2,0 g/cm ³ a 925°C

Cementação por via sólida

- Neste processo, as peças de aço são colocadas em caixas metálicas (aço-liga resistente ao calor), ficando separadas umas das outras pelo cementante.
- As misturas cementantes ou preparados para cementação são compostos por: carvão vegetal e carbonatos como substâncias ativadoras (carbonato de bário, carbonato de cálcio, carbonato de potássio e carbonato de sódio).
- Temperaturas do processo entre 850 e 950°C

Cementação por via sólida

- Mecanismo da cementação sólida

1) $C + O_2 \rightleftharpoons CO_2$ (850-950 °C) O Carbono combina com o oxigênio do ar.

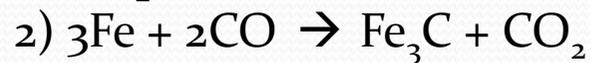
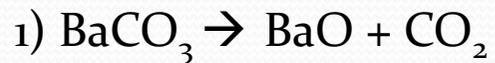
2) $CO_2 + C \rightleftharpoons 2CO$ O CO_2 reage com o carvão incandescente.

3) $3Fe + 2CO \rightleftharpoons Fe_3C + CO_2$

4) O CO_2 reage com o carvão incandescente e assim por diante.

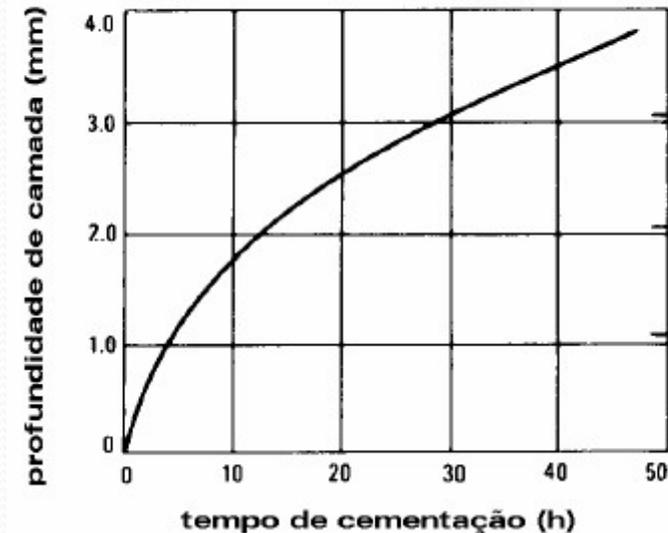
Cementação por via sólida - considerações

- O carbonato de bário é o principal ativador contribuindo para formação de CO



- A temperatura de operação é na faixa de 815° C a 925°C
- A profundidade da camada é dependente do tempo de cementação

Efeito do tempo na profundidade de camada cementada (cementação sólida) a 925°C



Cementação por plasma

- O plasma é criado por ionização do gás (metano) a baixa pressão. O carbono iônico é transferido para a superfície da peça.
- As vantagens da cementação por plasma são:
 - Tempos de processo menores (~30 % do à gás)
 - A peça não sofre oxidação, já que o processo é feito sob vácuo
 - Fácil automatização
 - Produz peças de alta qualidade.

Tratamentos Térmicos após Cementação

- O Tratamento Térmico para endurecimento deve levar em conta o aço e as especificações da peça.
- ✓ Não esquecer que a peça tem duas composições distintas: um núcleo com baixo teor de Carbono ($<0,8$) e uma superfície com teor de carbono acima do eutetóide ($>0,8$).

Tratamentos Térmicos após Cementação

Portanto, tem 2 temperaturas críticas:

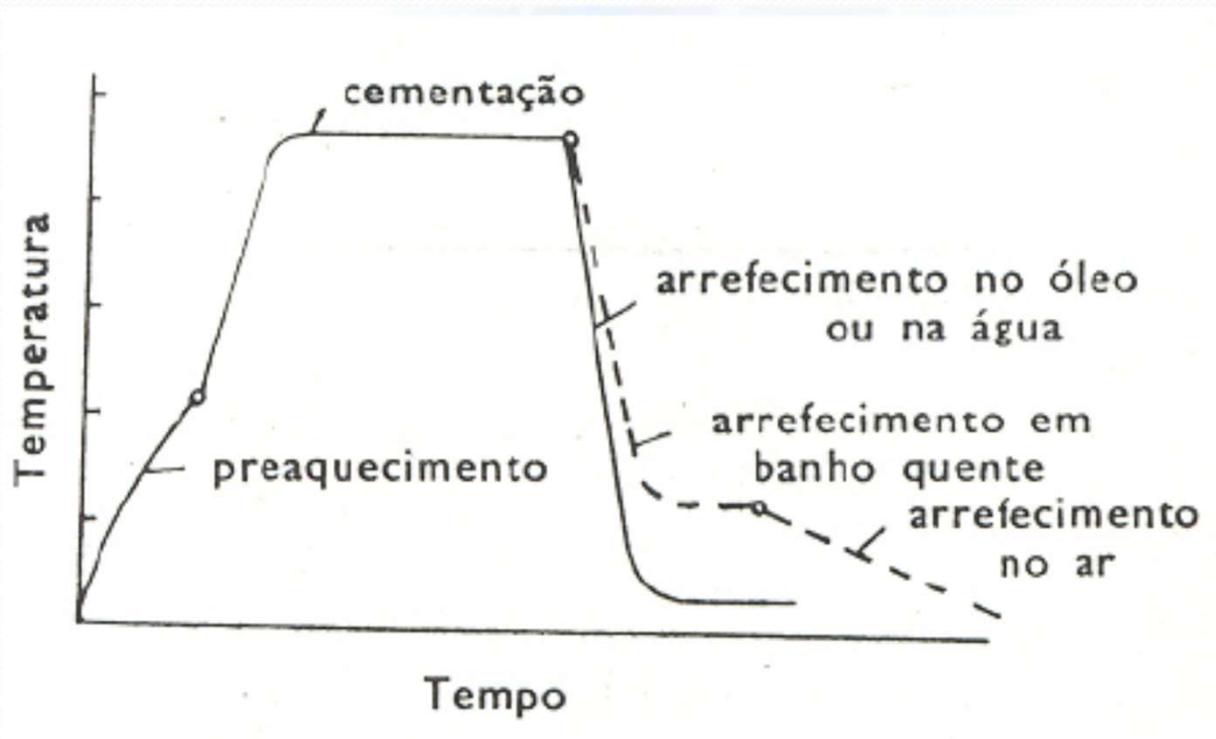
A₁ (camada cementada)

e

A₃ (núcleo da peça).

Têmpera direta simples

- Resfriamento lento da cementação e têmpera convencional entre 750 e 850°C

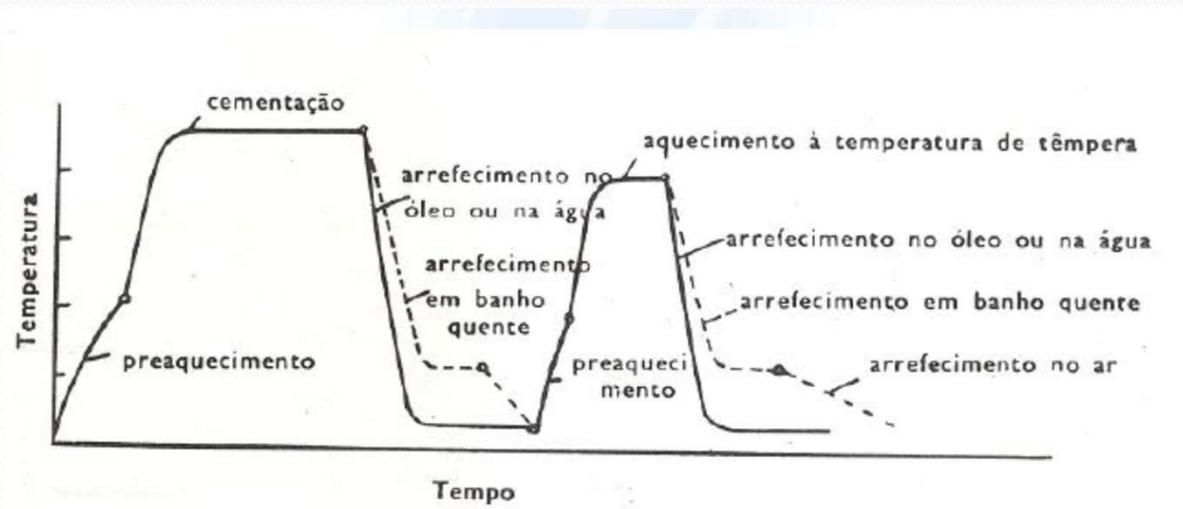


Têmpera direta simples - Considerações

- É o procedimento de têmpera após cementação mais empregado.
- A temperatura de austenitização para a têmpera fica entre 750 e 850°C e produz uma microestrutura de martensita na superfície ($0,8\%C$) e martensita e ferrita no núcleo ($0,2\%C$).
- Pode reter austenita na camada cementada facilitando a fragilização da peça e comprometendo a dureza

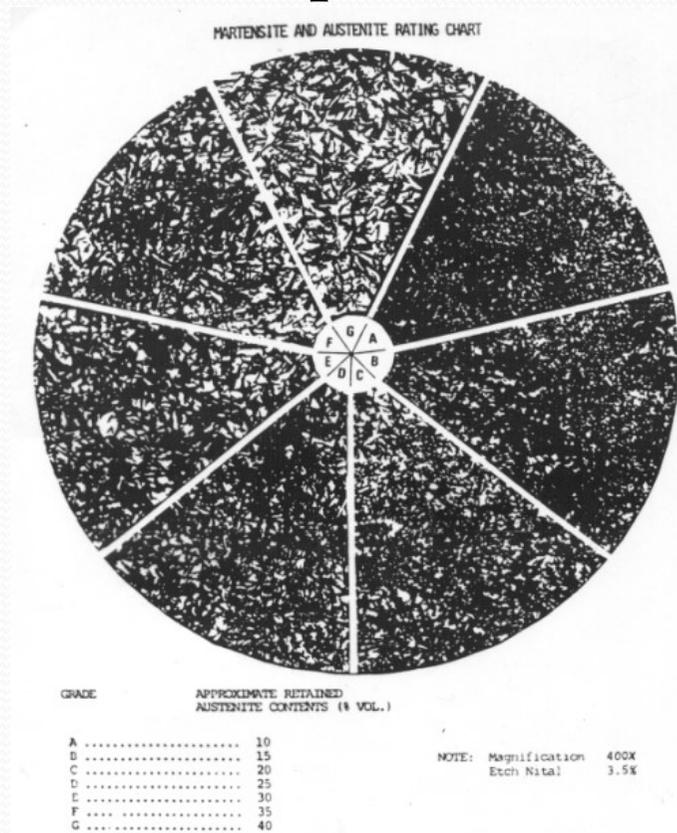
Têmpera direta dupla

- É uma segunda têmpera, realizada depois da direta. Parte de uma temperatura logo acima da linha A_1
- As vantagens são :
 - ✓ reduz a retenção da austenita e diminui a dureza do núcleo
 - ✓ elimina a fragilização da peça
 - ✓ produz granulação + fina



Cementação – Austenita Retida

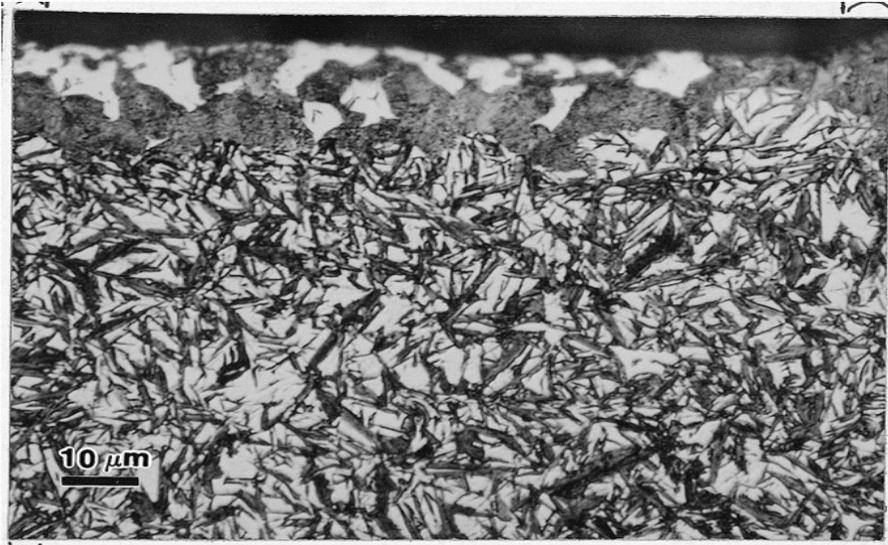
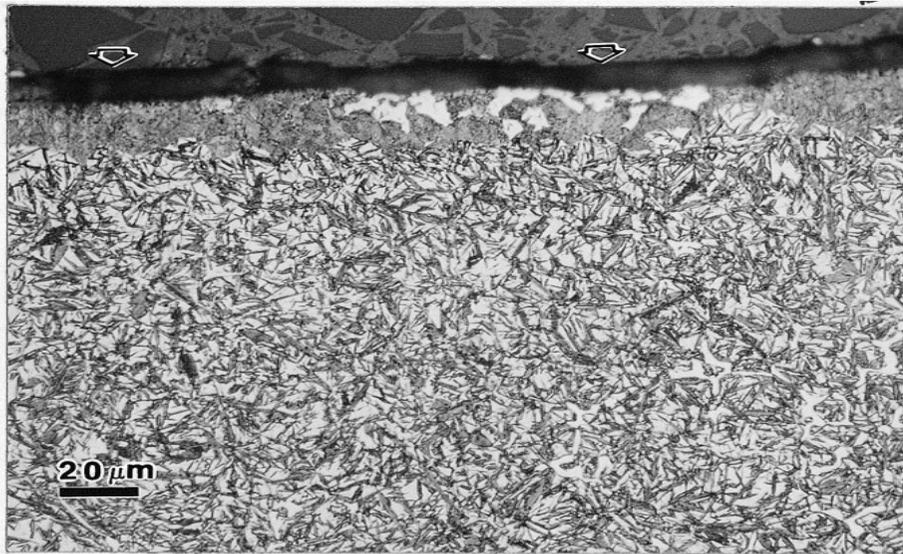
- Com a adição de carbono à superfície a região fica suscetível à formação de austenita retida. O grau de austenita retida pode ser verificado microscopicamente e comparado à figura ao lado

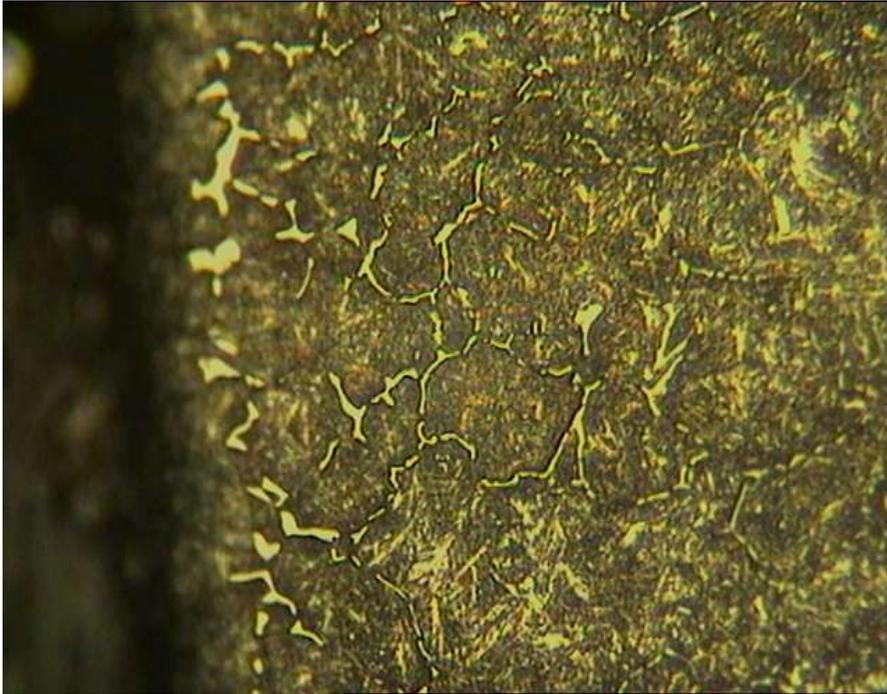


Cementação - Defeitos

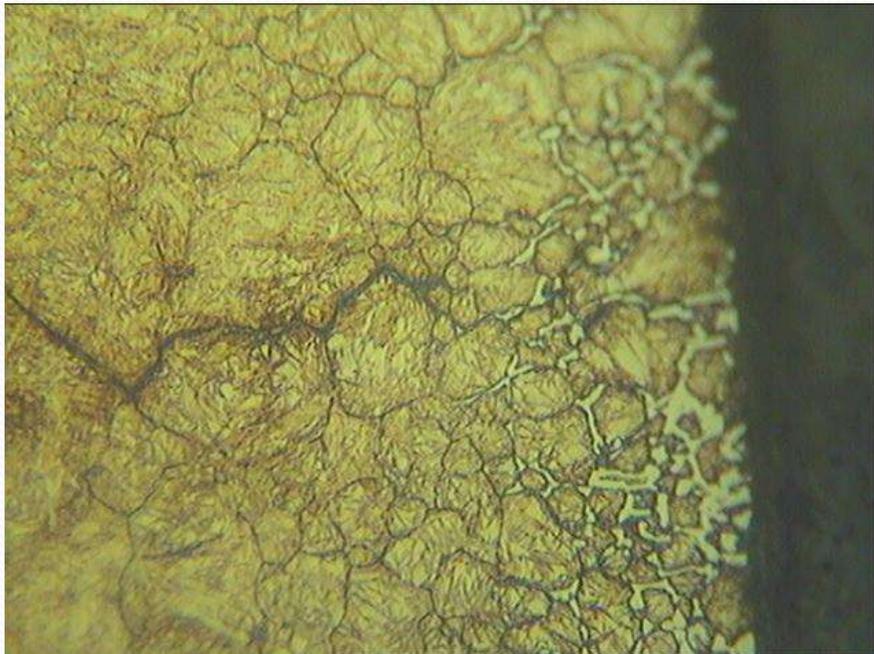
- Destacamento da camada: difusão C
 - ✓ Temperatura
 - ✓ Elemento de liga: Mn
- Fragilidade da superfície: Fe_3C
- Pontos Moles: óxidos
- Oxidação intergranular: processo
- Defeitos têmpera: trincas/distorção
- Proteção de zonas que não se deseja endurecer

Fig. 5A is the surface of the poorly carburized 8620 mold (images sent before) showing decarburization at the surface (note patches of ferrite and pearlite); below this zone is where the grain boundary carbides are seen, mag. Bar is 20 μm (500x);





**Carbide network
material - 20
MnCr5
processed in a
pit type gas
carburizing
furnace .
Etchant - picral
Case depth 1.2
mm**



**Etchant Nital
Mag 200x
Martensite
matrix with
coarse carbide
network at skin.
Quench crack
seen along the
grain boundary**



Unetched
Mag. 200 X

Grain boundary
oxidation to a depth of
30 microns

Material 20 MnCr5