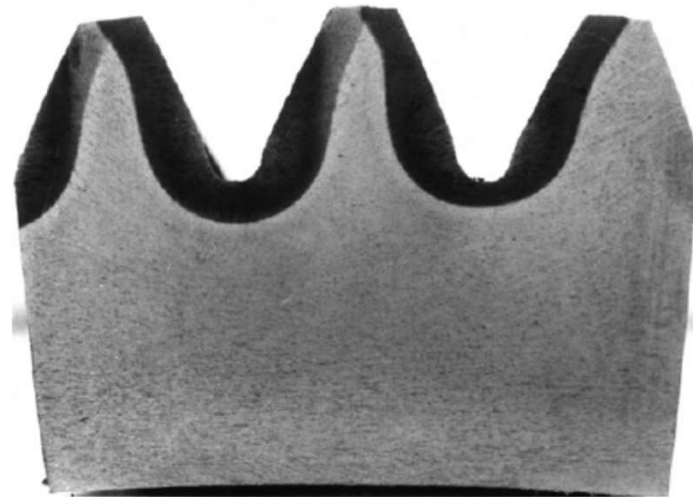


Engenharia de Superfície: Tratamentos Superficiais

Engenharia e Ciência dos Materiais I
Profa.Dra. Lauralice Canale

Endurecimento Superficial

- Os processos de endurecimento superficial visam o aumento de dureza (ou outras propriedades mecânicas) de uma região específica de um componente.
- Normalmente, tal região sofrerá algum tipo de solicitação localizada. A solicitação mais comum é o desgaste abrasivo e, assim, torna-se importante um aumento de resistência ao desgaste da região por meio de um endurecimento localizado, conservando as características originais do núcleo do componente



Engrenagem endurecida superficialmente pelo processo de têmpera por indução.

Métodos de Endurecimento Superficial

- Encruamento por conformação mecânica a frio (“shot peening” ou “roletagem”);
- Têmpera superficial
- Tratamentos termoquímicos (cementação, nitretação, carbonitretação etc.)
- Tratamentos de eletrodeposição ou aspensão térmica (aplicação de “cromo duro”, revestimentos cerâmicos e etc.)

Têmpera Superficial

- A têmpera superficial produz regiões endurecidas na superfície do componente (de microestrutura martensítica) de elevada dureza e resistência ao desgaste, sem alterar a microestrutura do núcleo.

Vantagens da Têmpera Superficial

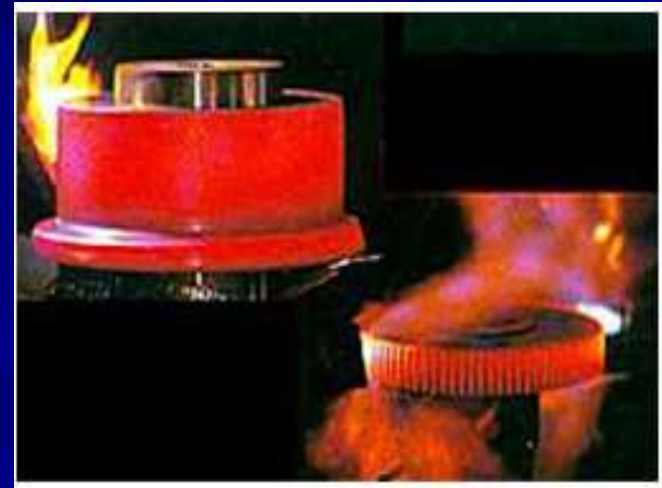
- Aplica-se à peças de grandes dimensões (engrenagens de 2-3 m)
- Permite o endurecimento em áreas localizadas
- Pode ser usado quando a geometria da peça ocasionar grandes deformações
- Permite obter a combinação de altas resistências ao desgaste e dureza na superfície, com ductilidade e tenacidade no núcleo da peça
- Não exige fornos de aquecimento
- É rápida (pode ser aplicada na oficina)
- Não produz grandes oxidações e descarbonetações no aço.

Processos Usuais de Têmpera Superficial

- Por Chama
- Por Indução
- Por Laser
- Por Feixe eletrônico

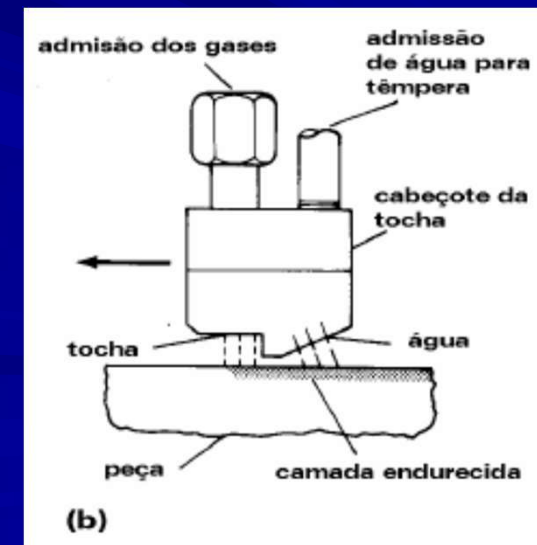
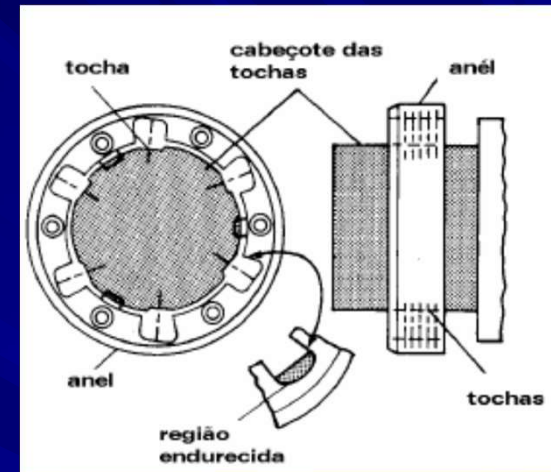
Têmpera por chama

- O aquecimento é realizado por meio de chama oxiacetilênica até a austenitização da camada desejada. O resfriamento é realizado com salmoura, soluções de polímeros, água; por meio de spray ou imersão.
- Podem ser atingidas profundidades de até 6,3 mm
- A profundidade da camada é controlada pela intensidade, distância e tempo de duração da chama aplicada



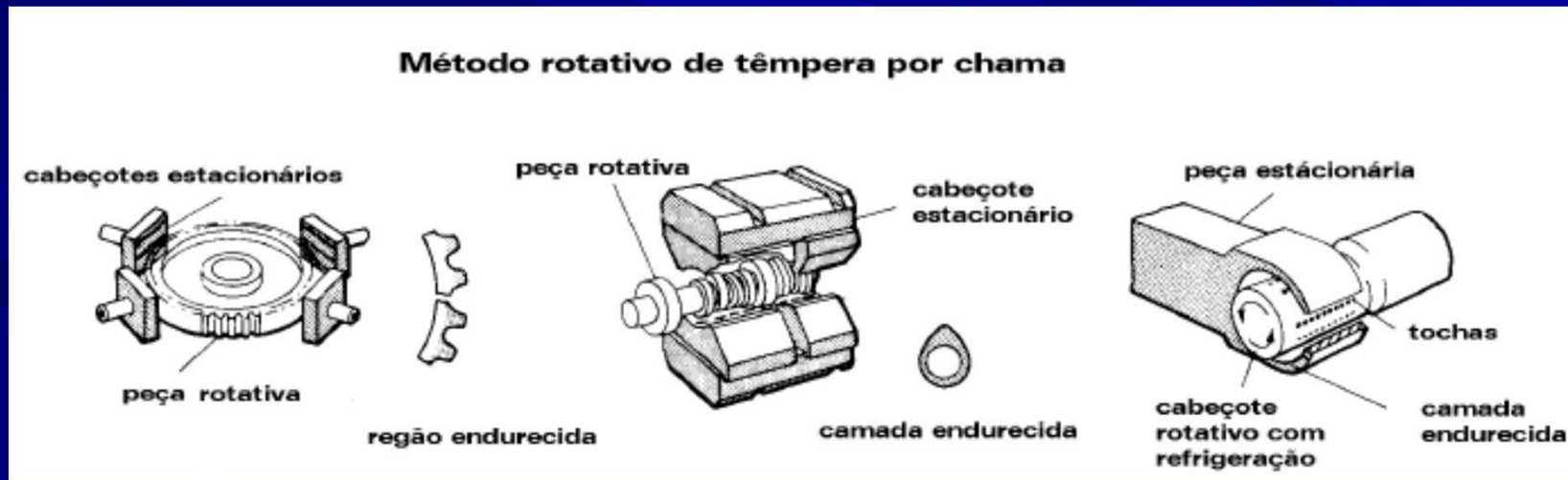
Têmpera por chama - métodos

- Estacionário: Aquece-se apenas o local a ser endurecido com subsequente resfriamento rápido, por meio de aspersão ou imersão. É o método mais simples. Emprega apenas um maçarico e um tanque para resfriamento
- Progressivo: método direcionado ao tratamento de peças de grande porte. O equipamento consiste de uma ou mais tochas de aquecimento e um dispositivo de resfriamento por aspersão, montados em um carro que pode ter sua velocidade controlada. As velocidades variam, normalmente, de 5 a 30 cm/min.



Têmpera por chama - métodos

- Giratório: o componente, de seção circular, gira a uma velocidade estabelecida empiricamente, enquanto a tocha oxiacetilênica austenitiza a região ser endurecida. Para um aquecimento mais rápido e homogêneo são empregadas diversas tochas



para método progressivo giratório

- Consumo de Oxigênio :

$$C_o = 0.7 (p)^{1/2} \quad [l/cm^2]$$

p = profundidade endurecida em mm

- Consumo de acetileno:

$$C_a = 0.45 p^{1/2} \quad [l/cm^2]$$

- Tempo de aquecimento

$$7 \cdot p^2 \quad [s]$$

- Velocidade de movimento da tocha

$$72 / p^2 \quad [cm/minuto]$$

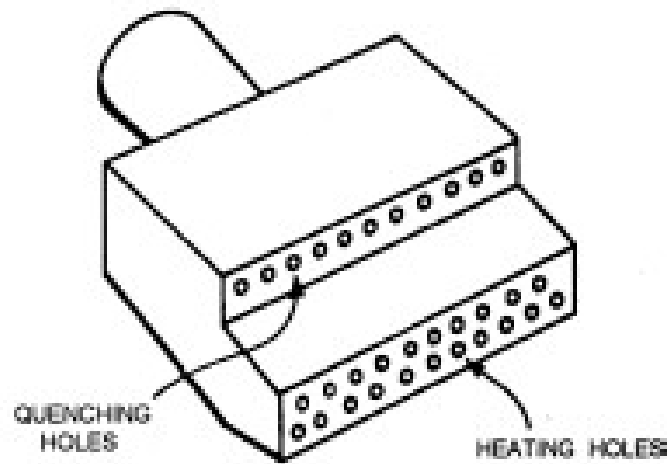
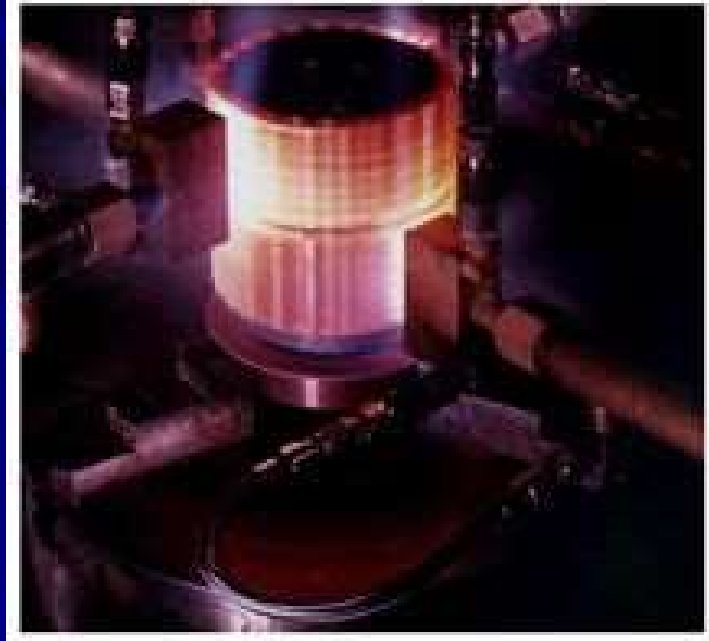
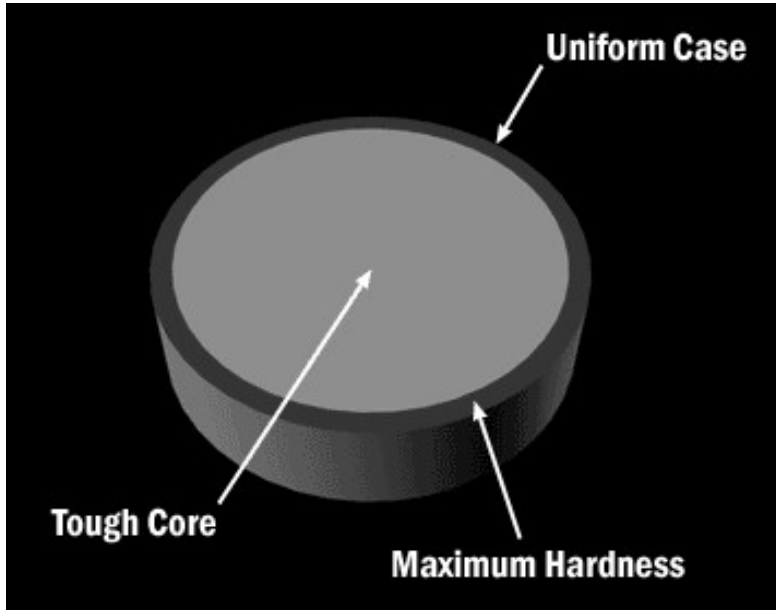


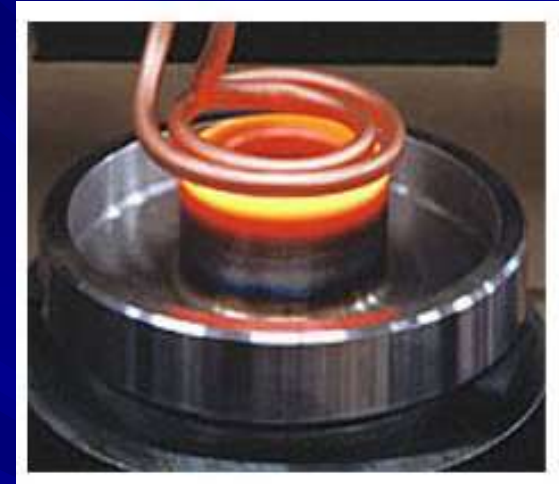
Figure 2-1.—Progressive hardening torch tip.

1.2- TÊMPERA POR INDUÇÃO

- O calor é gerado na peça por indução eletromagnética, utilizando-se bobinas de indução, nas quais flui uma corrente elétrica de alta frequência.
- Se uma corrente alternada passa por um bobina, estabelece-se nesta um campo magnético alternado, o qual induz um potencial elétrico na peça a ser aquecida. Como a peça é um circuito fechado, a tensão induzida provoca um fluxo de corrente. A resistência à passagem desta corrente provoca o aquecimento da região a ser temperada

Têmpera por indução

- O tempo de aquecimento é da ordem de segundos. O resfriamento é realizado da mesma maneira que a têmpera por chama.



TÊMPERA POR INDUÇÃO

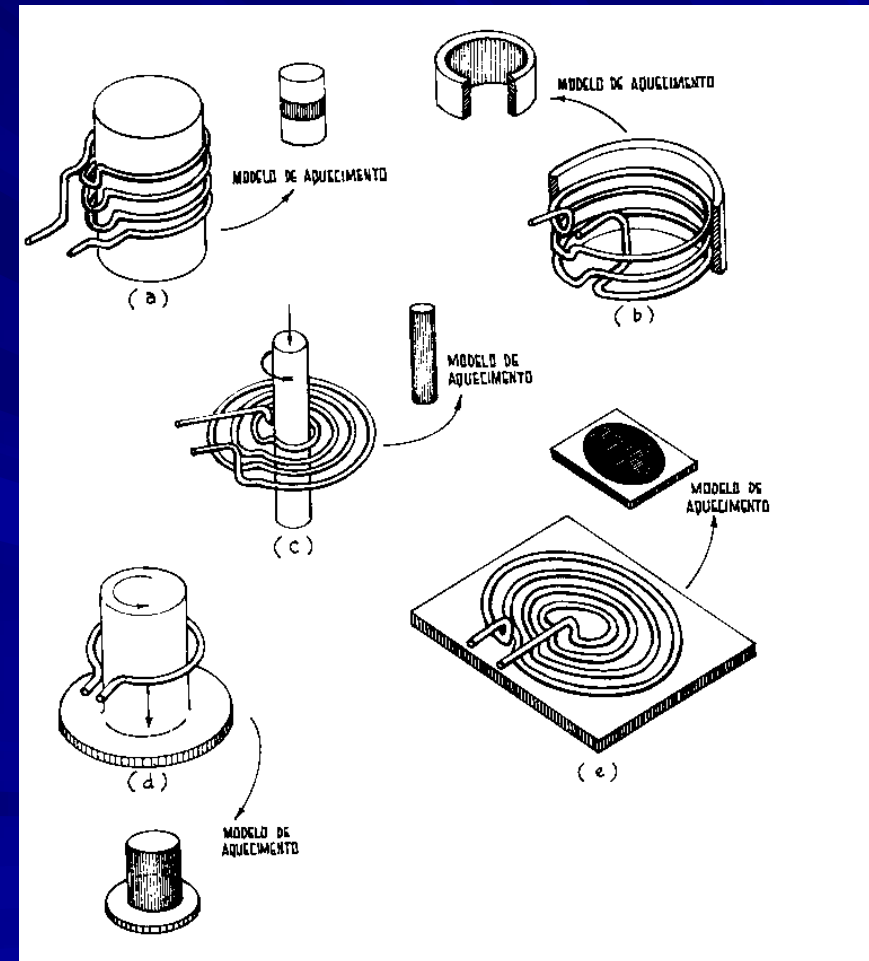
- A quantidade de calor gerada é dada pela lei de Joule:

$$Q = 0,239 \cdot i^2 \cdot R \cdot t$$

- i é a corrente em amperes
- R a resistência do condutor em ohms
- t o tempo que circula a corrente em segundos

A profundidade da camada temperada é controlada pela:

- Forma da bobina
- Distância entre a bobina e a peça
- Frequência elétrica (500-2.000.000 ciclos/s)
- Tempo de aquecimento



A profundidade da camada temperada é dada por:

$$p = 5030 \cdot (\rho / \mu \cdot f)^{1/2}$$

p: profundidade da camada em cm

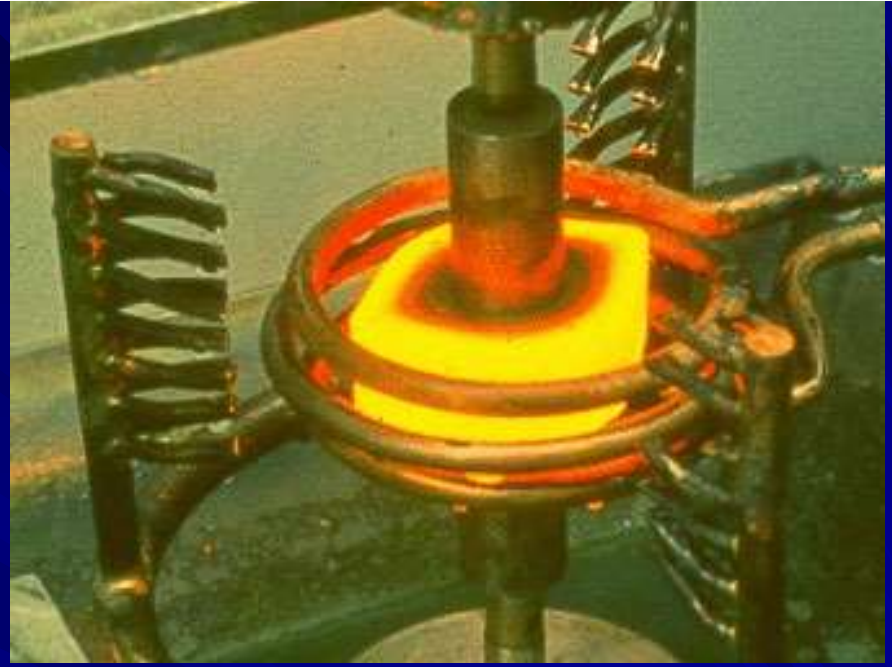
ρ : resistividade do material em ohm.cm

μ : permeabilidade magnética do material em Gauss/Oersted

f : frequência da corrente em Hz

Têmpera por indução - Vantagens

- Pode-se determinar com precisão a profundidade da camada temperada.
- O aquecimento é rápido
- As bobinas podem ser facilmente confeccionadas e adaptadas à forma da peça
- Não produz o superaquecimento da peça → permitindo a obtenção de uma estrutura martensítica acicular fina
- Geralmente, possibilita um maior aumento da dureza e da resistência ao desgaste
- A resistência a fadiga é também superior
- Não tem problema de descarbonetação.

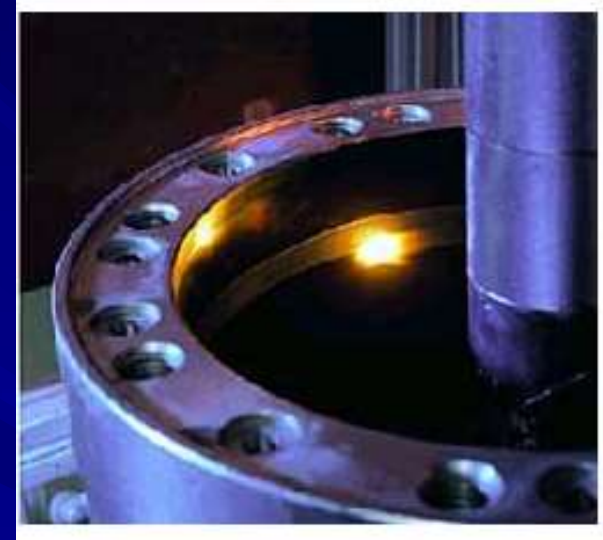


Têmpera por laser

- Utilizada na têmpera de peças com geometrias variadas
- O processo é muito preciso em impor aquecimento seletivo sobre áreas bem específicas. Além disto o processo pode ser feito em alta velocidade, produzindo pouca distorção.

VARIÁVEIS QUE CONTROLAM A PROFUNDIDADE DA CAMADA

- Diâmetro do raio
- Intensidade
- Velocidade de varredura (100 polegadas/min.)

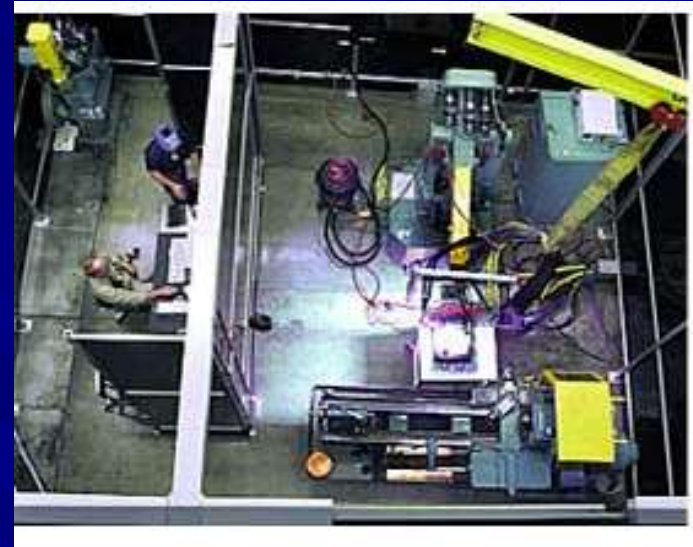


Têmpera por laser - Vantagens

- O processo opera a altas velocidades
- A distorção provocada é pequena
- Pode ser usado para áreas selecionadas
- Softwares e automação podem ser usados para controlar os parâmetros

Têmpera por feixe eletrônico

- O endurecimento por feixe de elétrons é similar ao endurecimento por laser. A fonte de energia é um feixe de elétrons de alta energia.
- O processo pode ser automatizado, mas deve ser conduzido sob condições de vácuo, visto que os feixes de elétrons dissipam-se facilmente no ar.
- Como no caso do laser, a superfície pode ser endurecida com muita precisão, tanto na profundidade como na posição.



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.

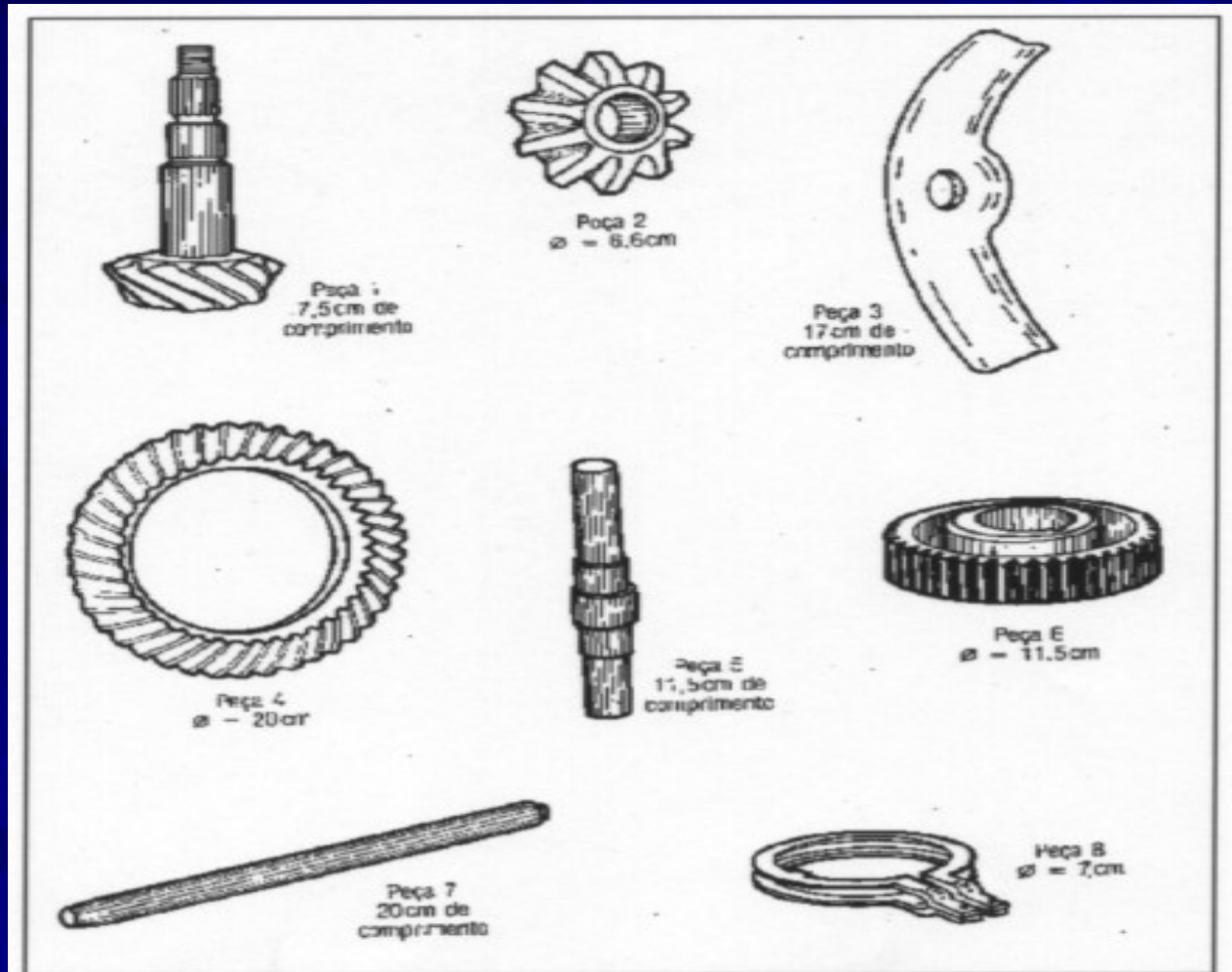
Tratamentos Termoquímicos

- Os tratamentos termoquímicos mais importantes industrialmente são:
 - ✓ Cementação
 - ✓ Nitretação
 - ✓ Carbonitretação
 - ✓ Cianetação
 - ✓ Boretção

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)

Cementação

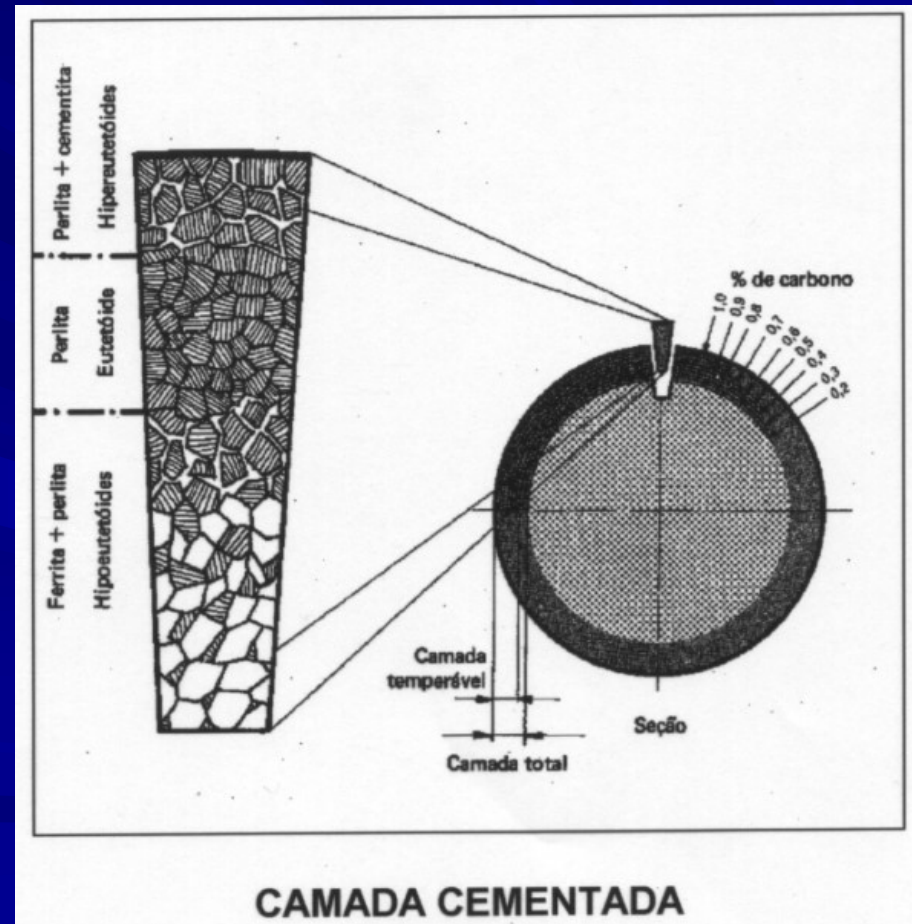


PEÇAS CEMENTADAS

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)



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.

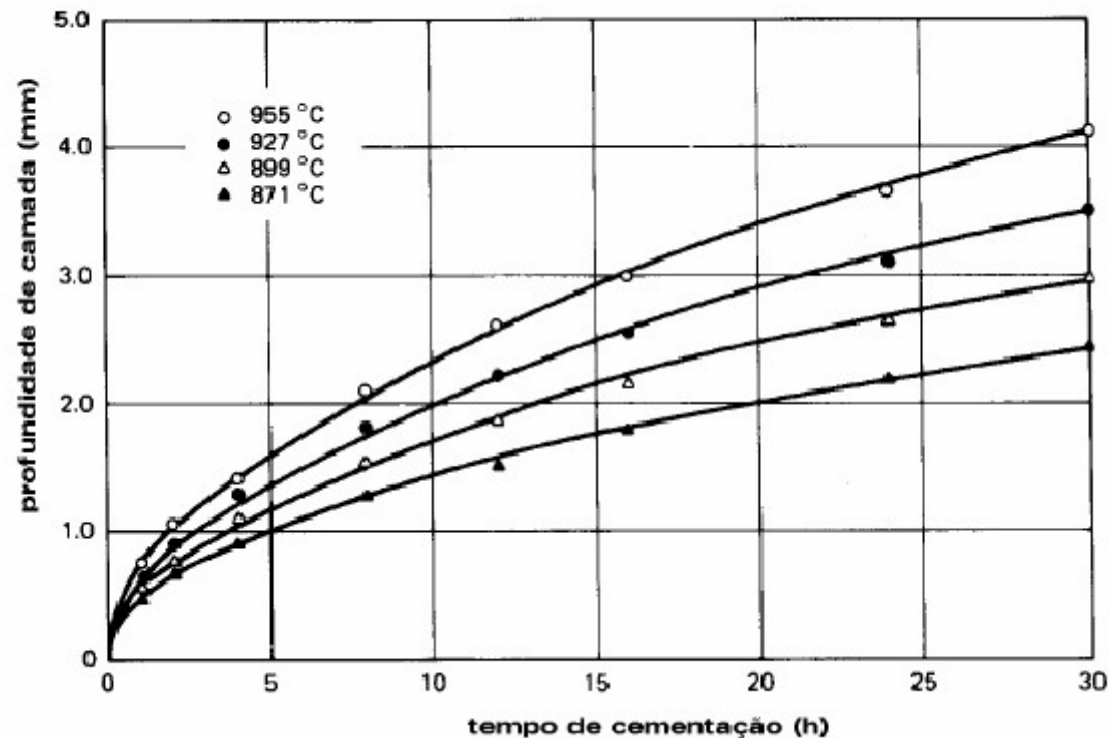
Cementação por Via Gasosa

- A atividade de carbono é controlada de modo a produzir camadas superficiais com teores de carbono entre 0,8 e 1,0% de C
- 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

- O coeficiente de difusão do carbono na austenita determina o tempo necessário para a obtenção de uma determinada profundidade de camada e depende fortemente da temperatura

Profundidades de camada cementadas obtidas em quatro temperaturas

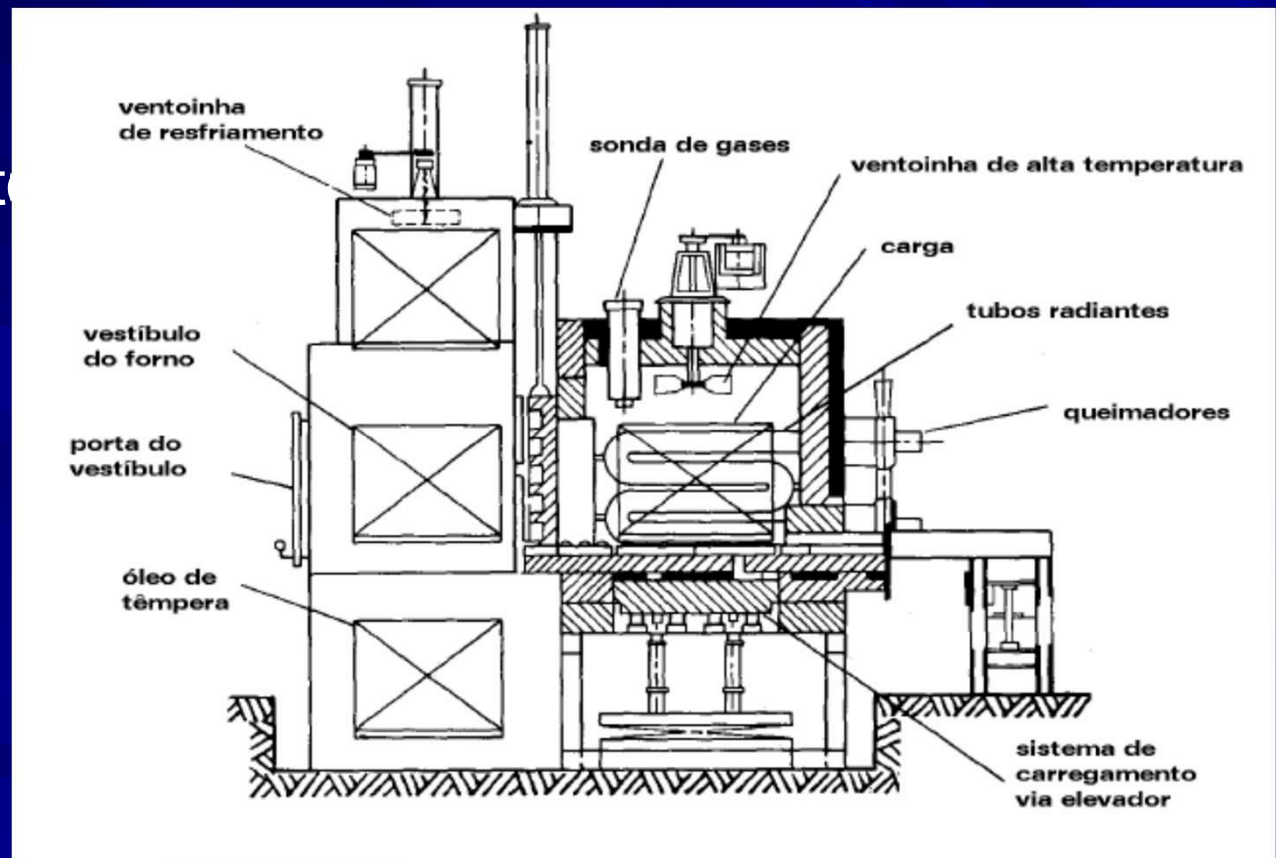


Cementação por via Gasosa - Vantagens

- mistura carbonetante permanece estável durante toda a cementação
- possibilita um melhor controle do teor de carbono e conseqüentemente da camada cementada
- facilita a cementação de peças delicadas
- evita a oxidação
- permite a têmpera direta após a cementação (sem contato com o ar e sem reaquecimento)
- o processo é limpo (não precisa de limpeza posterior)
- a penetração do Carbono é rápida
- as deformações por tensões são menores

Cementação por via Gasosa - Desvantagens

- 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 (Cloreto 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 líquida - Vantagens

- Melhora o controle da camada cementada
- a camada cementada é mais homogênea
- facilita a operação
- aumenta a velocidade do processo
- possibilita operações contínuas em produção seriada
- Dá proteção quanto à oxidação e descarbonetação
- Facilidade de manuseio das peças (uso de ganchos, ou cestas)

Cementação por via líquida - cuidados

- não deixar faltar cobertura de grafite no banho
- a exaustão dos fornos deve ser permanente, pois os gases desprendidos são tóxicos, os sais são venenosos e em contato com ácidos desprendem ácido cianídrico
- as peças devem ser introduzidas no banho secas e limpas.
- Neutralização dos banhos via processamento químico após um determinado período de operação

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) $C + O_2 \xrightarrow{\leftarrow} CO_2$ (850-950 °C) O Carbono combina com o oxigênio do ar.

2) $CO_2 + C \xrightarrow{\leftarrow} 2CO$. O CO_2 reage com o carvão incandescente.

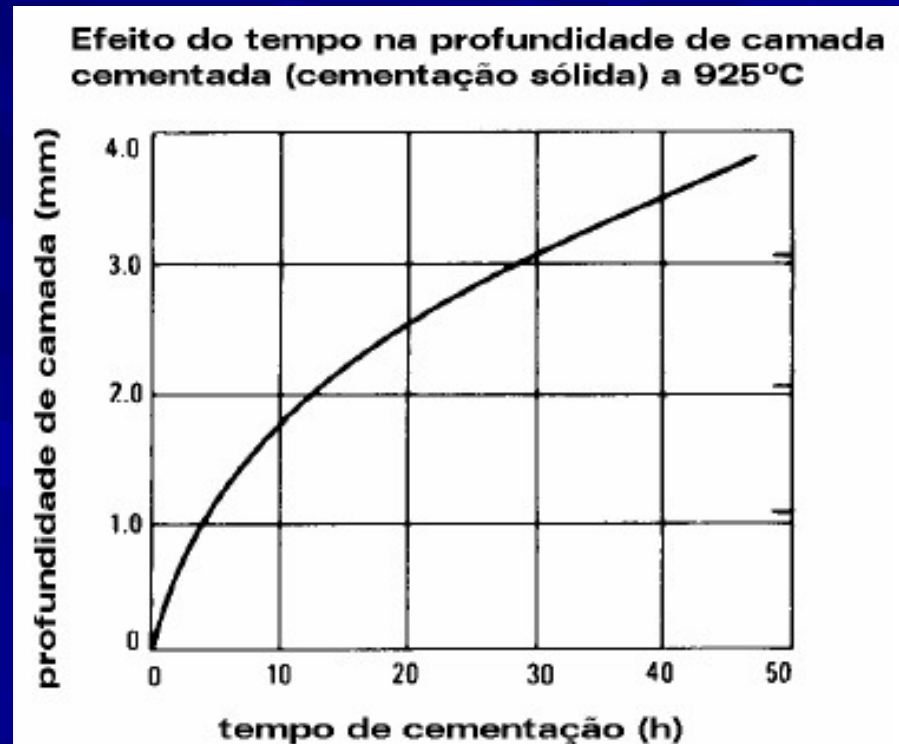
3) $3Fe + 2CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$ O CO_2 reage com o carvão incandescente e assim por diante.

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



Cementação por via sólida - Vantagens

- Possibilidade de ser realizada em uma grande variedade de fornos;
- É mais adequado para peças que são resfriadas lentamente a partir da temperatura de cementação
- O processo oferece uma série de técnicas de isolamento de componentes submetidos à cementação seletiva.

Cementação por via sólida - Desvantagens

- É um processo mais lento que os processos de cementação líquida e gasosa;
- Não é adequada para a realização de têmpera diretamente da temperatura de cementação;
- Não é adequada para componentes com camadas finas e/ou com tolerâncias estreitas
- Exige um maior trabalho manual para montagem e desmontagem do aparato.

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.

LEIS DE FICK PARA DIFUSÃO

- A SEGUNDA LEI DE FICK PARA DIFUSÃO PODE SER APLICADA PARA TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

SEGUNDA LEI DE FICK

- (dependente do tempo e unidimensional)

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

Suposições (condições de contorno)

- Antes da difusão todos os átomos do soluto estão uniformemente distribuídos
- **O coeficiente de difusão permanece constante (não muda com a concentração)**
- O valor de x na superfície é zero e aumenta a medida que avança-se em profundidade no sólido
- t=0 imediatamente antes da difusão

SEGUNDA LEI DE FICK

uma possível solução para difusão planar

$$\frac{C_x - C_o}{C_s - C_o} = 1 - \text{f err} \left(\frac{x}{2 (D \cdot t)^{1/2}} \right)$$

$$\text{f err} \left(\frac{x}{2 (Dt)^{1/2}} \right)$$

É a função de erro gaussiana



C_s= Concentração dos átomos se difundindo na superfície

C_o= Concentração inicial

C_x= Concentração numa distância x

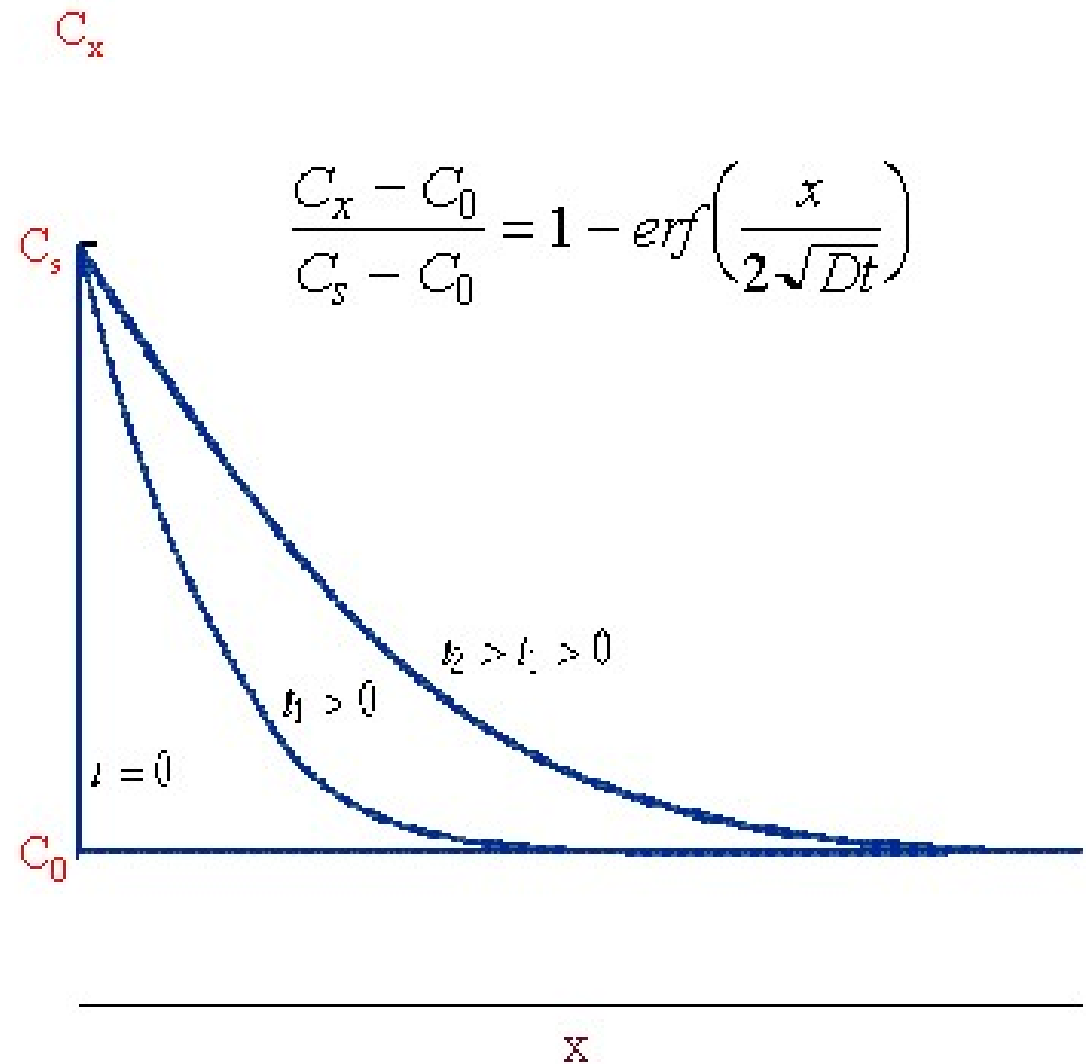
D= Coeficiente de difusão

t= tempo

DIFUSÃO

- Função $\text{erf}(z)$

z	$\text{erf}(z)$	z	$\text{erf}(z)$
0.00	0.0000	0.70	0.6778
0.01	0.0113	0.75	0.7112
0.02	0.0225	0.80	0.7421
0.03	0.0338	0.85	0.7707
0.04	0.0451	0.90	0.7969
0.05	0.0564	0.95	0.8209
0.10	0.1125	1.00	0.8427
0.15	0.1680	1.10	0.8802
0.20	0.2227	1.20	0.9103
0.25	0.2763	1.30	0.9340
0.30	0.3288	1.40	0.9523
0.35	0.3794	1.50	0.9661
0.40	0.4284	1.60	0.9763
0.45	0.4755	1.70	0.9838
0.50	0.5205	1.80	0.9891
0.55	0.5633	1.90	0.9928
0.60	0.6039	2.00	0.9953
0.65	0.6420		



Tratamentos Térmicos após Cementação

- O Tratamento Térmico para endurecimento deve levar em conta o aço e as especificações da peça.

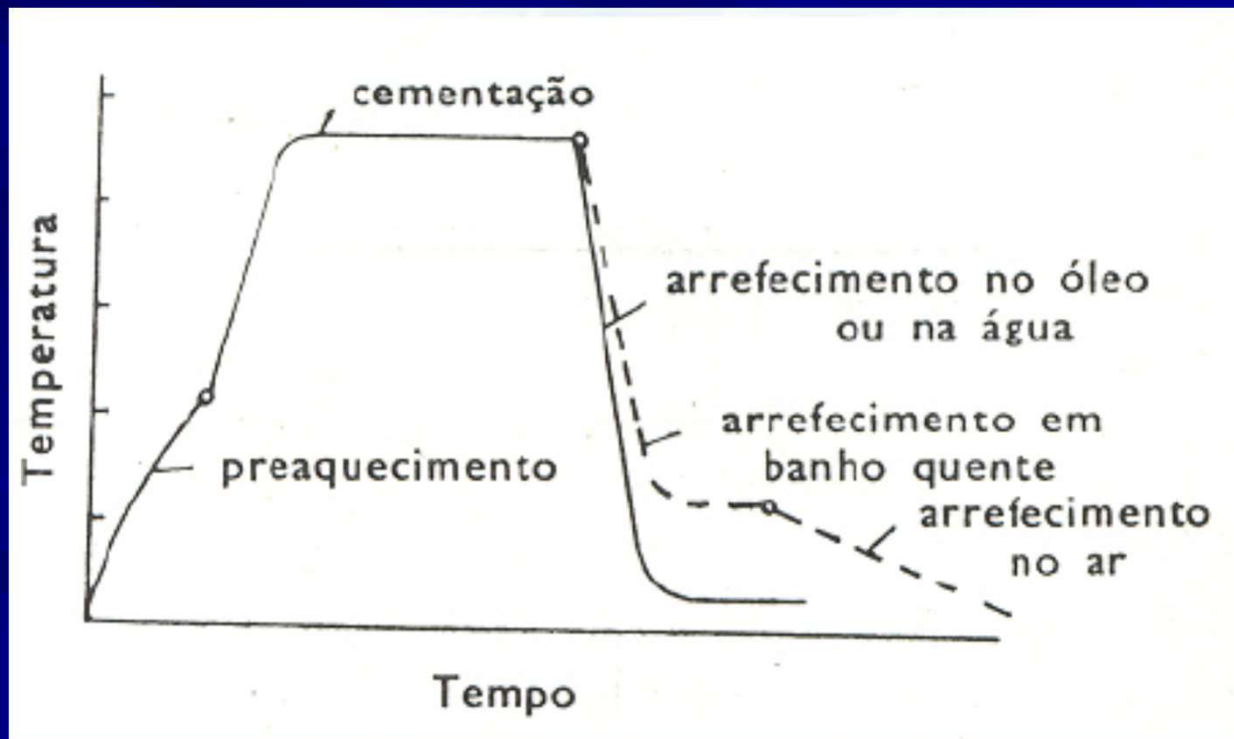
✓ Não esquecer que a peça tem duas composições distintas: um núcleo com baixo teor de Carbono ($<0,8$) e uma superfície com teor de carbono acima do eutetóide ($>0,8$).



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

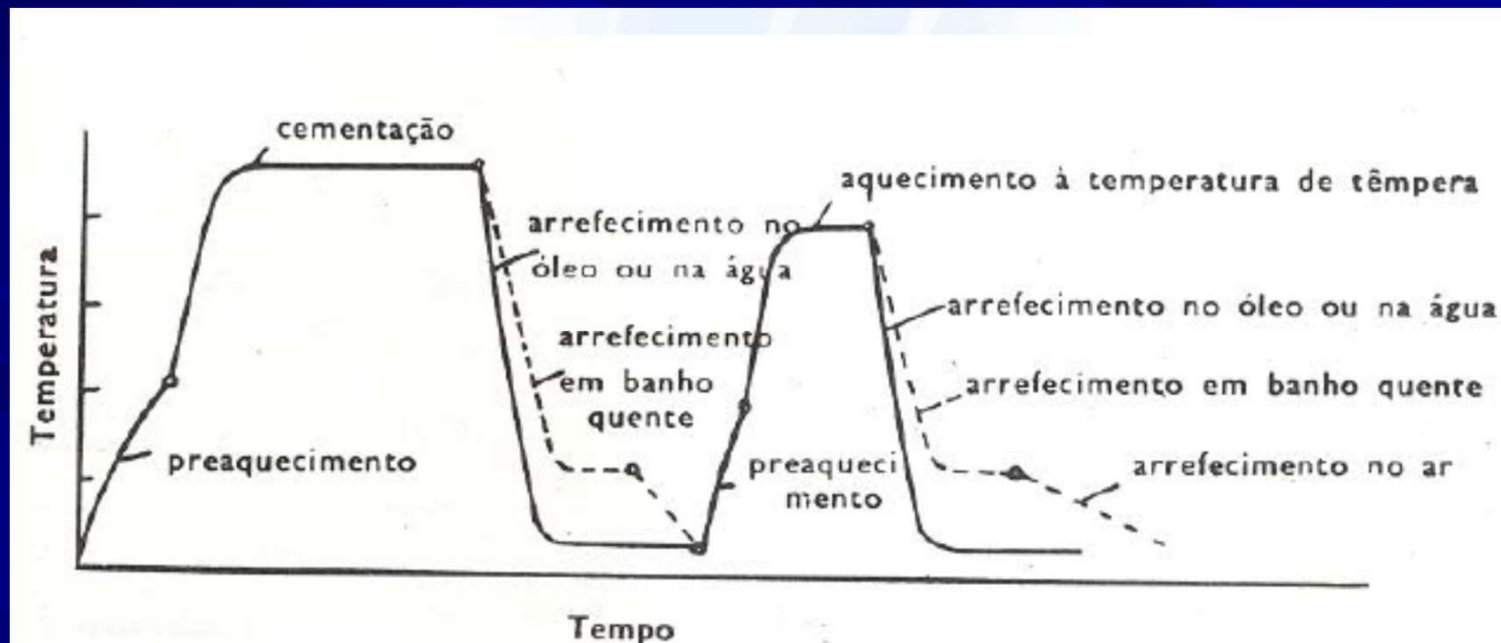


Têmpera direta simples - Considerações

- 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 A1
- As vantagens são :
 - ✓ reduz a retenção da austenita e diminui a dureza do núcleo
 - ✓ elimina a fragilização da peça
 - ✓ produz granulação + fina

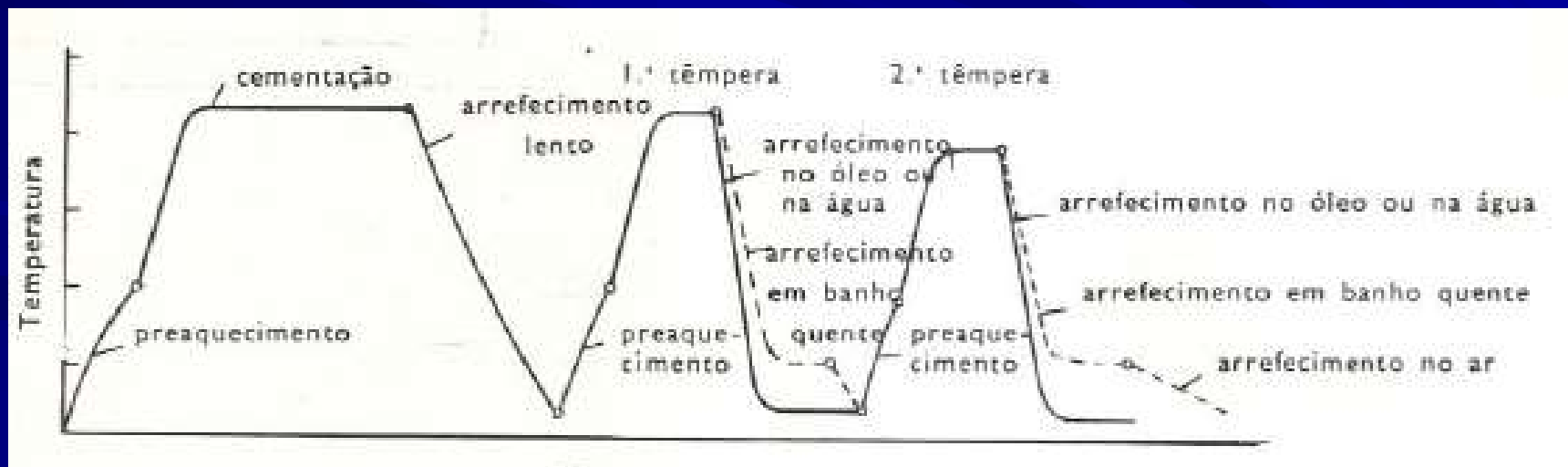


Têmpera Indireta Simples

- Consiste no resfriamento da peça ao ar calmo. A seguir a peça é aquecida e resfriada a partir de um patamar pré-estabelecido.
- “C” - a peça é aquecida acima da linha A1 (camada cementada).
 - ** O núcleo continua com granulação grosseira e com mínima dureza. Aplica-se à aços de granulação fina.
- “D” - A peça é aquecida entre as linhas A1 e A3 (do núcleo).
 - ** Confere uma têmpera e um refino no núcleo, tornando-o mais tenaz e resistente.
- “E” - A peça é aquecida acima das linhas A3 (do núcleo) e Acm da superfície
 - ** A têmpera e refino do grão no núcleo são totais.

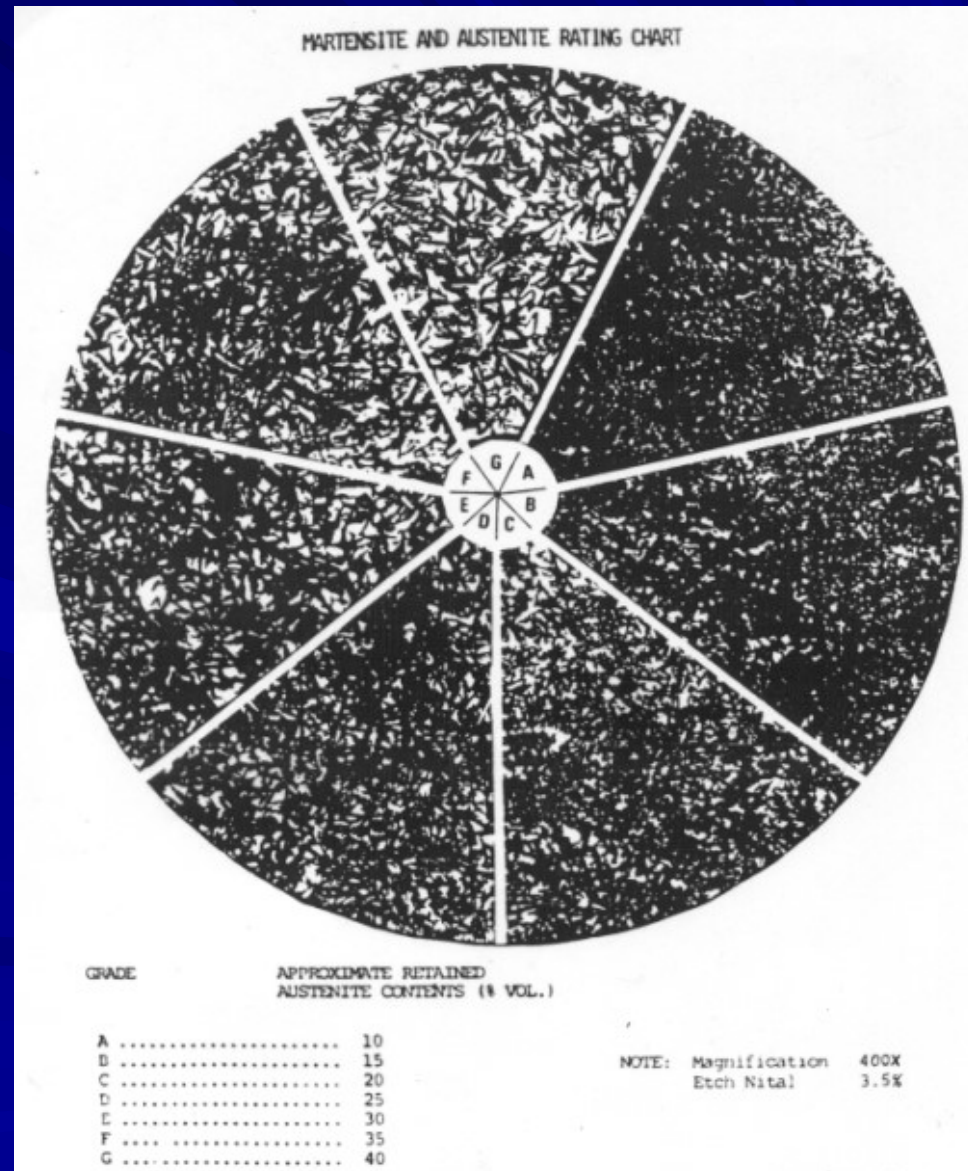
Têmpera Indireta Dupla

- Consiste no resfriamento da peça ao ar calmo. A seguir a peça é reaquecida acima das linhas A_3 e A_{cm} e retemperadas.
- É indicado para aços de granulação grosseira. A camada superficial fica dura e o núcleo mole. Há um refino do grão e diminui a austenita residual.



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 -D 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

Nitretação

- A nitretação é um tratamento termoquímico que visa o endurecimento superficial pela difusão de nitrogênio e conseqüente formação de nitretos.
- A nitretação é realizada em temperaturas abaixo do campo austenítico e não é necessário um tratamento subsequente de têmpera para aumento de dureza.
- **Temperatura de nitretação:**
500-600°C
- As peças são resfriadas ao ar ou em salmoura

Nitretação - Vantagens

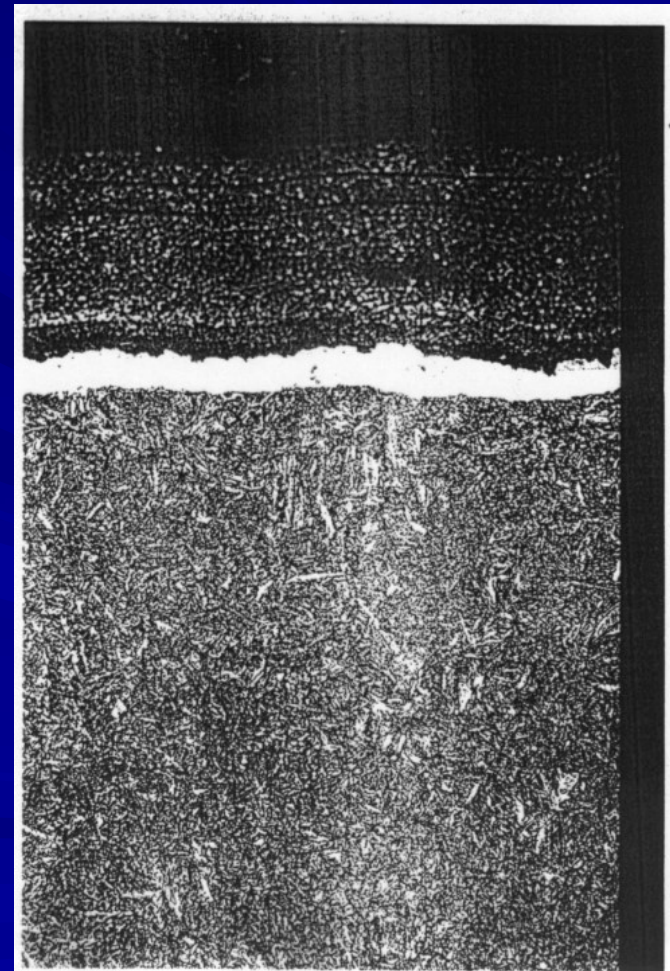
- Obtenção de alta dureza superficial
- Obtenção de elevada resistência ao desgaste
- Melhora a resistência à fadiga, à corrosão e ao calor
- Propicia um menor empenamento das peças, já que é realizado a temperaturas mais baixas
- Não necessita de tratamento térmico posterior

Nitretação – Considerações gerais

- O tratamento térmico (como têmpera e revenido) se desejado deve ser realizado antes da nitretação
- A nitretação promove um aumento nas dimensões da peça.
- Depois da nitretação só é possível retificar. Não é possível usinar porque a superfície é muito dura.

Nitretação - Camadas

- Camada branca: possui esta coloração após ataque com nital. É também chamada de zona de compostos. É uma camada de elevada porosidade.
- Camada de difusão: é de difícil visualização no microscópio, sendo utilizada a microdureza para verificar sua profundidade



Processos de Nitretação

- Nitretação Gasosa
- Nitretação Líquida
- Nitretação Iônica (Plasma)

Nitretação Gasosa

- Este processo é usado especialmente para aços ligados (Cr, Al, Mo,...).
- Tempo de processo: é longo (48-72 horas ou mais)
- O tratamento é realizado em fluxo de Amônia (NH_3).
- A camada nitretada atinge 0,8 mm e dureza de 1000-1100 Vickers.
- Os aços temperados e revenidos são tratados antes da nitretação

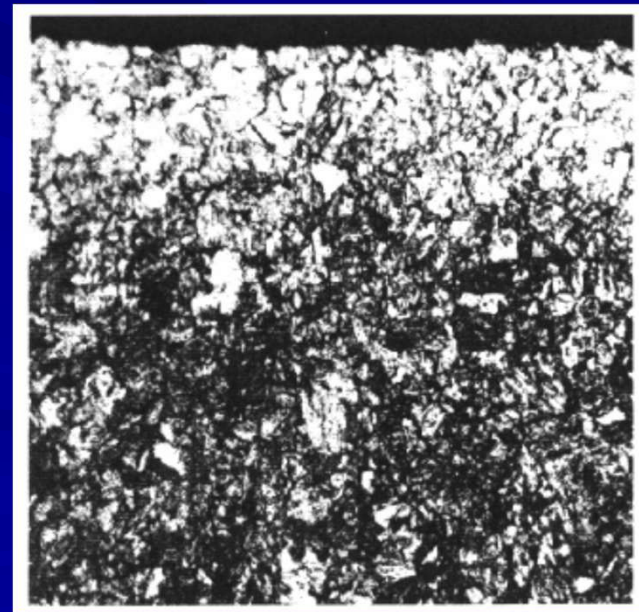
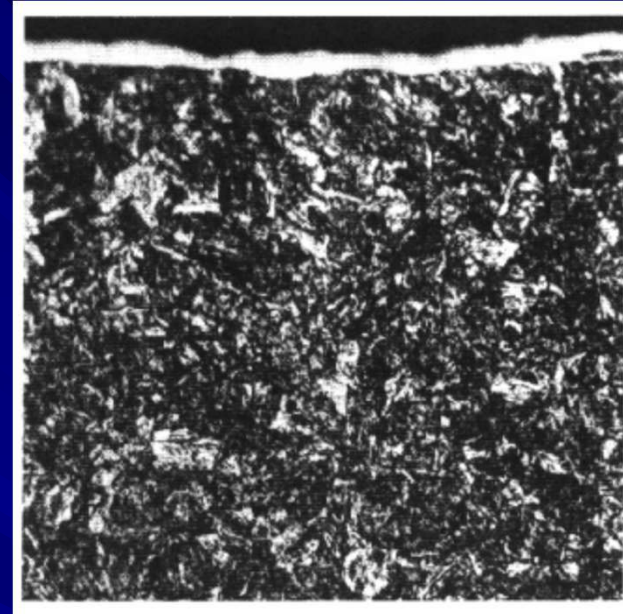
Mecanismo da Nitretação Gasosa



O Nitrogênio produzido combina-se com a ferrita formando nitreto de ferro ou forma nitretos complexos, de alta dureza, com os elementos de liga do aço.

Nitreção Gasosa

- Existem duas práticas de nitreção gasosa:
- Estágio único – em que os componentes são tratados em temperaturas entre 495°C e 525°C e é formada uma camada dura e frágil de nitretos na superfície, denominada camada branca.
- Duplo estágio (processo Floe) – tem como objetivo reduzir a espessura de camada branca formada no primeiro estágio.



Nitreção líquida

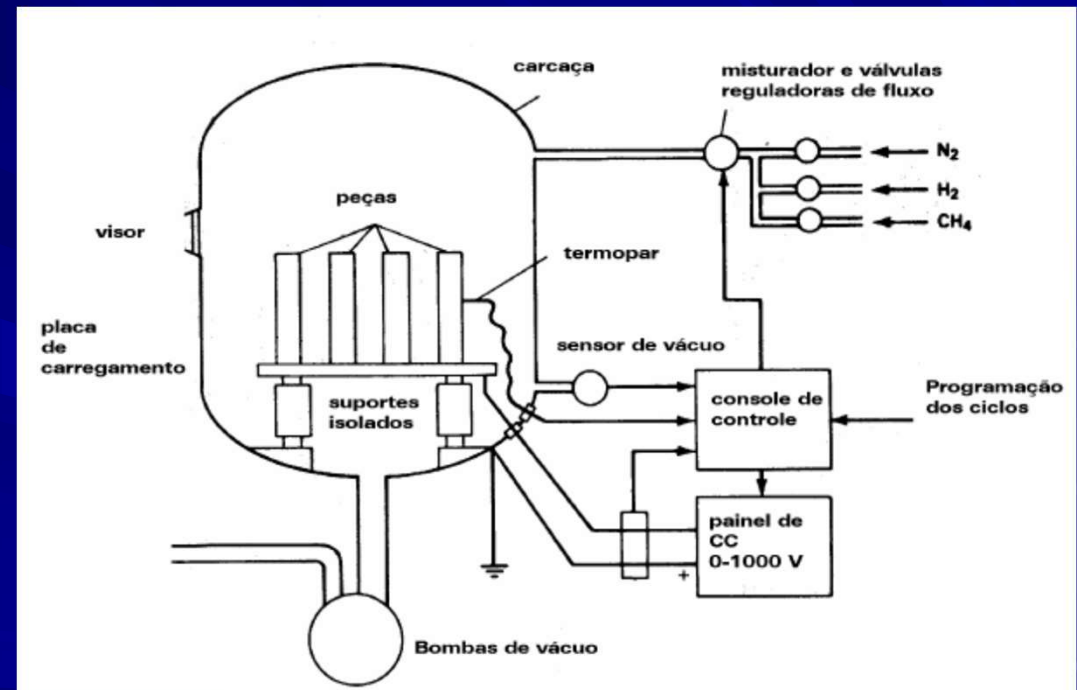
- As aplicações dos processos de nitreção gasosa e líquida são muito similares. O processo gasoso é recomendado para camadas mais espessas e aplicações em que a camada branca não é desejada pois oferece a opção de nitreção de duplo estágio.
- Como na nitreção gasosa, os aços submetidos à nitreção líquida são aços com teores de carbono entre 0,1 e 1,3% de C, podendo apresentar microestruturas ferríticas, perlíticas, bainíticas ou martensíticas.
- O tempo de nitreção é de aproximadamente duas horas
- O meio nitretante é um banho de sal fundido à base de cianetos, operado em temperaturas entre 510 e 580°C.

Nitretação líquida - Aplicações

Componente	Requisitos	Material e processo utilizado originalmente	Problema resultante	Solução adotada
Arruela de pressão	Suportar pressão sem sofrer deformação ou "galling"	Aço SAE 1010, carbonitretado em contato com bronze	Empenamento do aço e colagem deste com o bronze	Aço SAE 1010 nitretado por 90 min a 570°C seguido de resfriamento rápido em água
Eixo	Resistir ao desgaste na região de rolamento	Aço 4140 temperado por indução nas regiões de rolamento	Custo de inspeção elevado	Aço SAE 1040 nitretado por 90 min a 570°C
Componente do cinto (macho)	Resistir ao desgaste superficial	Aço SAE 1020 cementado	Distorções e problemas com fragilidade	SAE 1020 nitretado por 90 min seguido de resfriamento rápido em água
Eixo came	Resistir ao desgaste superficial	SAE 1045 temperado por indução, polido e fosfatizado	Alto custo do processo e materiais	SAE 1010 nitretado 90 min a 580°C

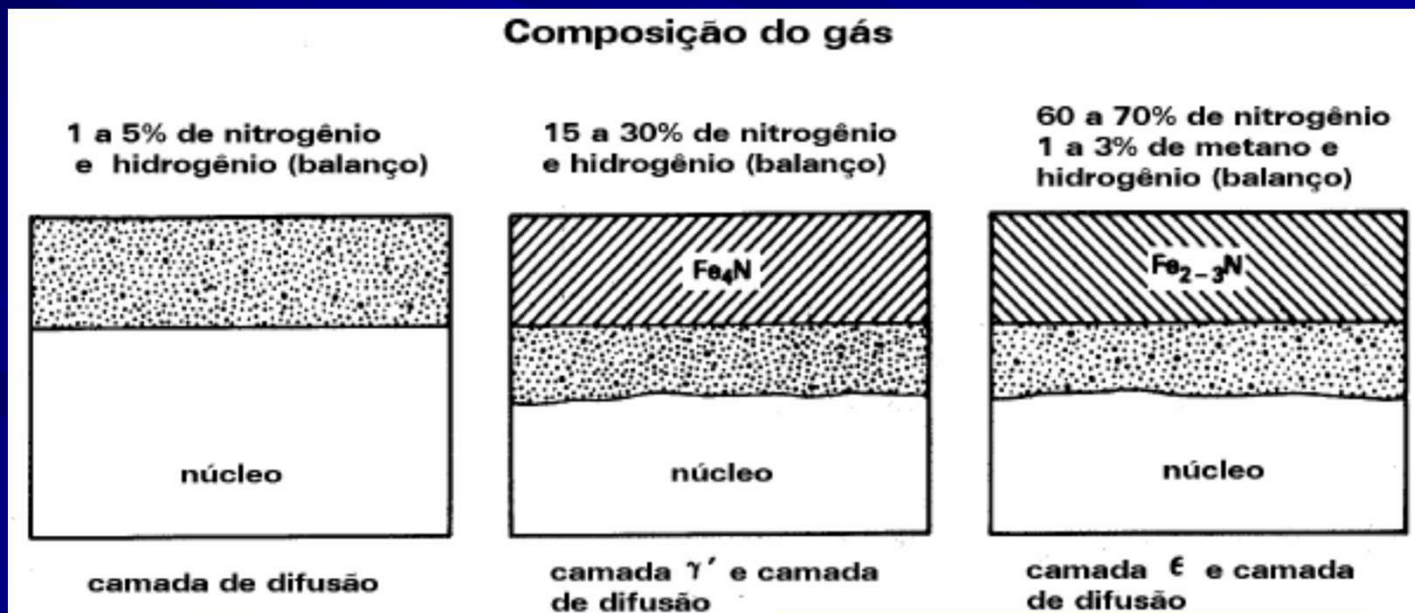
Nitretação Iônica

- A peça é colocada num forno a vácuo
- Aplica-se um potencial entre as paredes do forno e a peça (500-1000 Volts)
- Gás Nitrogênio é introduzido na câmara e é ionizado
- Os íons são acelerados em direção a peça (pólo negativo)
- O impacto dos íons gera calor suficiente para promover a difusão
- O forno atua como eletrodo e como câmara de vácuo e não como fonte de calor.



Nitretação Iônica

- O processo de nitretação iônica, em comparação ao processo de nitretação gasosa, apresenta um controle mais preciso do potencial de nitrogênio na superfície do metal. Por meio deste controle é possível selecionar a camada branca ϵ (Fe_{2-3}N) ou γ (Fe_4N) ou, ainda, evitar completamente a formação de camada

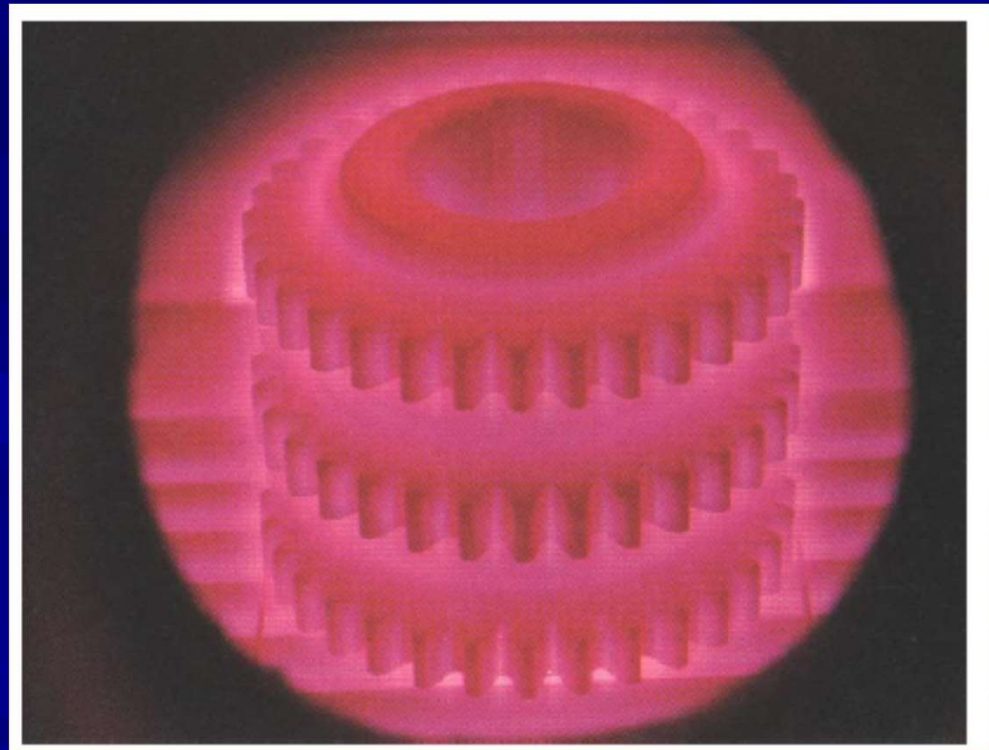


Nitreção iônica - Vantagens

- O processo é rápido
- Baixo consumo de gases
- Baixo custo de energia
- Fácil automatização
- Necessita de pouco espaço físico
- É aplicável a vários materiais
- Produz peças de alta qualidade

Nitretação Iônica - Aplicações

- A dureza após a nitretação depende da presença de elementos de liga formadores de nitretos. Os aços mais empregados são da série "nitralloys" e possuem em sua composição aproximadamente 1%Al e 1-1,5%Cr.
- Outras aplicações envolvem o uso aços-liga contendo Cr, aços inoxidáveis, aços ferramentas, componentes obtidos por metalurgia do pó e ferros fundidos.



Nitrocarbonetação

- Variante de baixo custo do processo de nitretação gasosa em que ocorre a difusão simultânea de C e N para a superfície do metal.
- O gás admitido no forno consiste de misturas com diferentes proporções de amônia e gás natural ou metanol.
- O processo é realizado em aços aquecidos em temperaturas da ordem de 570°C.
- Os tempos de tratamento variam entre 1 h a 3 h.
- A profundidade de camada endurecida varia entre 0,07 e 0,2 mm

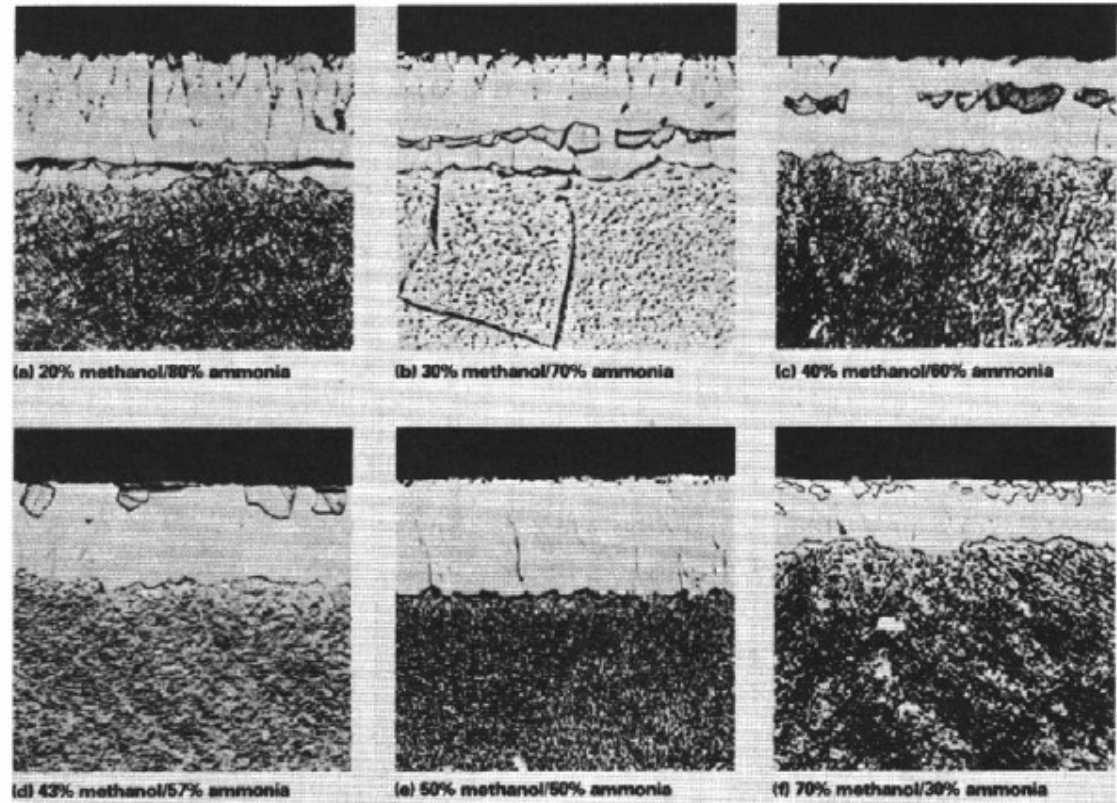
Nitrocarbonetação

- Deve-se posteriormente temperar e revenir as peças.
- A nitrocarbonetação apresenta algumas vantagens para o processo de têmpera:
 - ✓ O material apresenta uma melhor temperabilidade devido ao aumento do teor de Carbono
 - ✓ Processo mais rápido
 - ✓ Temperatura mais baixa
 - ✓ Menor crescimento de grão
 - ✓ Maior resist. ao desgaste
 - ✓ Menor distorção

Nitrocarbonetação

As aplicações da nitrocarbonetação são mais limitadas que os processos de cementação e/ou nitretação. Normalmente a nitrocarbonetação é aplicada em componentes de baixa responsabilidade submetidos a situações de desgaste leves. Os exemplos típicos são componentes de eletrodomésticos (como lâminas, eixos, engrenagens etc.)

Microestruturas da superfície de aço submetidos a carbonitretação gasosa com diversas composição de metanol e amônia. Aumento 80X.

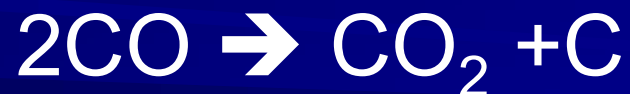
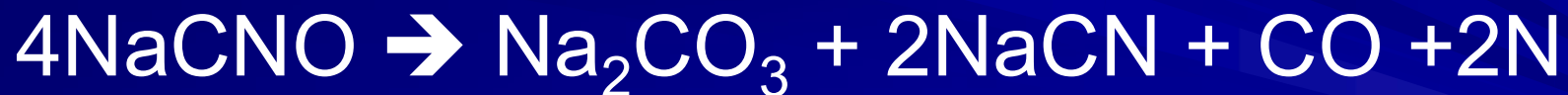


Carbonitretação

- Há um enriquecimento superficial de carbono e Nitrogênio.
- $T = 650-850 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Espessura: 0,1-0,3 mm
- É aplicado em aços-carbono com baixo teor de Carbono
- O resfriamento é feito em água ou salmoura

Carbonitreção (Cianetação)

- O processo é executado em banho de sal fundido (cianeto)
- Semelhante a cementação líquida



Carbonitretação

- Vantagens em relação a cementação:
- Maior rapidez
- Maior resistência ao desgaste e a corrosão
- Menor temperatura de processo

Boretação

- Consiste na introdução de Boro por difusão
- Ocorre em meio sólido
- Temperatura: 900°C

B_4C + ATIVADOR



BORETO DE FERRO que é um composto duro
(DUREZA VICKERS: 1700-2000)

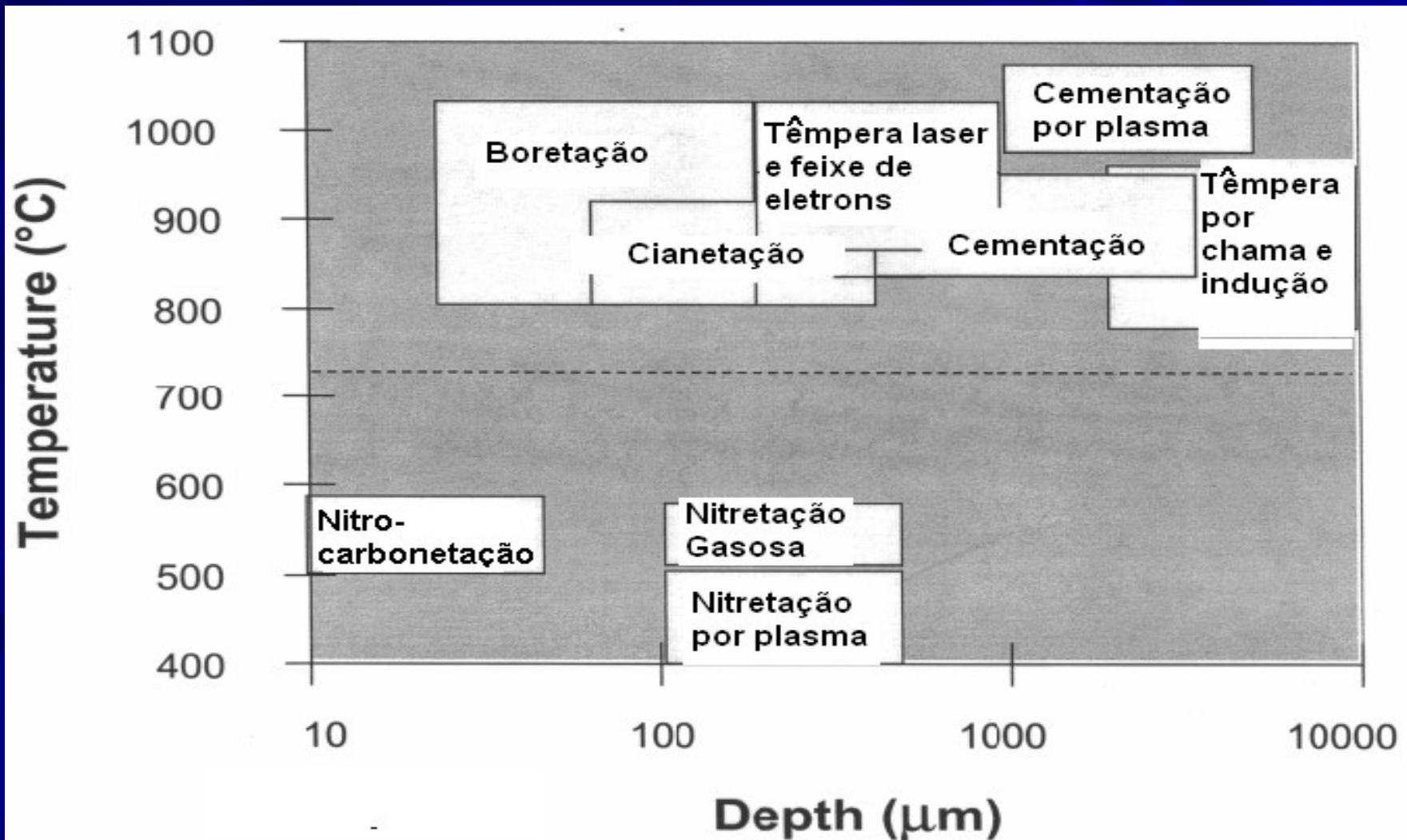
Boretação - Considerações

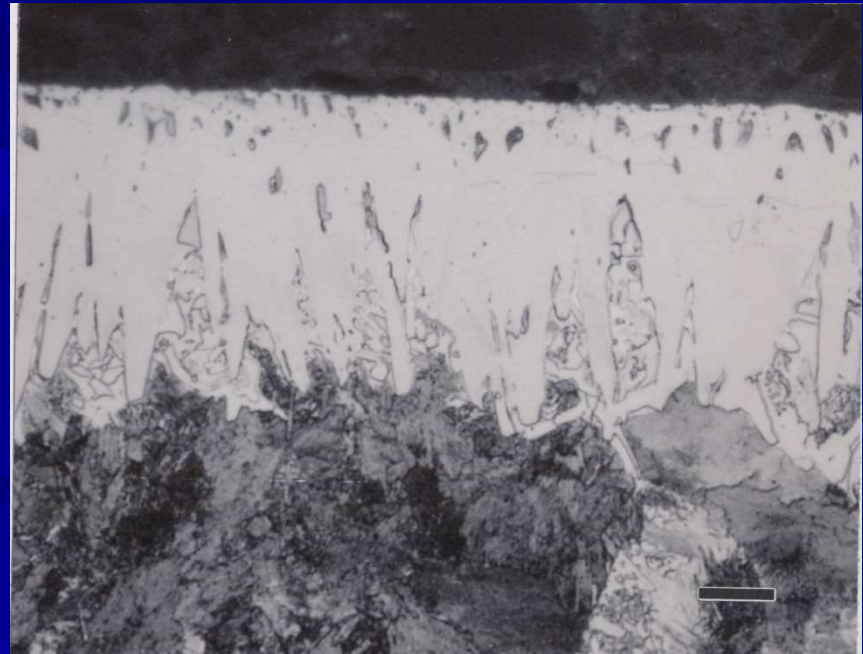
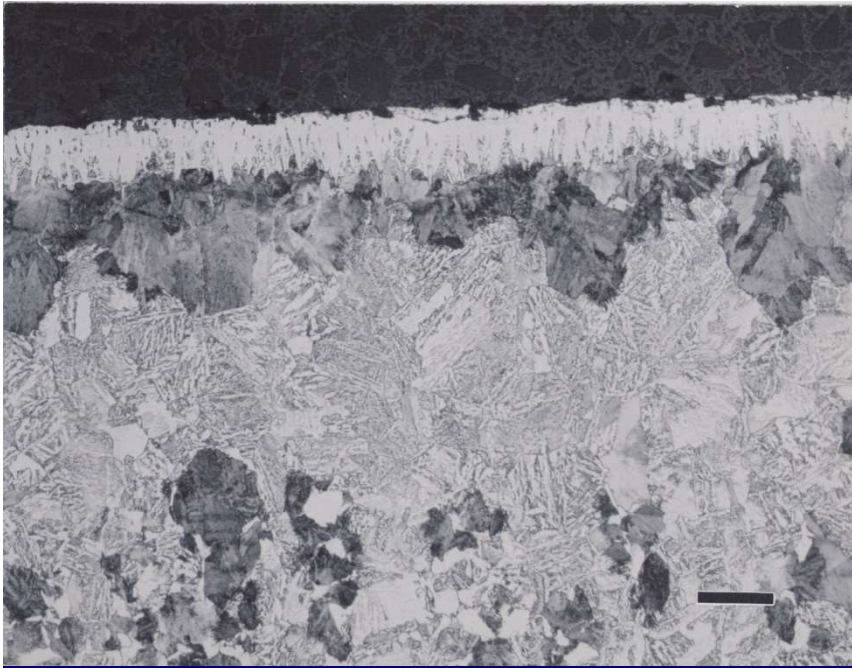
- Temperatura de boretação = 900 °C

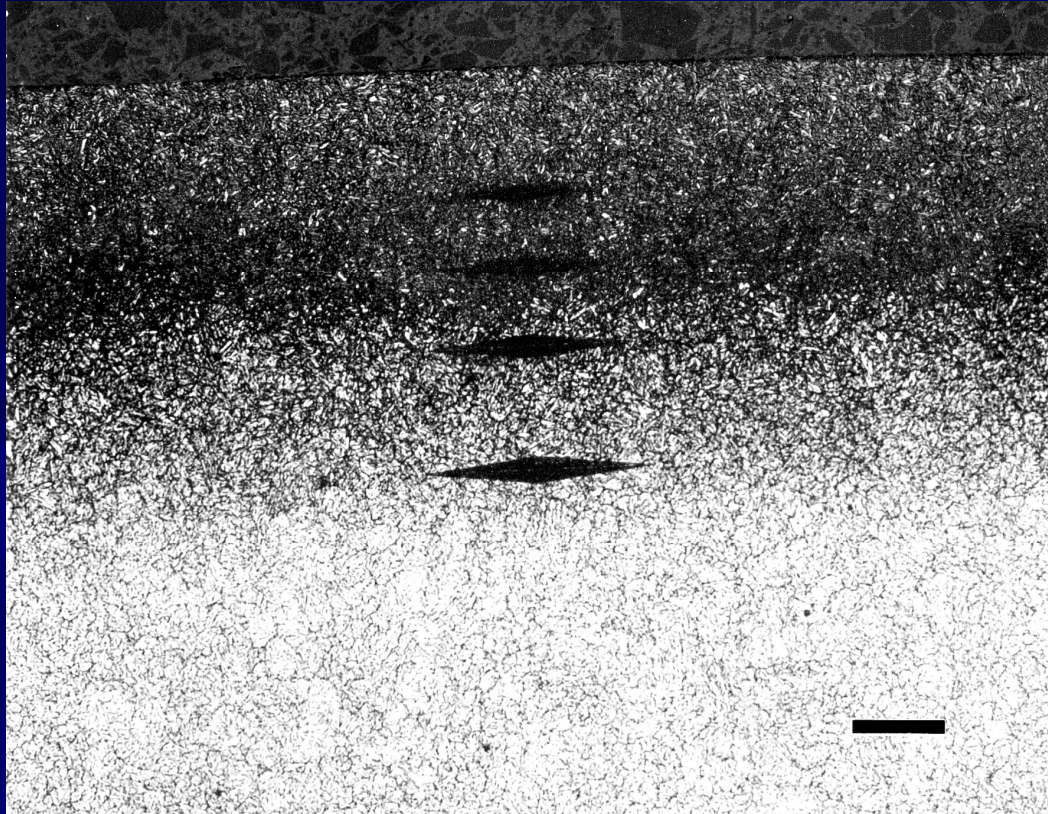
Para um aço 0,45 % de Carbono

um tempo de processo de 4 horas origina
uma camada endurecida de 100 microns.

Resumo dos Tratamentos Termoquímicos

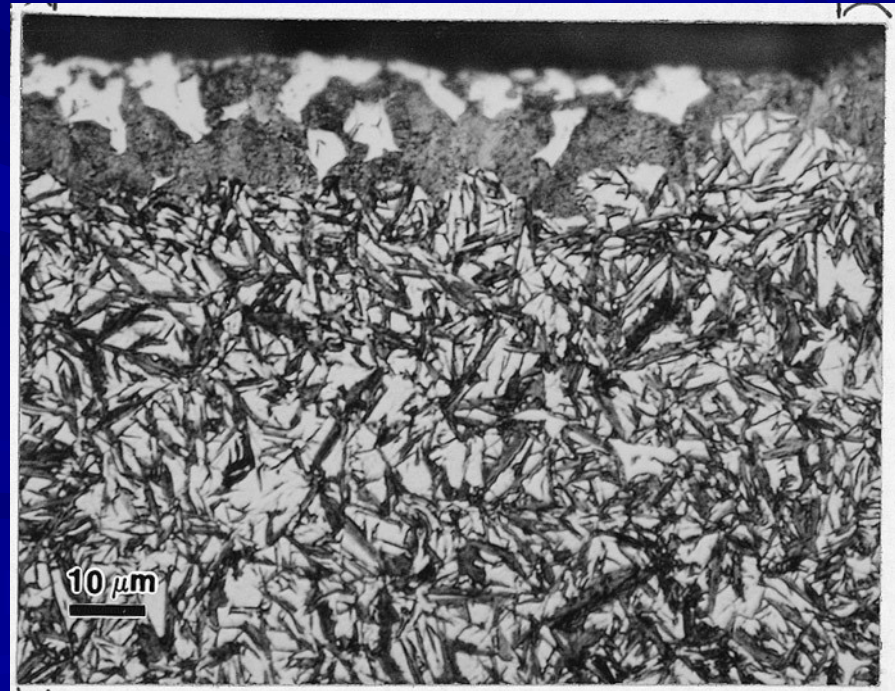
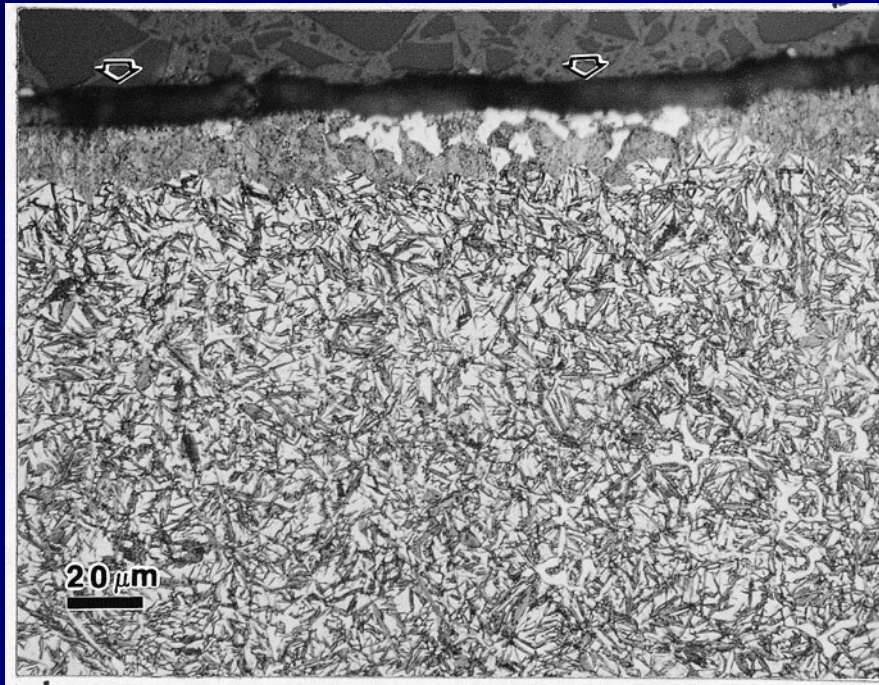


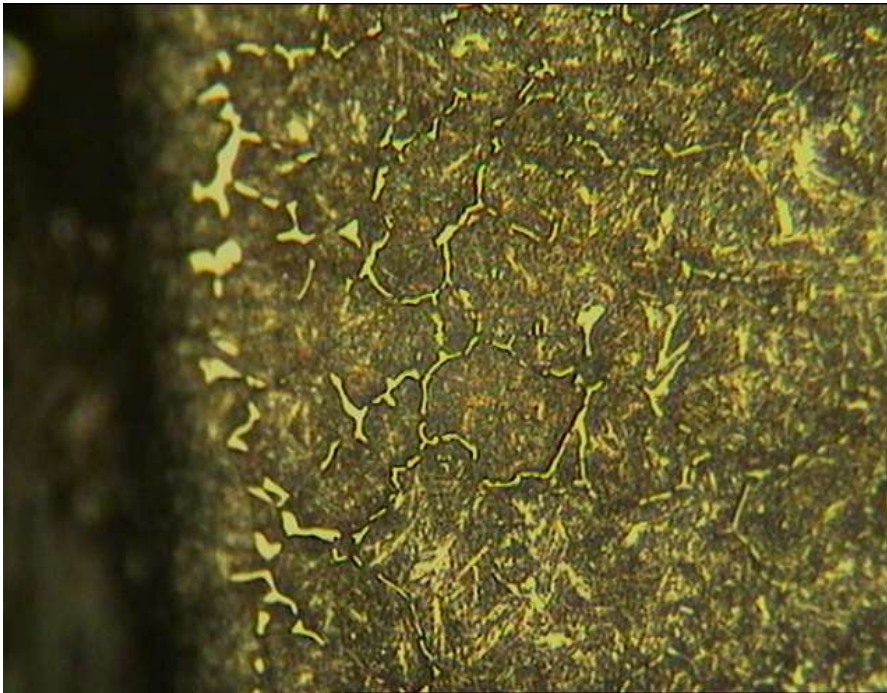




H13 nitretado

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
200x**

Mag

**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