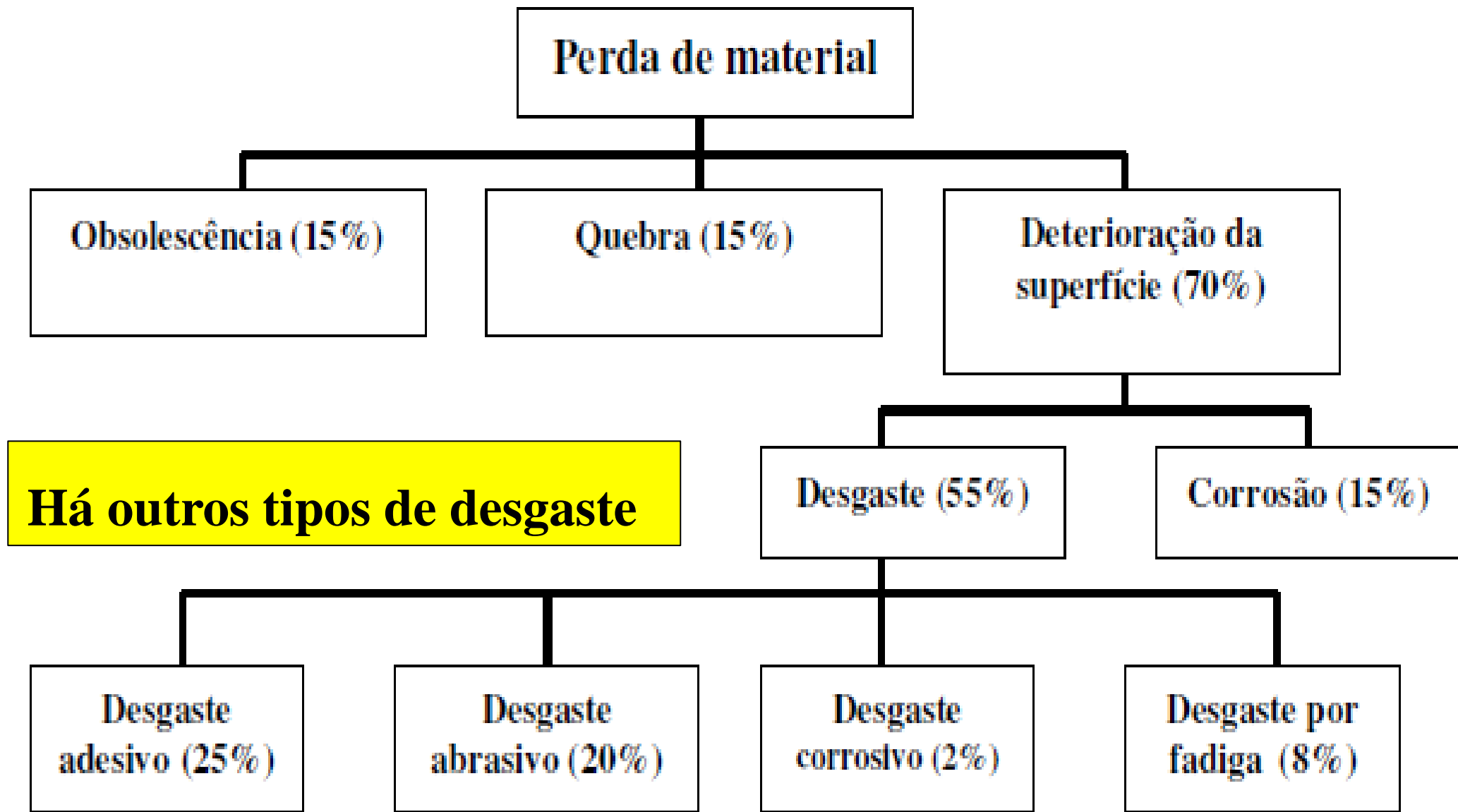


SMM0193 – Engenharia e Ciência dos Materiais I

Desgaste e Tratamentos Termoquímicos

Desgaste



Há outros tipos de desgaste

Custo anual de 4,5% PIB: R\$391,5 bilhões (2021)

DESGASTE

- **Definição (ASTM):** **degradação da superfície** de um sólido que, geralmente, envolve **perda progressiva** de material, devido ao **movimento relativo** desta superfície com uma ou mais substâncias em **contato**;
- **Tribologia:** **ciência** que estuda o **desgaste e o atrito**, ou seja, a interação de superfícies em movimento e de técnicas relacionadas;
- Onde há **atrito** há **desgaste**;

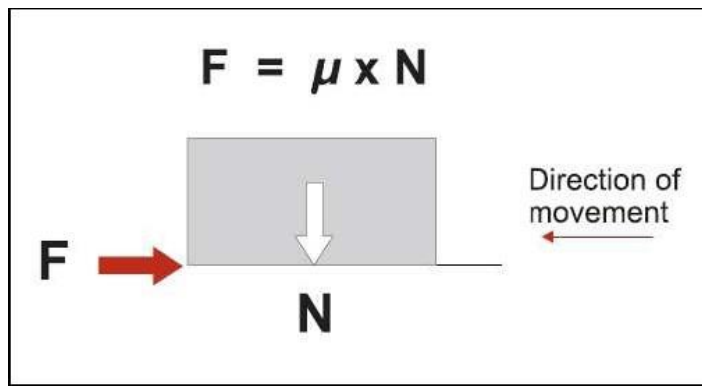
ATRITO

EFEITOS NEGATIVOS

- Se o **atrito não** existisse a **eficiência** de motores, transmissões, etc. **aumentaria**;
- O **tempo de vida** de componentes e equipamentos **aumentaria**;
- **Não haveria** desgaste, desajustes, vibrações e ruídos.

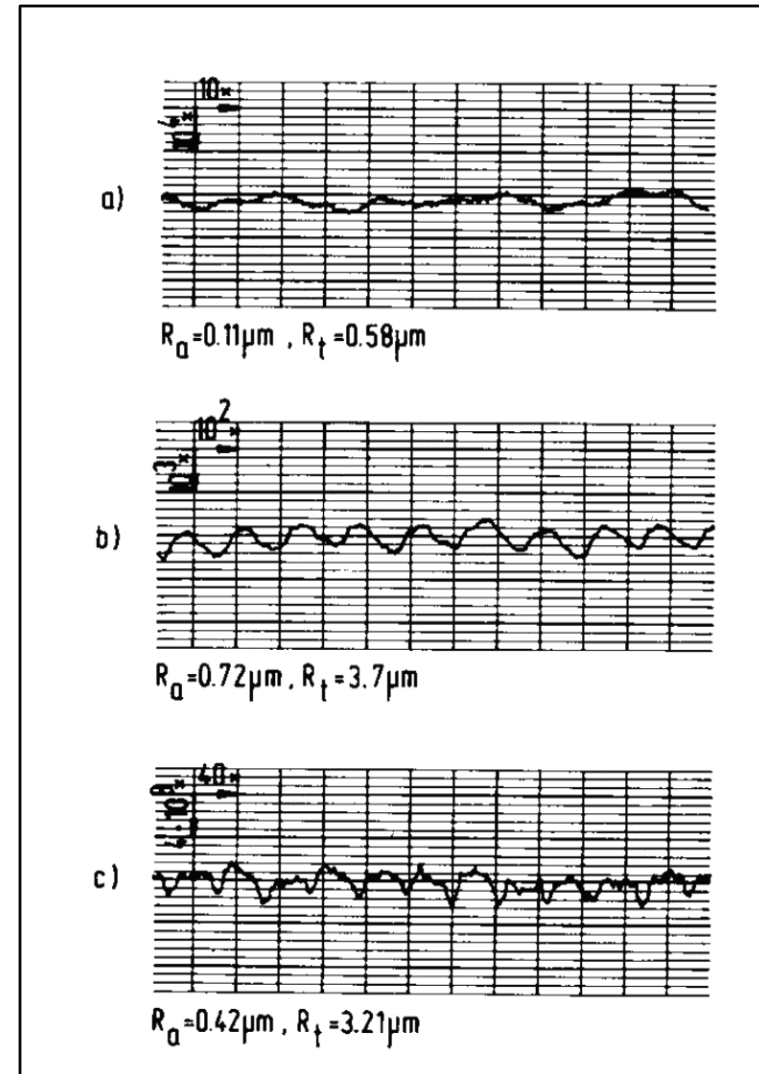
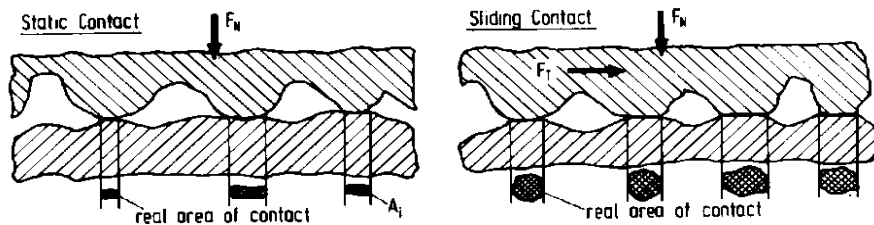
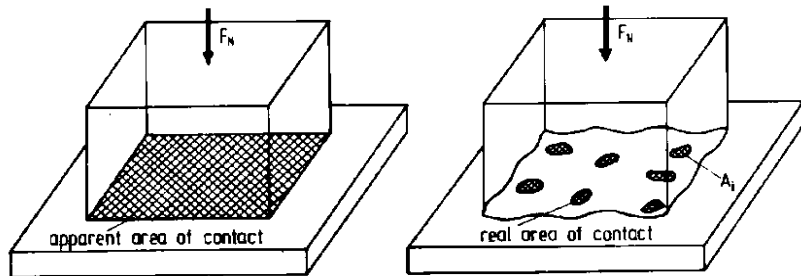
EFEITOS POSITIVOS

- **Sem** o atrito **não** seria possível **escrever** com um lápis;
- **Não** seria possível **andar**, ou **frear** um carro;
- Qualquer **objeto** colocado sobre um **plano** levemente **inclinado** **não pararia** no lugar.



Atrito depende da:

- **Rugosidade** das superfícies;
- **Área de contato real**, que é **diferente** da área aparente.



- a) polimento eletrolítico
- b) superfície torneada
- c) superfície laminada

Os principais fatores de desgaste são:

- **Material:** Dureza, tenacidade, composição química e microestrutura.
- **Processo:** Materiais em contato, pressão, velocidade, temperatura e acabamento superficial.
- **Outros:** Lubrificação, corrosão.

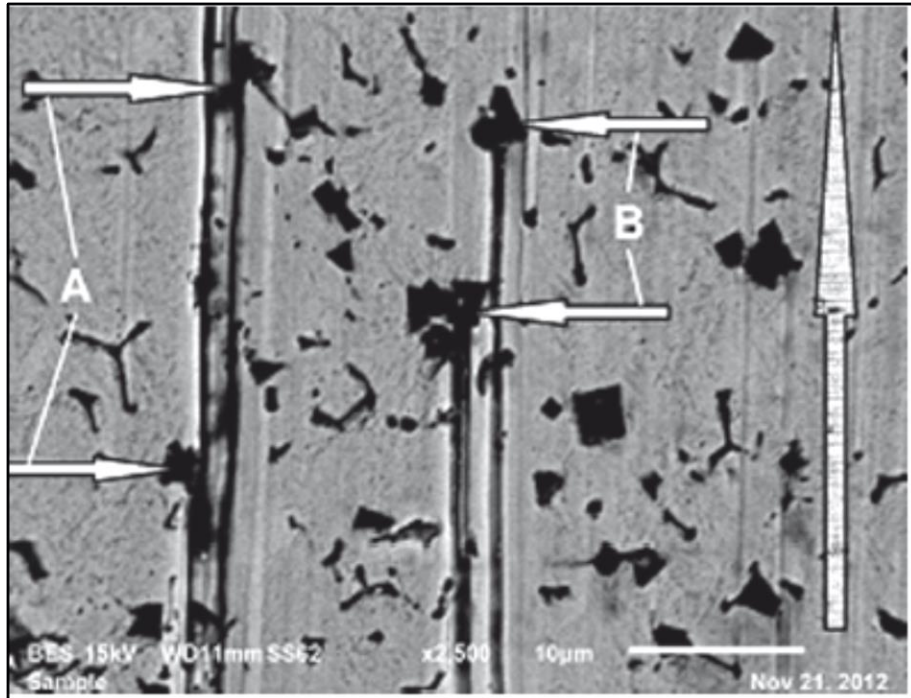
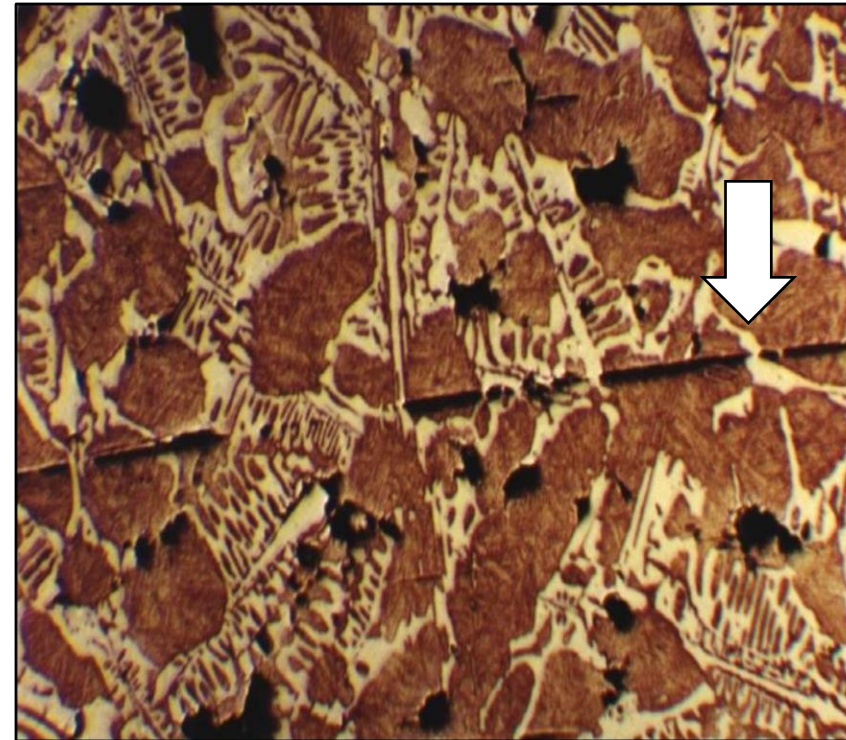


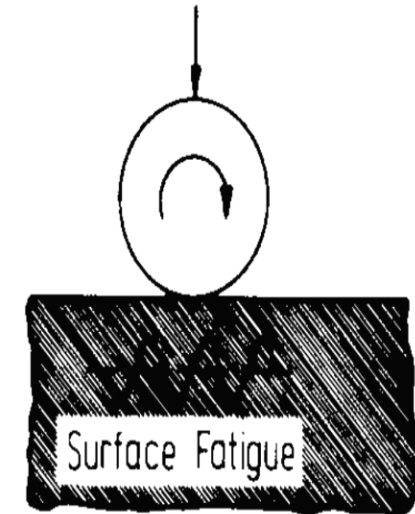
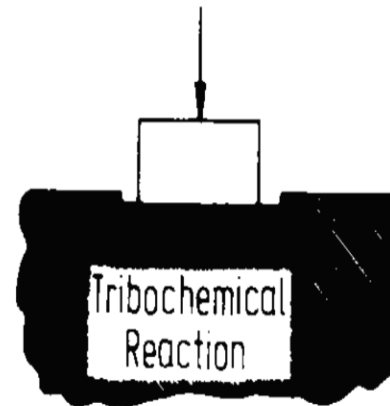
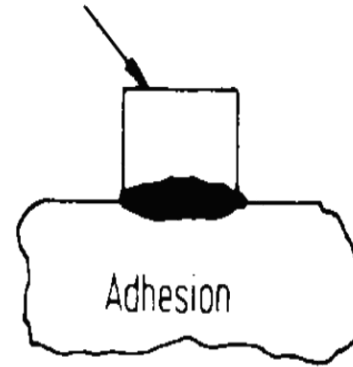
Imagem em MEV do mecanismo de desgaste, em revestimento duro de Fe-Cr-C-Ti em aço 1020. Nota-se que as partículas de TiC maiores barram o risco de desgaste (B)



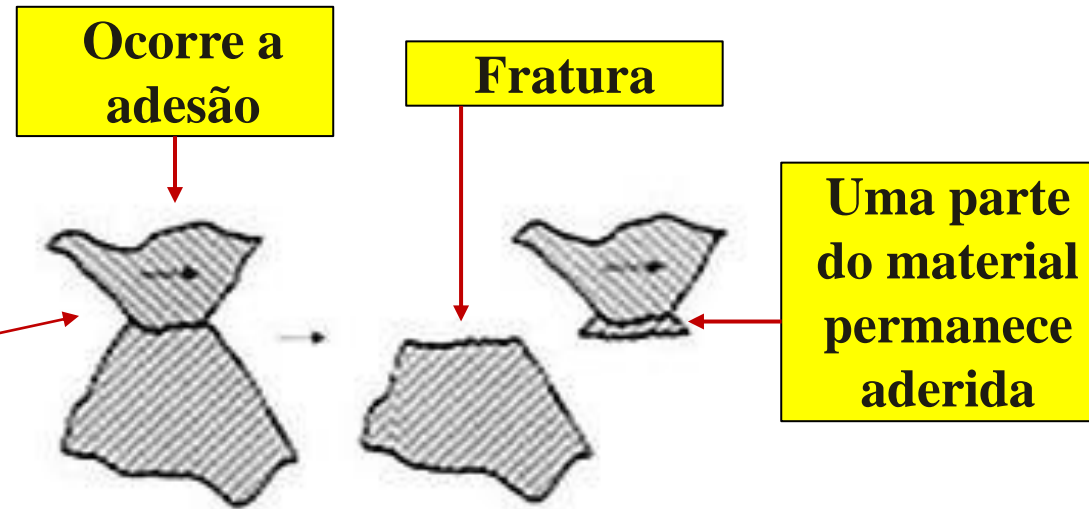
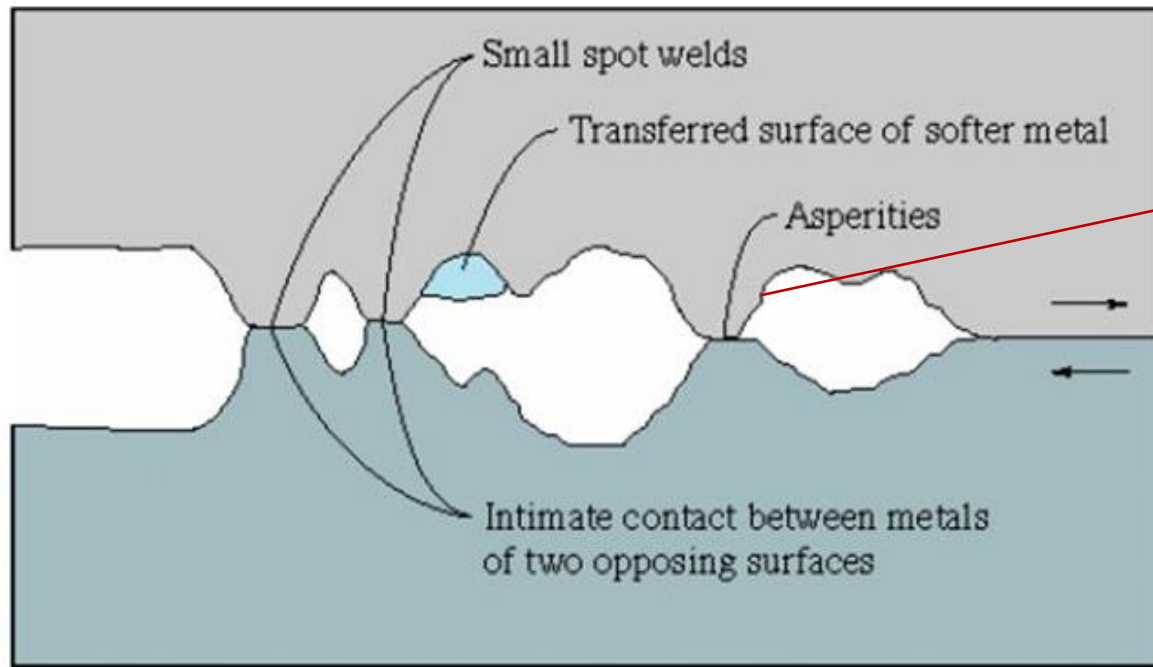
Risco de Desgaste em Cilindro de laminação (seta). Imagem de MO.

De acordo com a norma **DIN 50320** há **quatro** mecanismos básicos de desgaste :

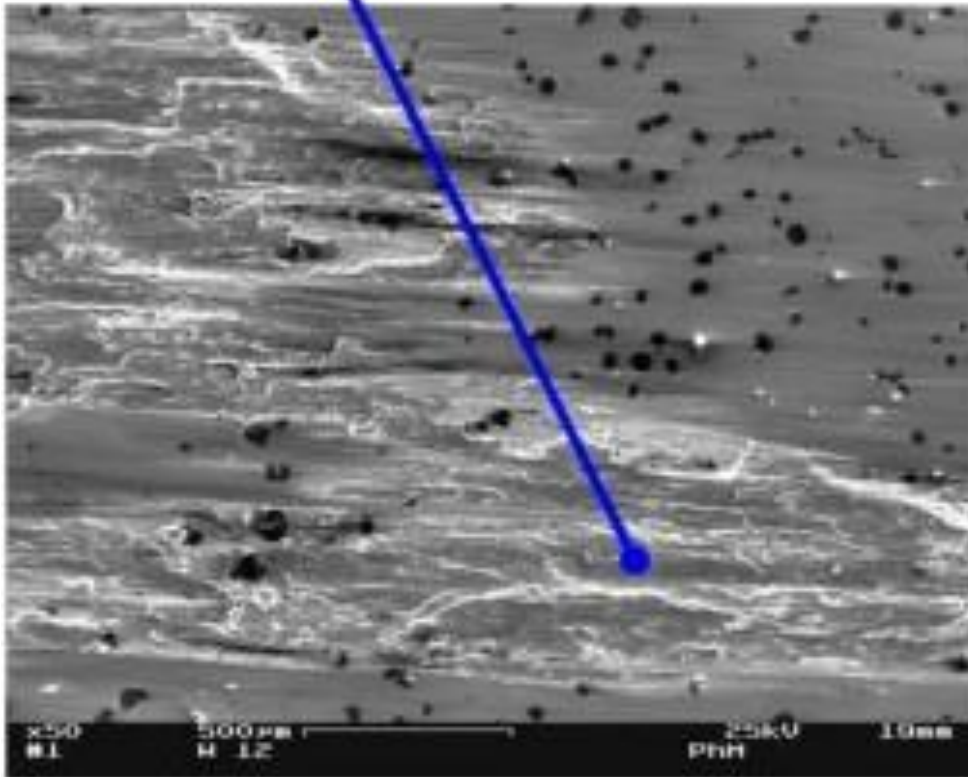
- Adesão;
- Abrasão;
- Reação tribo-química;
- Fadiga de superfície (contato/fretting).



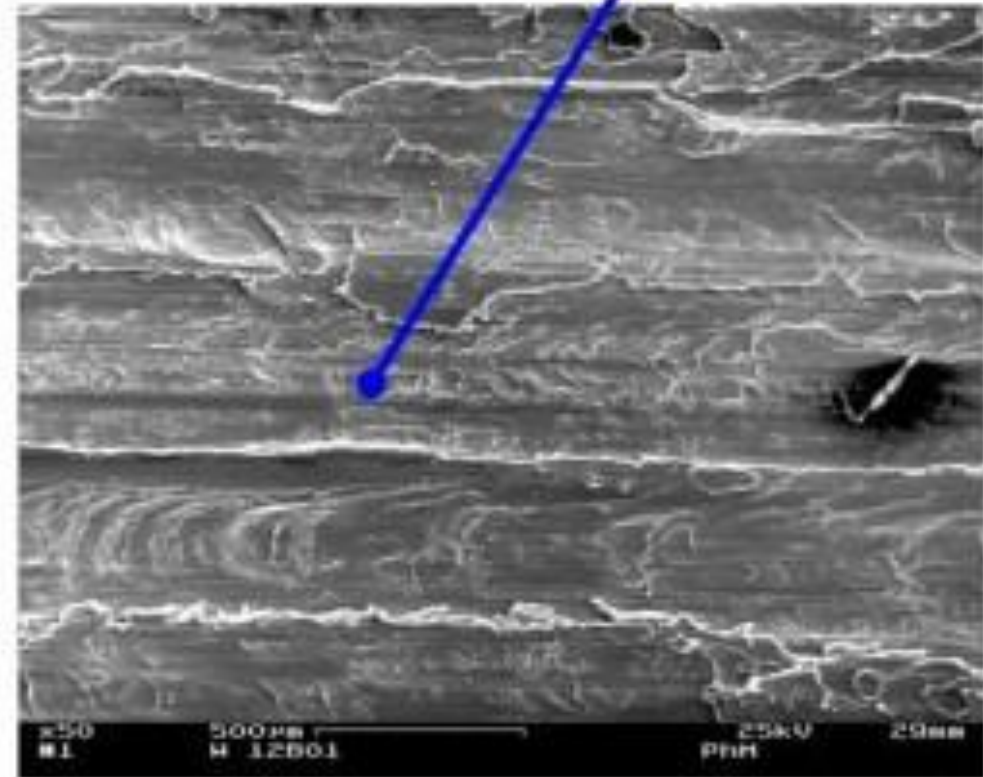
Desgaste adesivo: ocorre quando há **deslizamento** relativo entre **duas superfícies**. Pressões locais **muito altas** são exercidas pelas asperezas em contato, com **deformação plástica**, adesão e **formação de junções**.



Desgaste adesivo na ferramenta



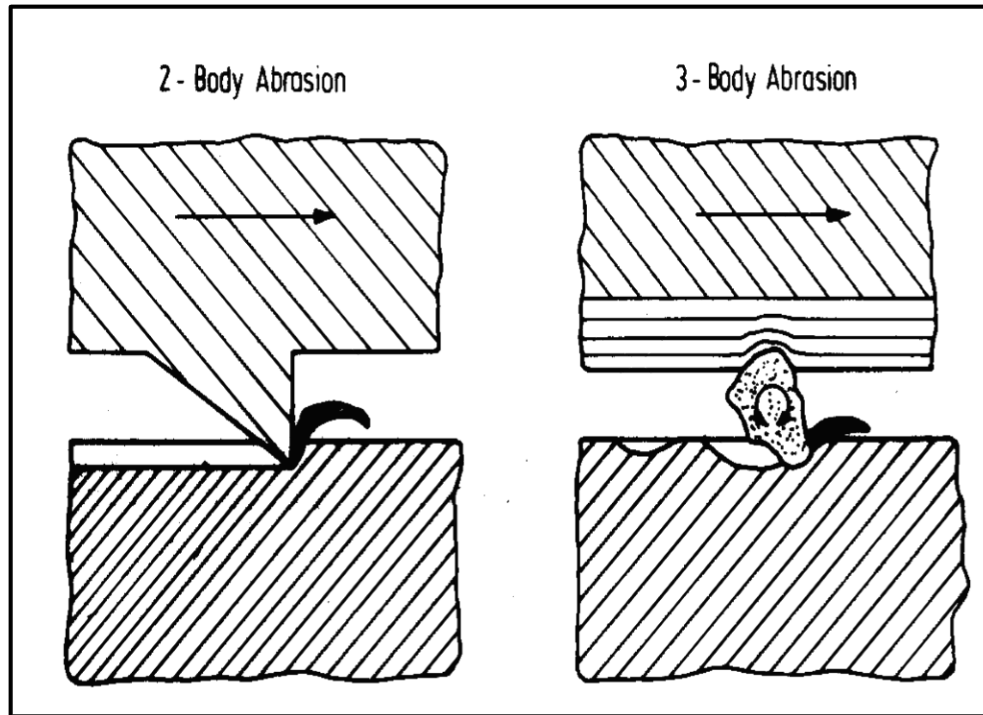
Zonas de cisalhamento na chapa



Desgaste adesivo ocorrido durante a conformação de chapas de alumínio na indústria automotiva

Desgaste abrasivo: ocorre quando há **descolamento** de material provocado por **partículas de alta dureza** existentes entre as duas superfícies em movimento.

As **partículas de alta dureza** podem ter diversas origens como: produto do **processamento** de minérios (**sílica, alumina, etc.**), **fragmentos** metálicos altamente **encruados** removidos das superfícies em contato ou **partículas** que se desprendem das **asperezas de usinagem**.



Abrasão a dois corpos e a três corpos

Antes

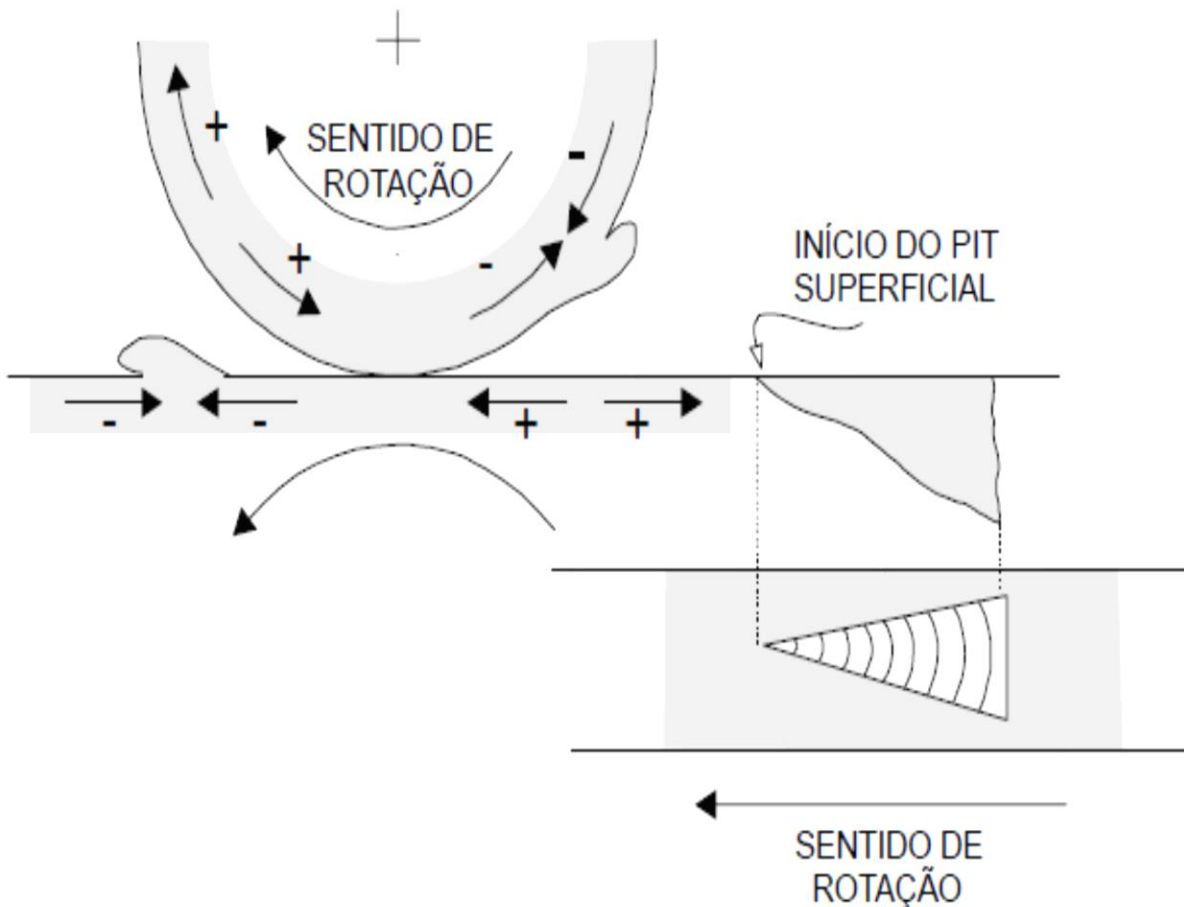


Depois



Desgaste por fadiga (fadiga de contato): ocorre pela formação de trincas superficiais ou sub-superficiais devido a aplicação de cargas alternadas repetidas, formando “pites” de fadiga (em forma de triângulos), que podem evoluir para o **lascamento** do material (“spalling”)

Sequência do fenômeno: deformação elástica, seguida de deformação plástica, encruamento, nucleação de trinca e propagação da trinca.



FRETTING-FADIGA

Duas superfícies em contato constante sob vibração: pode ocorrer “**desgaste adesivo**”, formação de “debris” (rebarba, dano), que acelera a nucleação da trinca de fadiga. Principal característica: a **nucleação** da trinca ocorre a certa **distância do local de maior concentração** de tensão ou de concentradores de tensão.

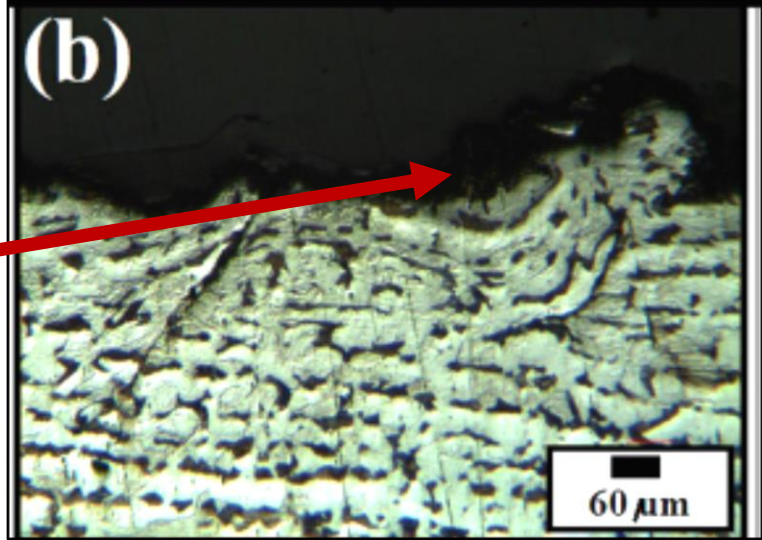
Diferença em relação à fadiga de contato: **no fretting, contato é constante e não intermitente.**

Teoria da delaminação: com a **vibração, partículas se desprenderiam** do metal que se **oxidariam (formando um pó de cor escura – indício de fratura por fretting)**, tendo sua **dureza incrementada**. Essas partículas provocariam **microdesplacamento** nas peças em contato, criando **espaço** para o **movimento relativo** entre as mesmas, levando ao **desgaste abrasivo de terceiro corpo**, favorecendo a **nucleação de uma trinca**. Caso haja o **esforço cíclico envolvido: fretting-fadiga.**

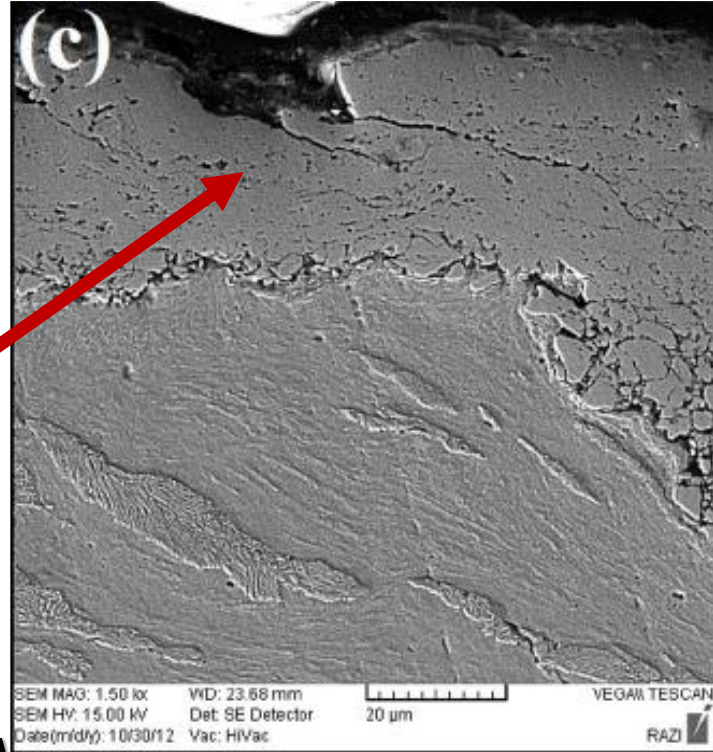
FRETTING-FADIGA



DEBRIS



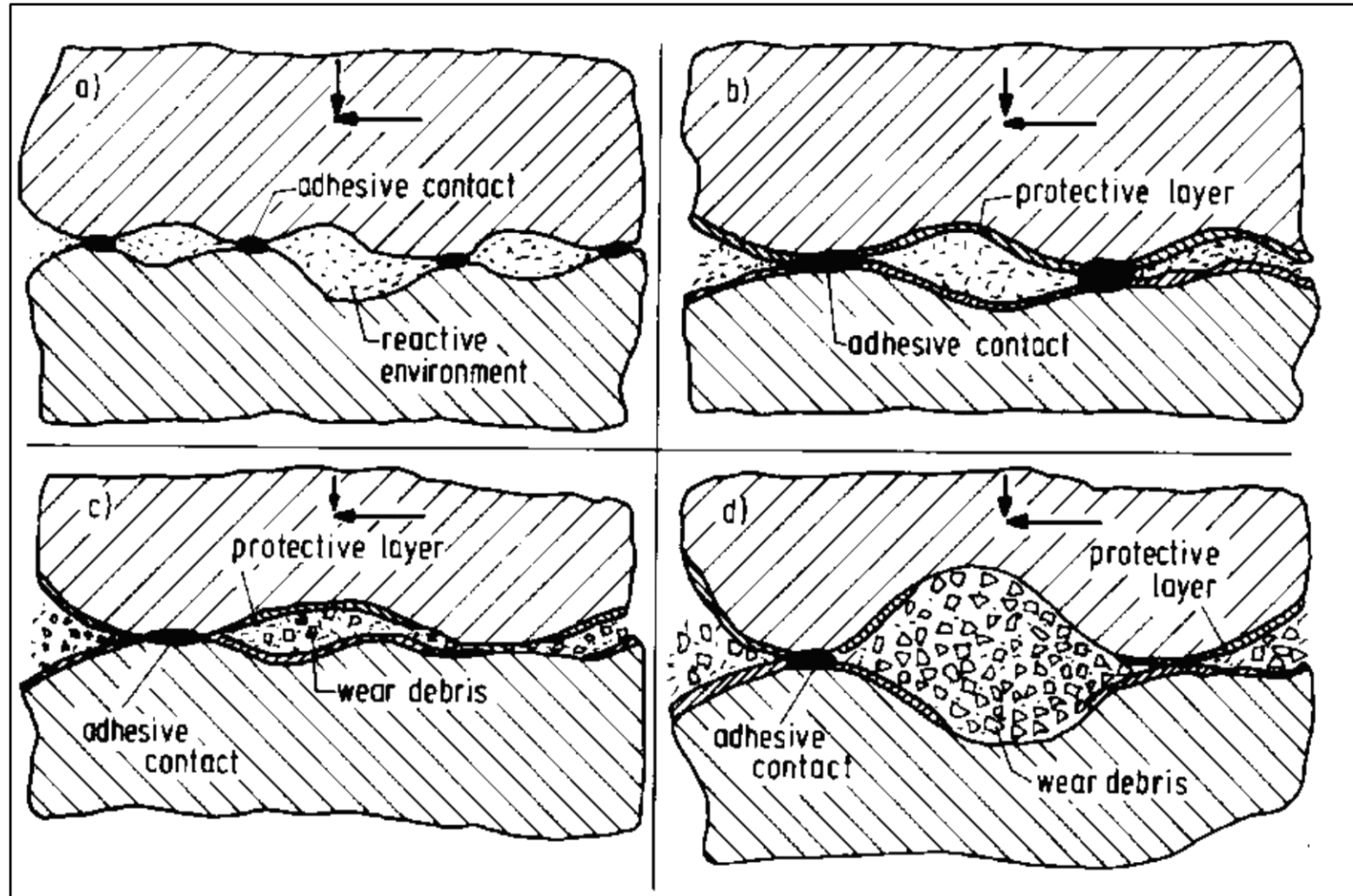
NUCLEAÇÃO DAS TRINCAS DE FADIGA A PARTIR DOS “DEBRIS”



Prof. Dr. José Benedito Marcomini

Desgaste por reação tribo-química: pode ser caracterizado como sendo decorrente do contato de duas superfícies em movimento e que reagem com o ambiente.

O desgaste se processa pela contínua remoção e nova formação de camadas de produtos de reação sobre a superfícies em contato.

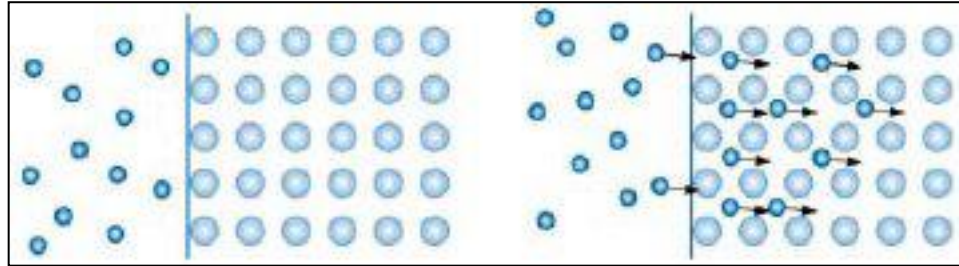


Tipos de Tratamentos Termoquímicos

Os Principais tipos de tratamentos termoquímicos são:

- Cementação (C);
- Nitretação (N);
- Cianetação (CN);
- Carbonitretação (C + N);
- Nitrocarbonetação (N + C);
- Boretção (B);
- Tratamentos Termorreativos ($C_x + N_x + C_yN_{2x}$) (V, Nb, Ta, Cr, W e Mo).

Difusão Termoquímica



“É a matéria sendo transportada através da matéria”

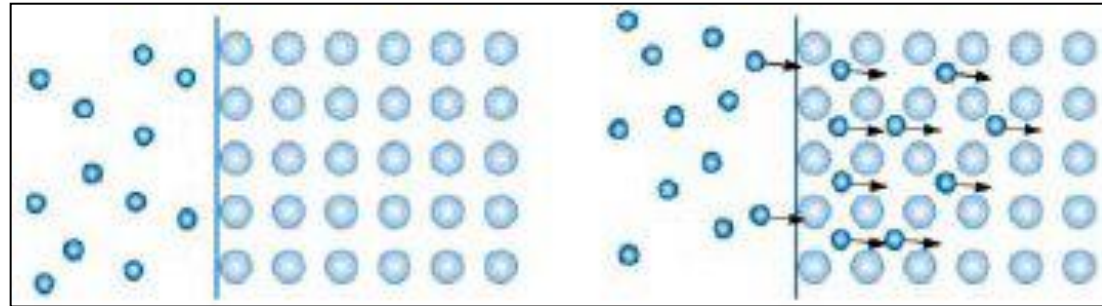
No caso das ligas, a difusão é realizada concomitantemente pela:

- Superfície;
- Contorno de Grão;
- Através do volume sólido (Grão).

Dentro dos grãos a movimentação dos átomos se dá:

- Através dos defeitos na rede cristalina;
- Através dos interstícios;
- Forçosamente substituindo átomos.

Difusão Termoquímica



A difusão termoquímica recebe este nome, pois a energia de ativação “Q” é a energia térmica.

Assim sendo:

$$Q_{\text{volume (grão)}} > Q_{\text{contorno de grão}} > Q_{\text{superfície}}$$

Os gradientes energéticos facilitam a movimentação de átomos através da estrutura sólida. A facilidade de difusão é inversamente proporcional a maior quantidade de energia de ativação (coeficiente de difusão).

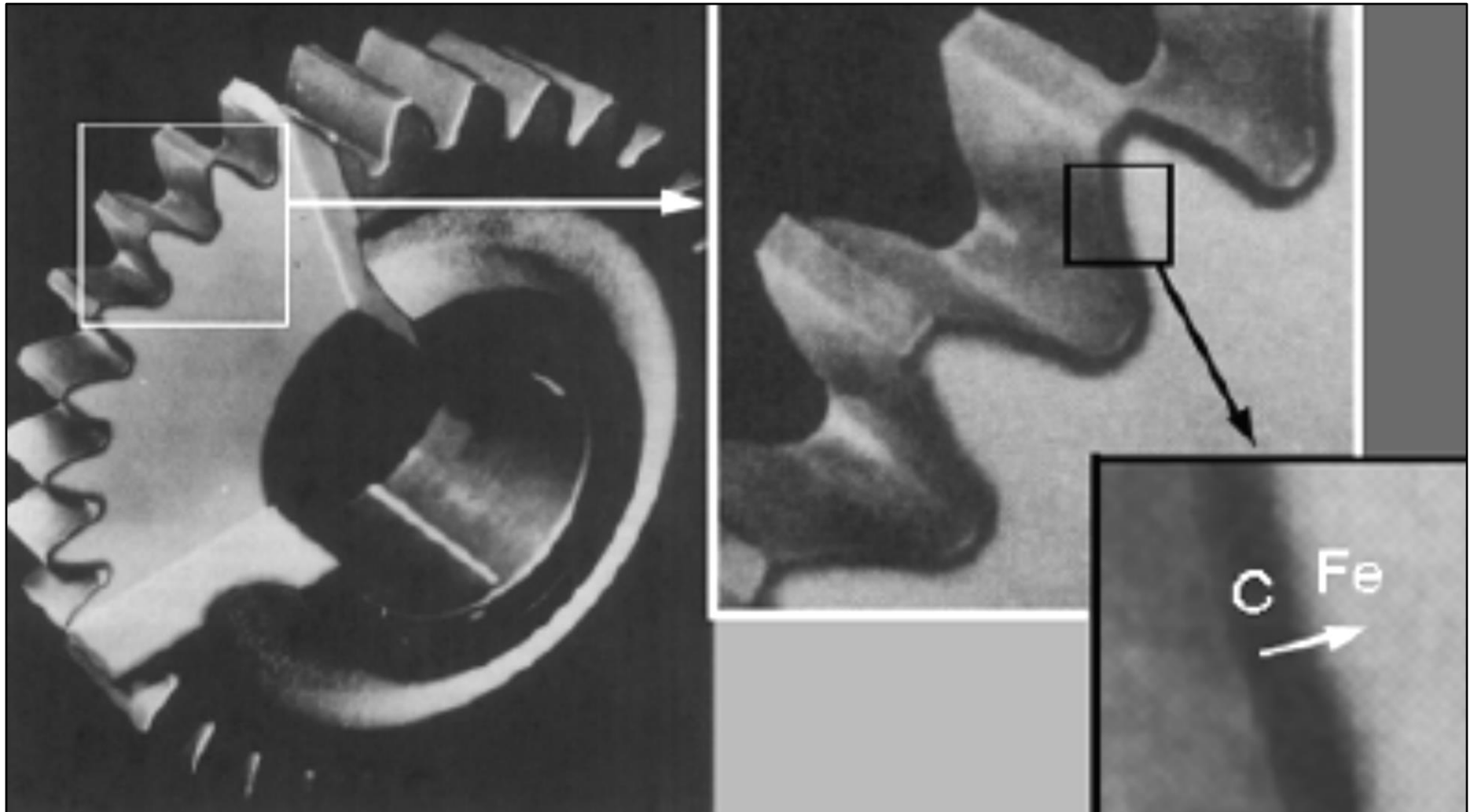
Cementação/Carbonetação

Definição: Define-se como **Cementação** ou **Carbonetação** a introdução de **Carbono** na **superfície** do aço de modo que, depois de temperado, esta superfície apresente-se mais **dura** que as demais partes da peça tratada.

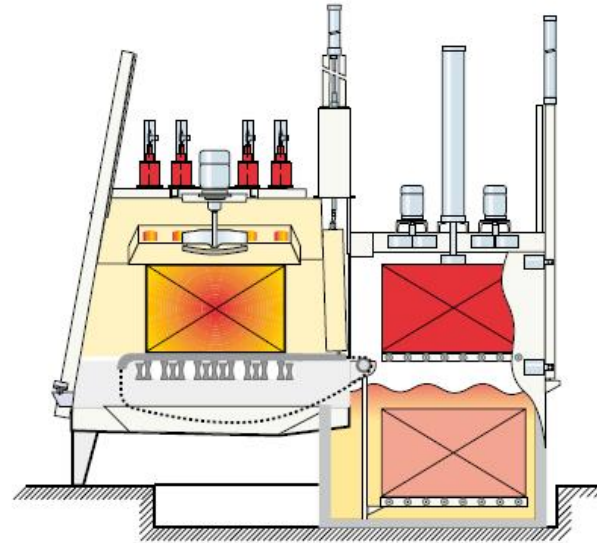
Tipos Cementação:

- Sólida ou “em caixa” - (Resfriamento lento e C sólido);
- Líquida – Através de banhos de sais fundidos;
- Gasosa – Utilização de gases (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , etc.);

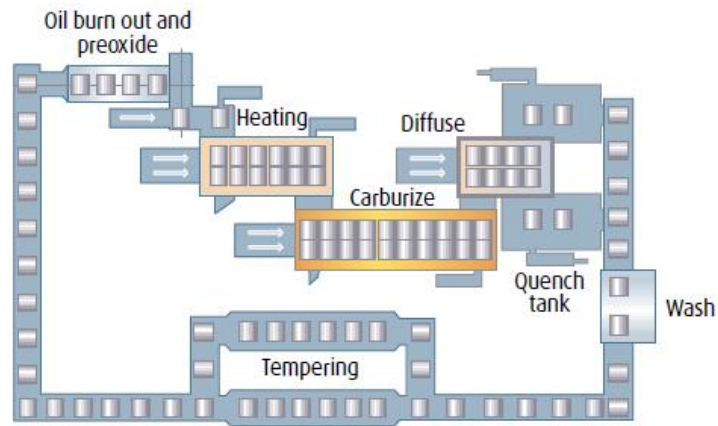
Cementação



CEMENTAÇÃO

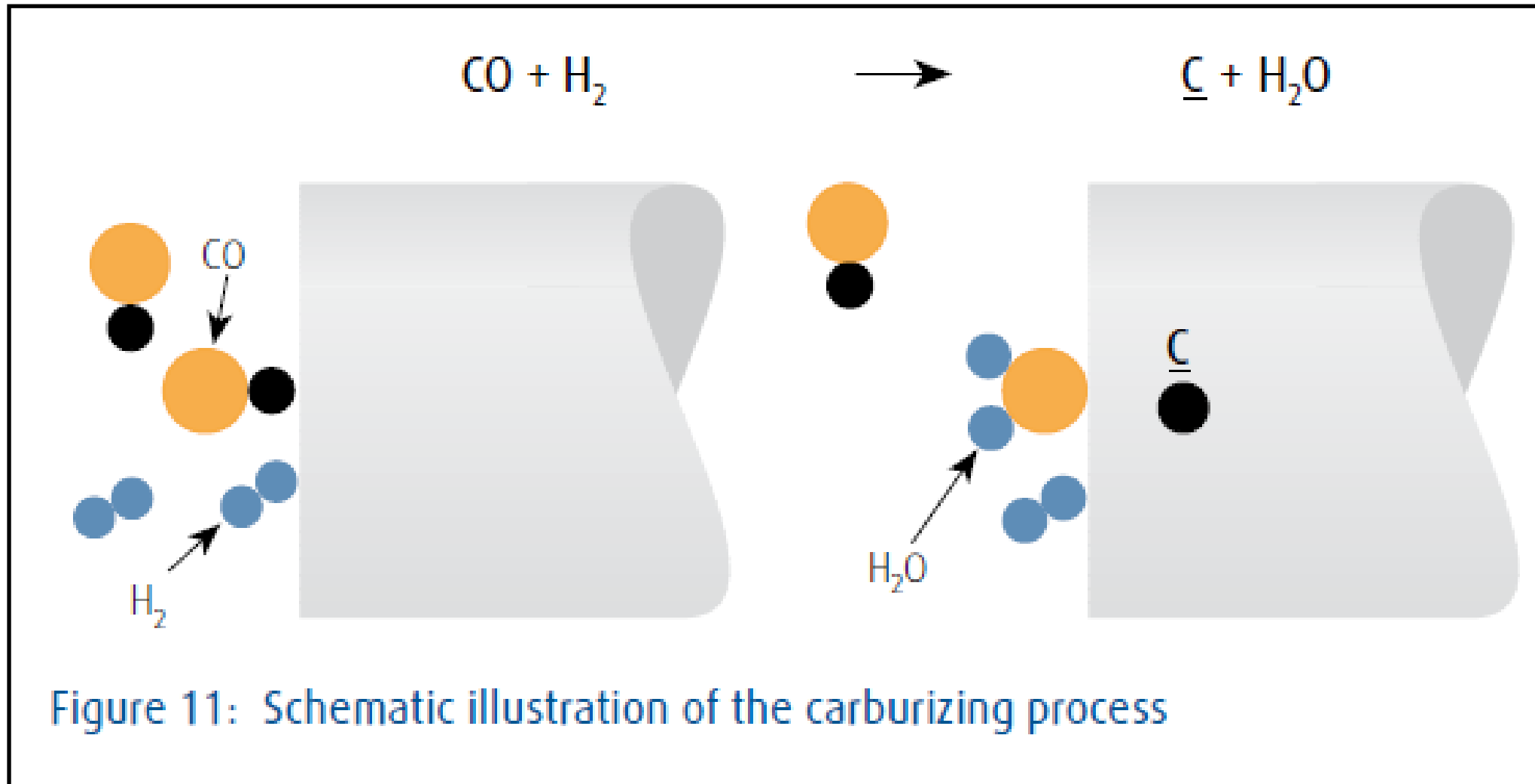


a



(Adaptado de : <http://www.techgaz.ru/>)

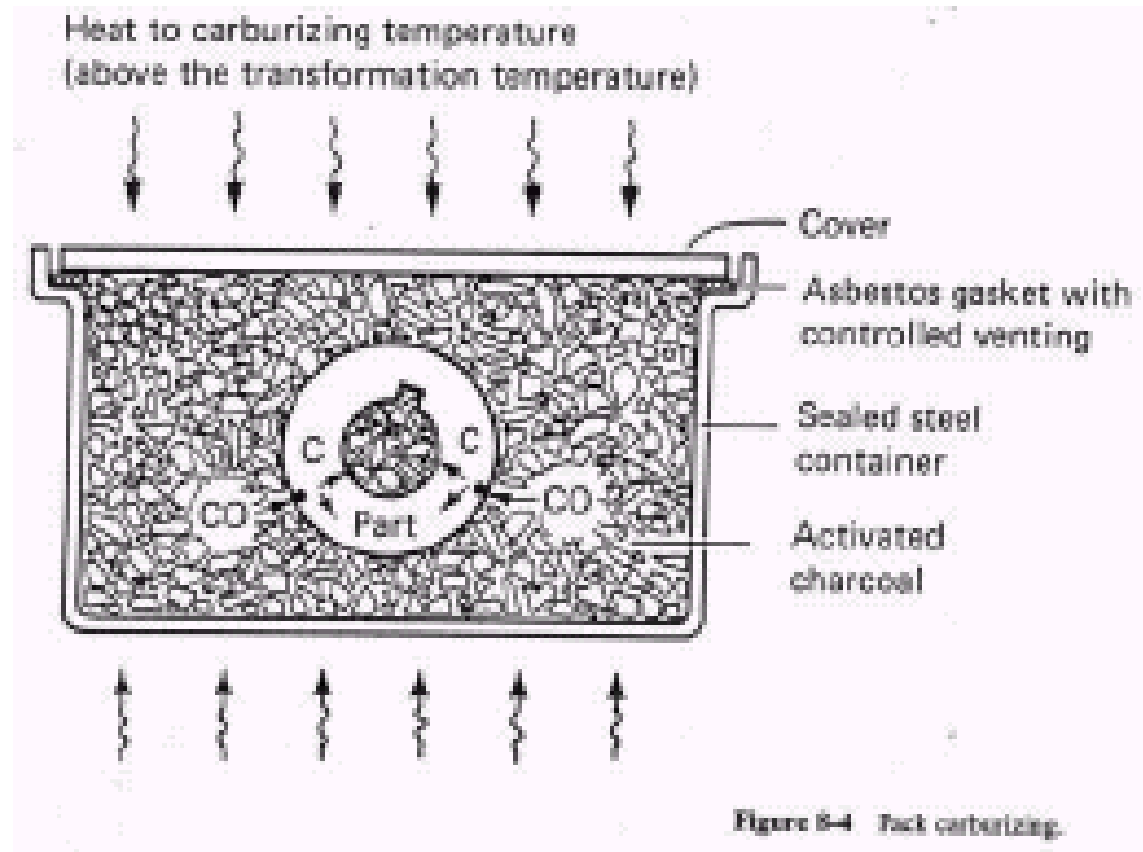
CEMENTAÇÃO



(Adaptado de : <http://www.techgaz.ru/>)

CEMENTAÇÃO EM CAIXA

Pack carburizing

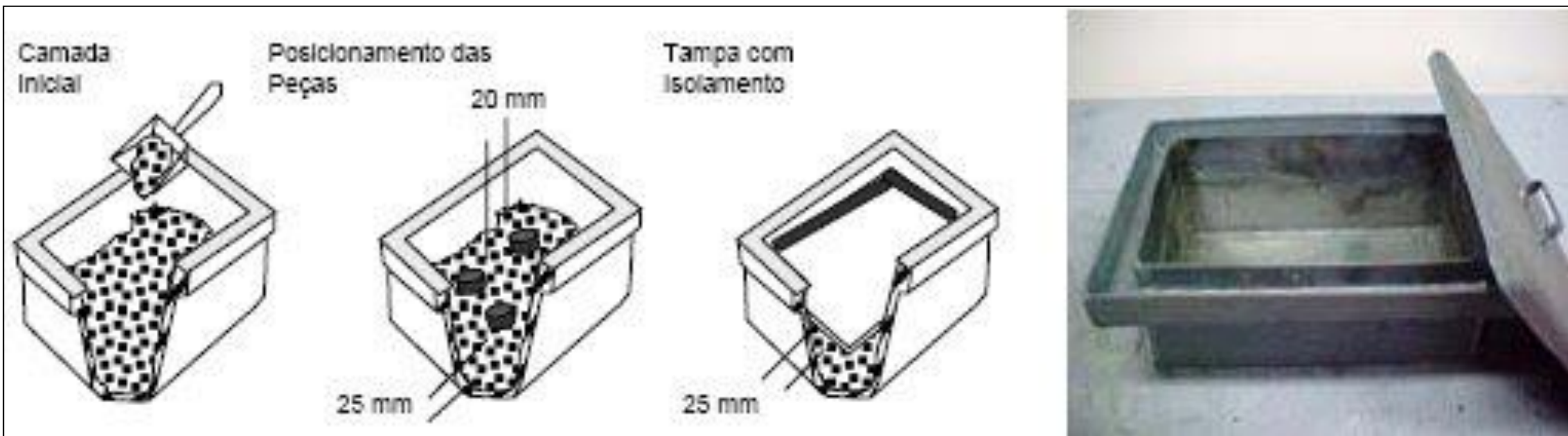


Cementação sólida ou em caixa

- $\text{Carvão} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
- $\text{Carvão} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}$
 - Gás tóxico e muito venenoso
- $\text{BaCO}_3 + \text{Carvão} \rightarrow \text{BaO} + \text{CO} + \text{Energia}$
 - Substância ativadora (ou outros carbonatos);
- $[2 \text{CO} + 3\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2]$
- $[(\text{C}) + 3\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}]$

Cementação sólida ou em caixa

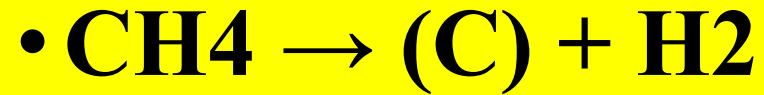
- Substâncias carbonáceas sólidas são utilizadas por isso é chamada de cementação sólida;
- Misturas carburizantes (fonte de carbono): carvão de madeira; aglomerado com 5% à 20% de óleo comum ou óleo de linhaça;
- Substância ativadora (50% à 70% de carbonato de bário).



Cementação sólida ou em caixa

- Utilização de grande variedade de Fornos;
- Precisam de resfriamento lento após a cementação;
- Dificuldade de desempacotamento das peças
- Processo de cementação mais lento;
- Temperaturas usuais: 815 a 955°C (às vezes 1095°C);
- Profundidade da camada cementada (0,6 a 5,0 mm);
- Material das caixas: aço carbono revestida de alumínio, aço inox ou aço C.

Cementação Gasosa



80 a 90% do gás natural (gás metano);



10 a 20% do gás natural (gás etano);



(gás propano)

Cementação Gasosa

Características

- Cementação mais limpa que a sólida;
- Tratamento mais complexo (segurança, controle e técnica de operação);
- Profundidade da camada cementada: 0,5 a 2,0mm;
- Equipamento de cementação gasosa é bastante caro (Possibilidade de processo contínuo);
- Temperatura e tempo (profundidade de difusão);
- Possibilita têmpera direta (Evitando o resfriamento).

Cementação Gasosa: Equipamentos



Forno para cementação gasosa à atmosfera controlada.

Cementação por banho de sais: Cementação Líquida.

- $2 \text{NaCN} \rightarrow \text{Na}_2\text{CN}_2 + (\text{C})$
- $2 \text{CO} + 3\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2$
- $\text{NaCN} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{NaCNO} + \text{CO}$
- Profundidade da camada cementada:
 - Banhos para baixa temperatura: 0,13 a 0,25mm;
 - Banhos para alta temperatura: 0,5 a 3,0mm;
- Proteção efetiva contra a descarbonetação;
- Produz resíduos tóxicos de cianeto.

Cementação por banho de sais: Cementação Líquida



Forno para cementação líquida- com aquecimento externo.

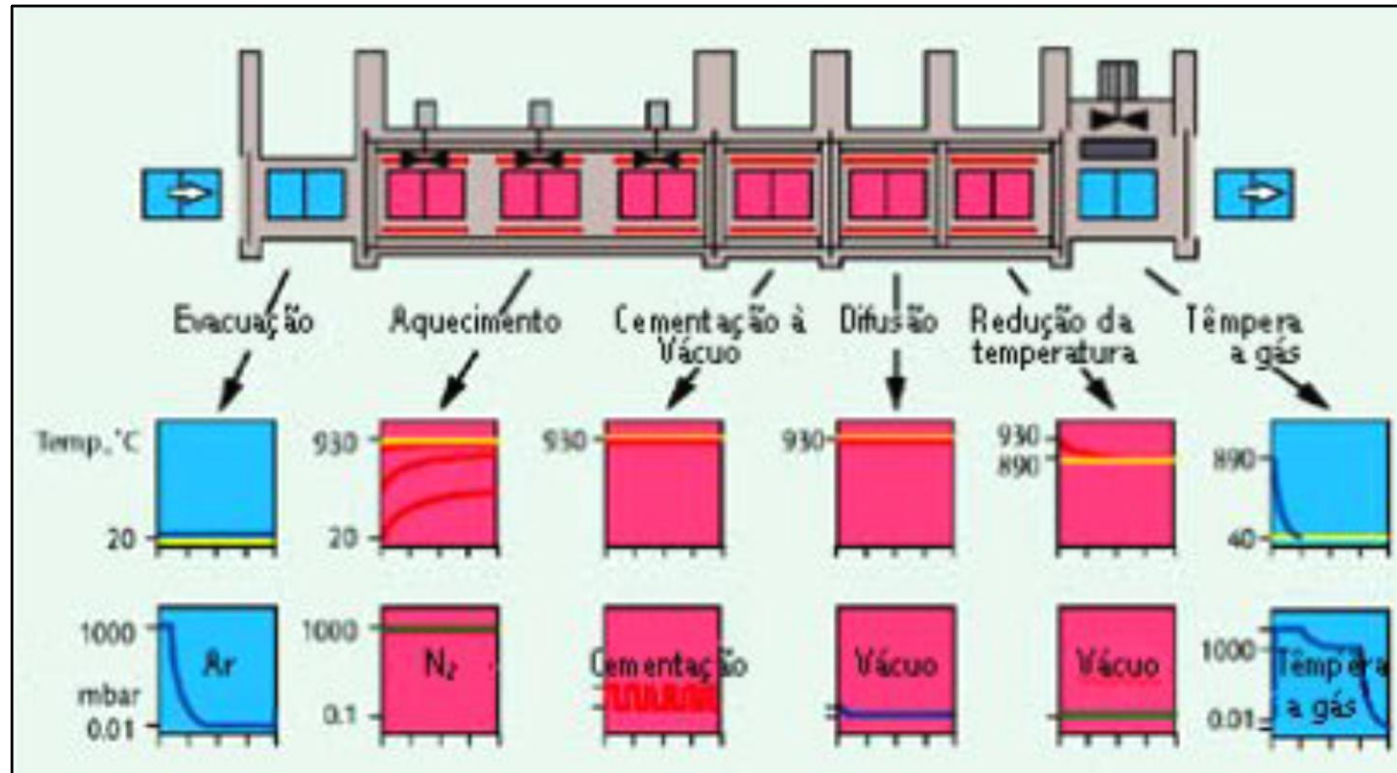
Cementação por banho de sais: Cementação Líquida



Forno para cementação líquida- com aquecimento externo.

Cementação a Vácuo

Processo similar a cementação gasosa. Os gases são evacuados e preenchidos com gás nitrogênio. As peças são imediatamente temperadas.



Cementação a Vácuo



Forno de câmara simples.

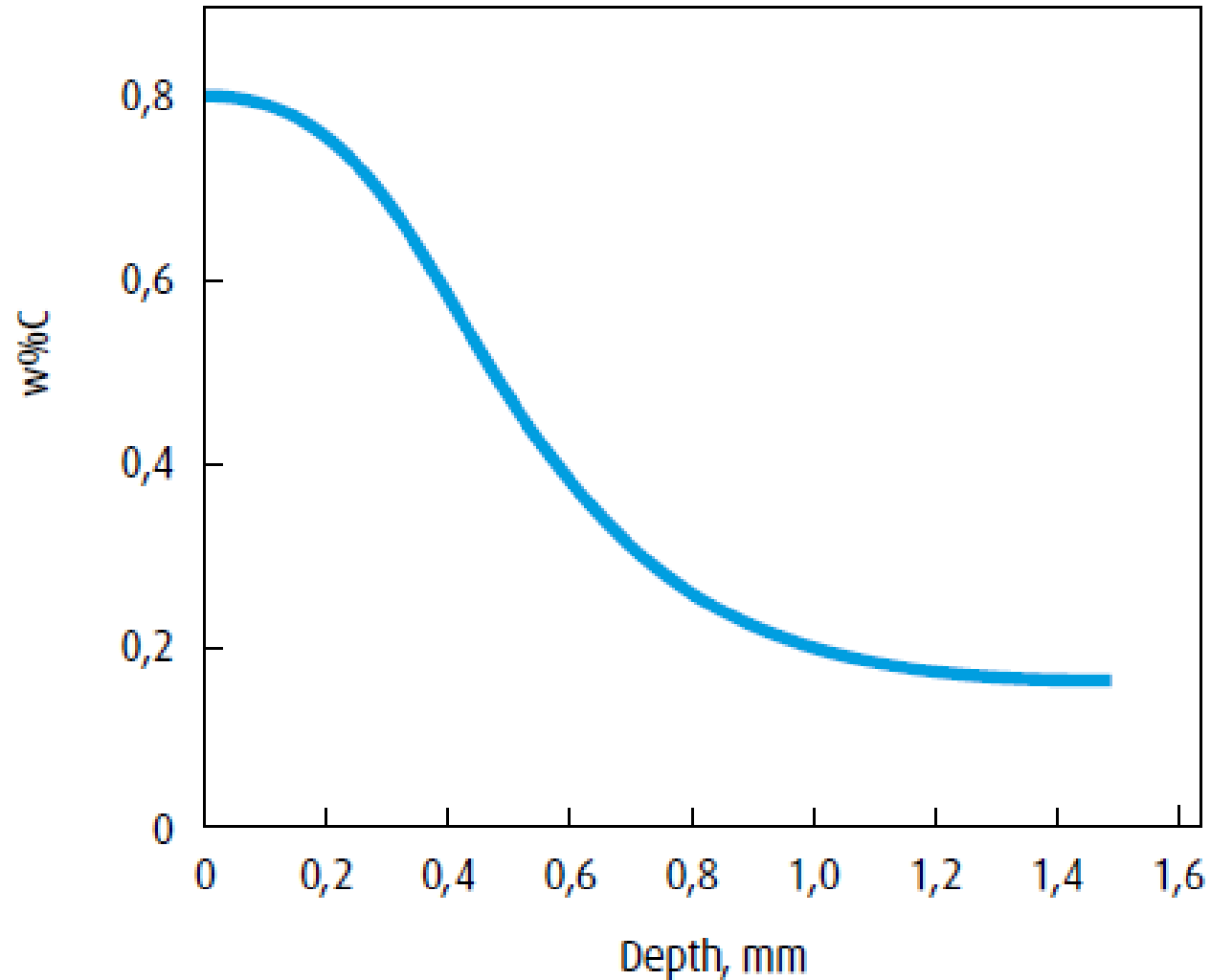
Cementação a Vácuo



Forno de câmara dupla.

CEMENTAÇÃO

VARIAÇÃO DO TEOR DE CARBONO COM A PROFUNDIDADE

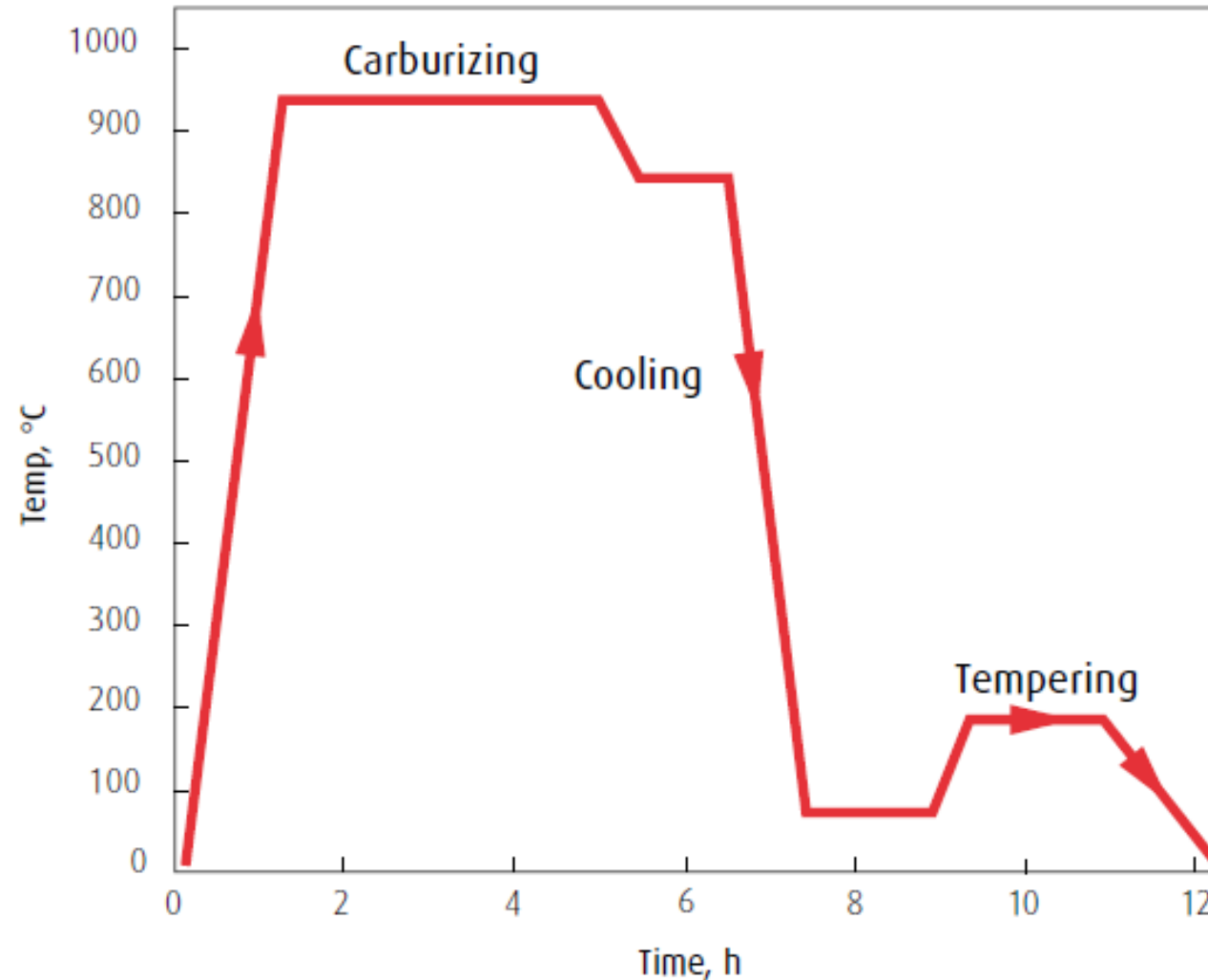


(Adaptado de : <http://www.techgaz.ru/>)

Tratamentos Térmicos na Cementação

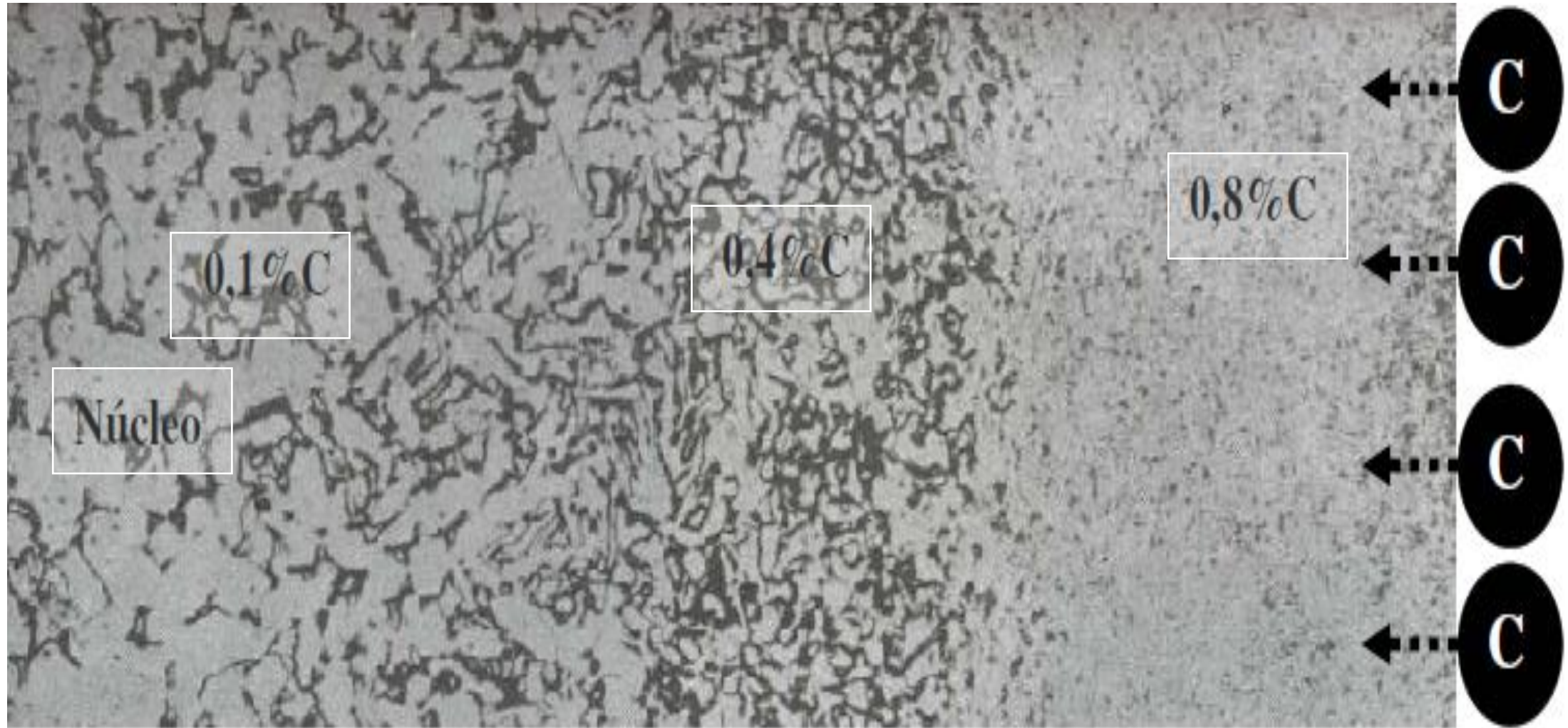
- **Normalização: Refina a estrutura** e melhora o resultado final da cementação. É realizada antes do processo de cementação;
- **Têmpera e revenimento: Aumento da dureza** (maximização da capacidade de endurecimento conseguida pela cementação).
Revenimento: alívio das tensões excessivas da têmpera. Acontece posteriormente ao tratamento de cementação.

PROCESSO DA CEMENTAÇÃO

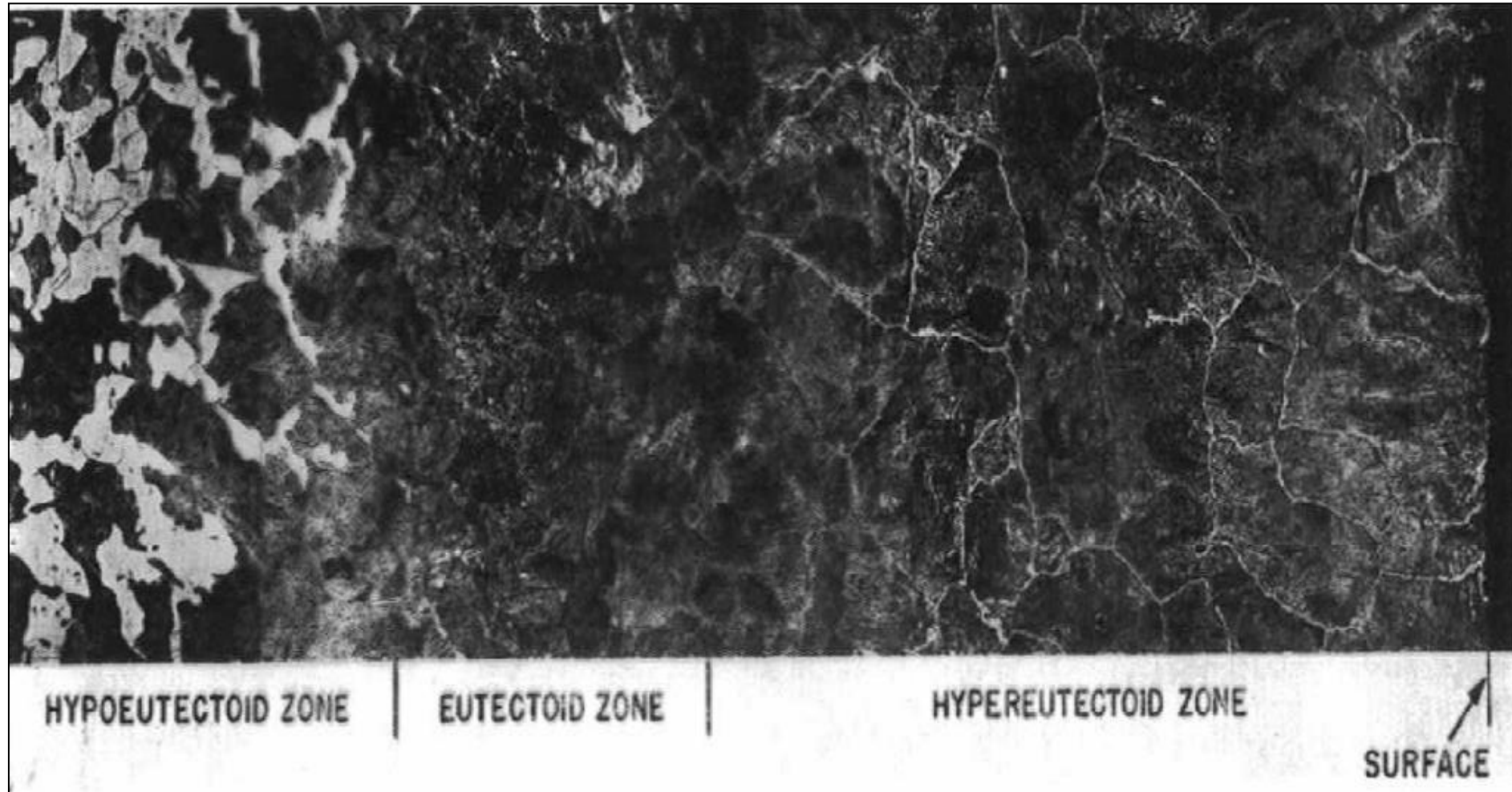


(Adaptado de : <http://www.techgaz.ru/>)

CEMENTAÇÃO



Microestructura Cementada



CEMENTAÇÃO

Microhardness through case depth

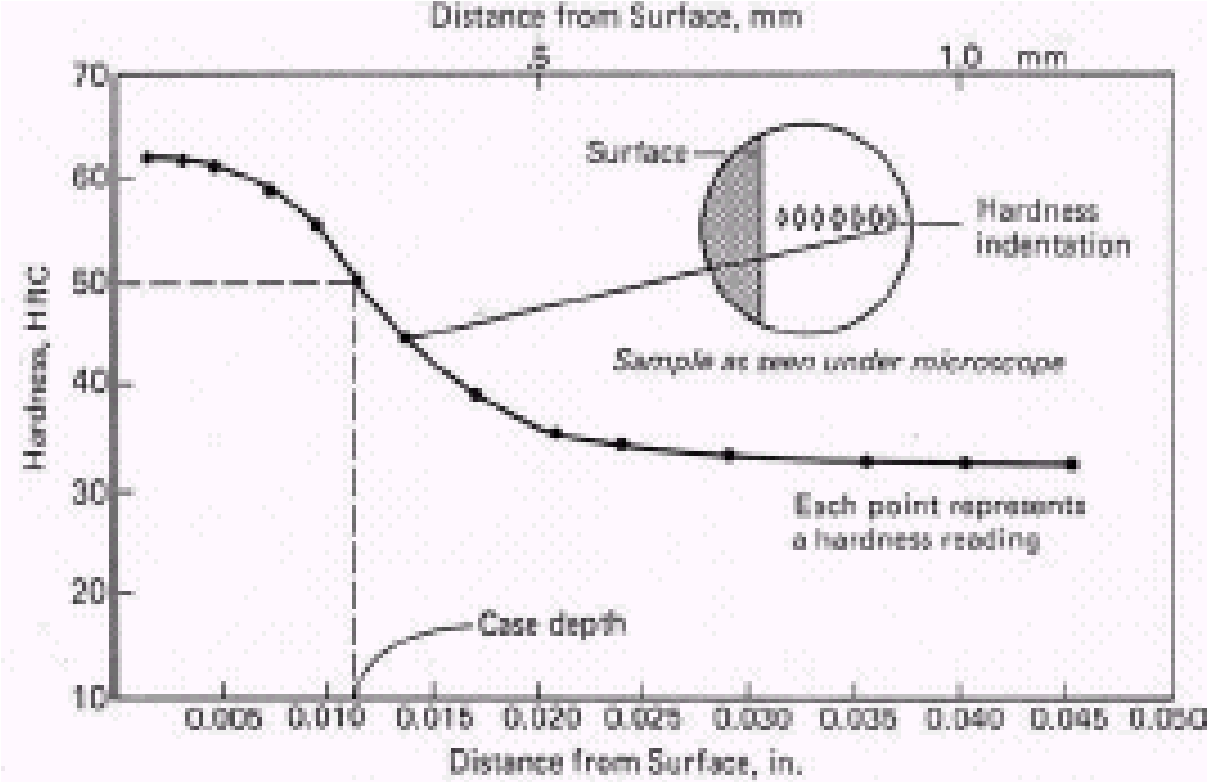


Figure 8-6 Determination of case depth by microhardness survey.

Properly carburized gear teeth

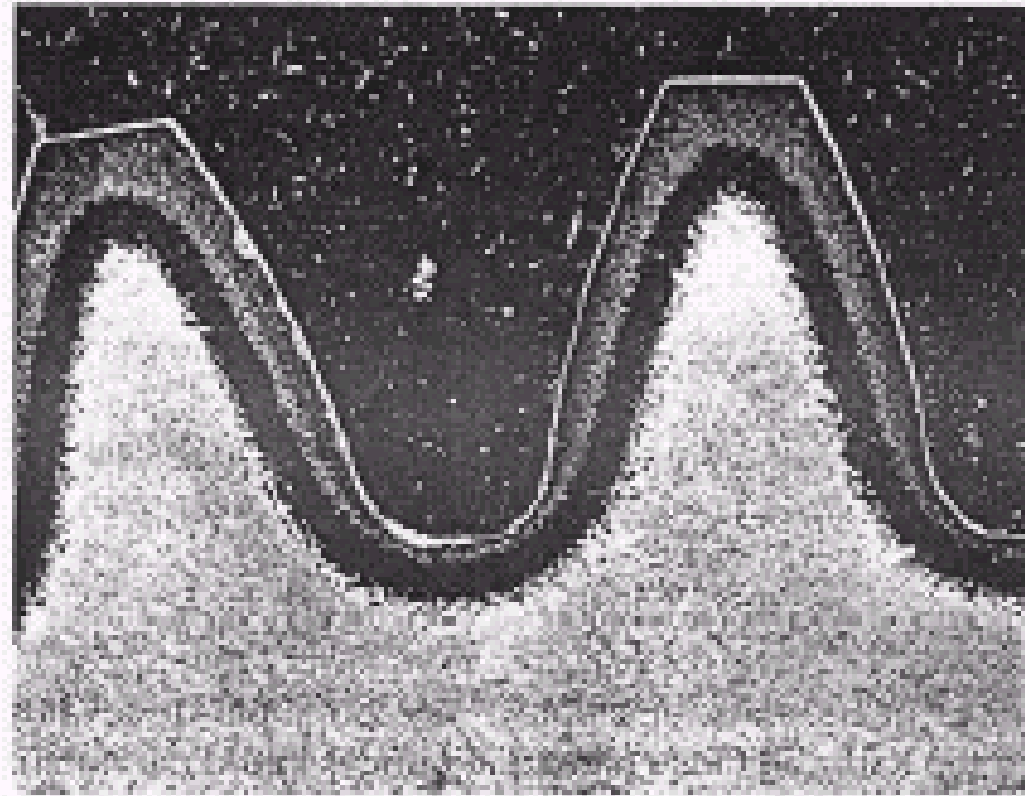
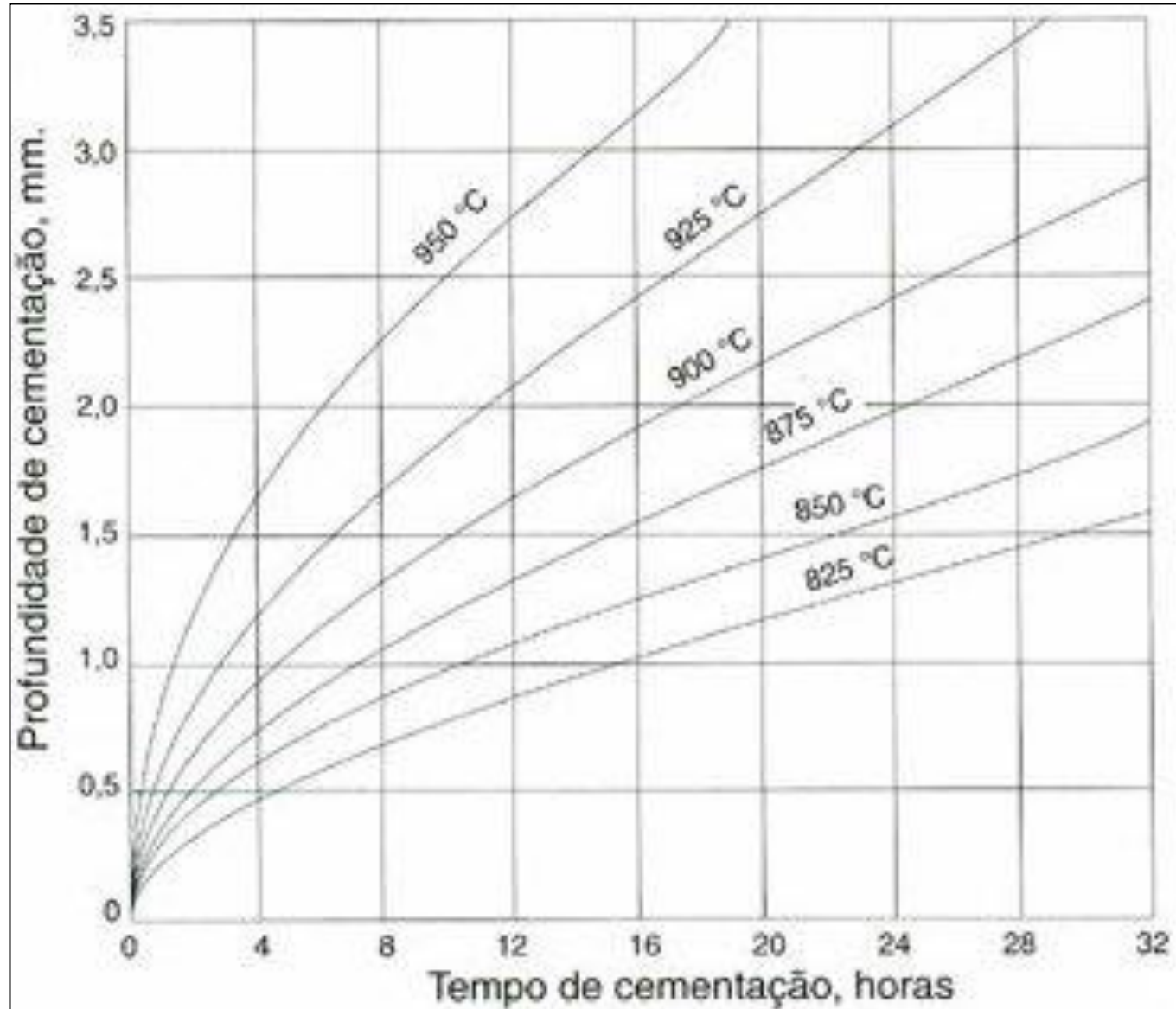


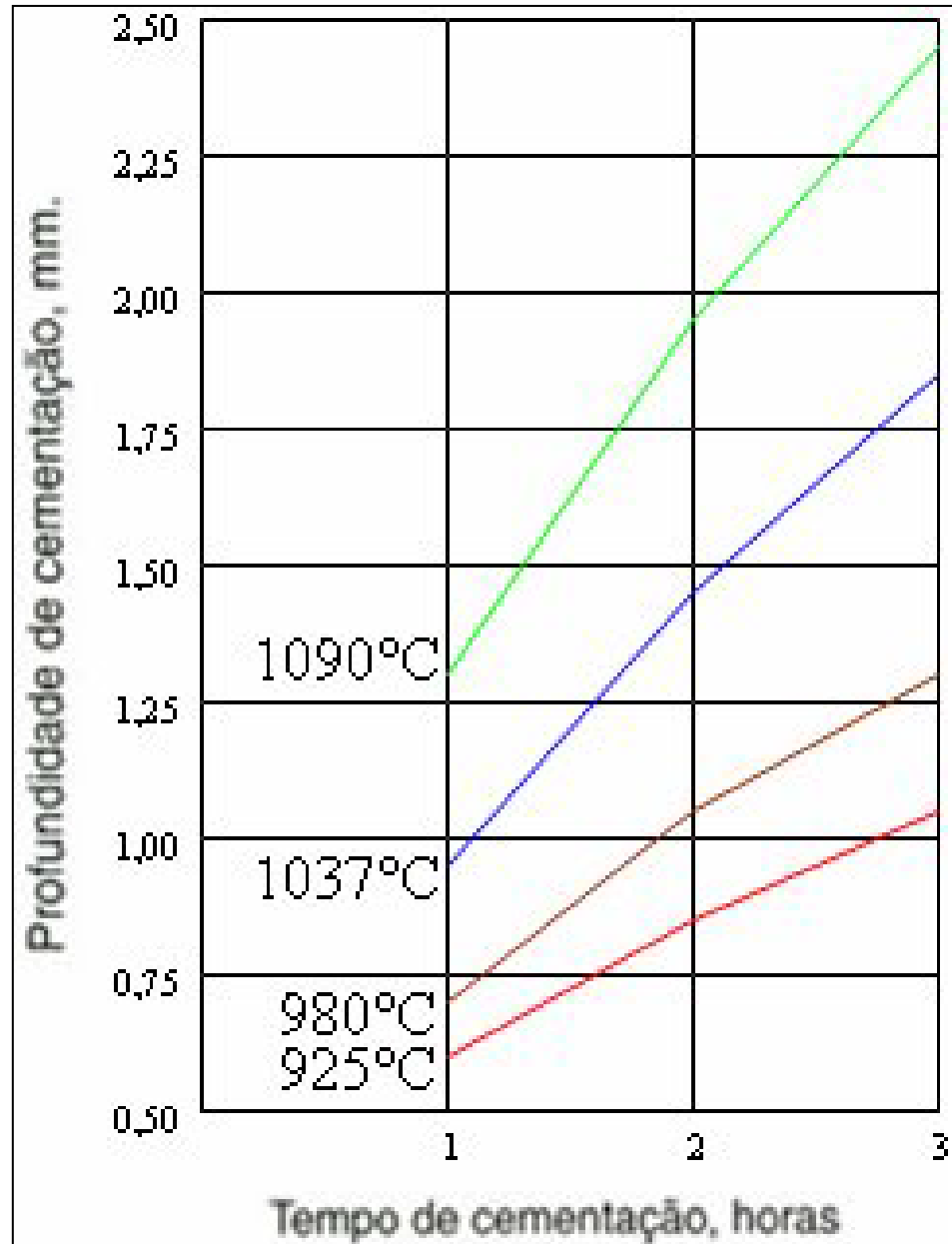
Fig. 8-76 A properly carburized, hardened, and tempered gear. Etched in 2 percent nital, 7X.

Cementação



Relação entre profundidade e temperatura na cementação

Cementação a altas temperaturas



Cuidado com crescimento de grão!

DIFUSÃO EM ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO

2ª. LEI DE FICK - CEMENTAÇÃO

SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL DA 2ª LEI DE FICK PARA CEMENTAÇÃO

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dX^2} = \frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

ou

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

C_s : concentração na superfície do gás que difundiu-se ao interior;
 C_0 : concentração inicial, uniforme, do elemento no sólido
 C_x : concentração do elemento, a x da superfície no instante t
 x : distância à superfície
 D : coeficiente de difusão do elemento soluto que se difunde

$$D = D_0 \exp(-Q_d / RT)$$

D_0 = constante (m²/s)

Q_d = energia de ativação para difusão (eV/átomo)

R = Cons. do gás = 8,62 x 10⁻⁵ eV/átomo

T = temperatura absoluta (K)

Aços para Cementação

Aços Carbono

- Superfície resistente ao desgaste com núcleo tenaz
- 1016 / 1018 / 1019 / 1022
- Peças pequenas / temperadas em água;
- Aplicações onde não é exigido baixa distorção.

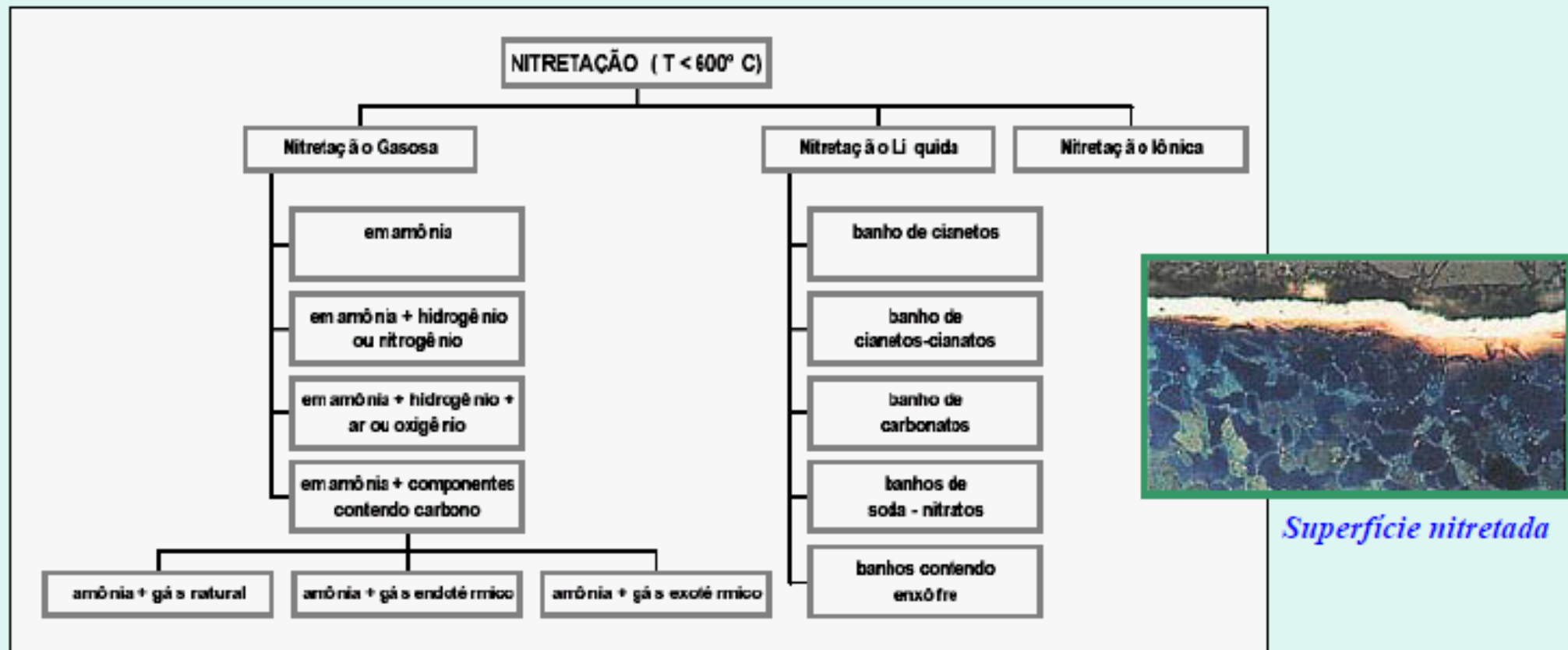
ARBL (Alta Resistência Baixa Liga)

- Superfície resistente ao desgaste/núcleo resistente e dútil;
- 4023 / 5110 / 4118 / 8620 / 4620;
- 4320 / 4817 / 9310.
- Temperados em óleo / baixa distorção;

Nitretação

NITRETAÇÃO

- Consiste na introdução de nitrogênio na superfície do aço, pelo aquecimento do mesmo a temperaturas da ordem de 500 a 570°C, para formar uma camada dura de nitretos. Por utilizar temperaturas menores que a cementação, a nitretação produz menor distorção e tem menor tendência a causar trincas no material. A nitretação melhora a resistência ao desgaste, à fadiga e à corrosão.



Nitretação

Definição: Introdução de Nitrogênio na superfície do aço

- Temperatura do tratamento: 500 a 570°C
- Não é necessário têmpera posterior;
- Profundidade de camada da ordem de 200-400µm.

Tipos de nitretação:

- Gasosa;
- Líquida;
- Iônica ou a plasma.

Aplicações:

- Obter altíssima dureza de camada (1000-1500HV) e alta resistência ao desgaste;
- Melhorar a resistência à fadiga e a corrosão (exceto para os aços inoxidáveis).

Nitretação

NITRETAÇÃO

- Todos os processos de nitretação possuem em comum a criação de nitrogênio atômico necessário para a formação da camada nitretada, mudando apenas o meio saturante.
- O processo de nitretação consiste de três etapas:
 - 1 → A formação do nitrogênio atômico como resultado das diversas reações químicas;
 - 2 → A adsorção dos átomos de nitrogênio na superfície da peça; e,
 - 3 → A difusão dos átomos adsorvidos desde a superfície para o interior da peça.



Nitreção a gás

Aços empregados:

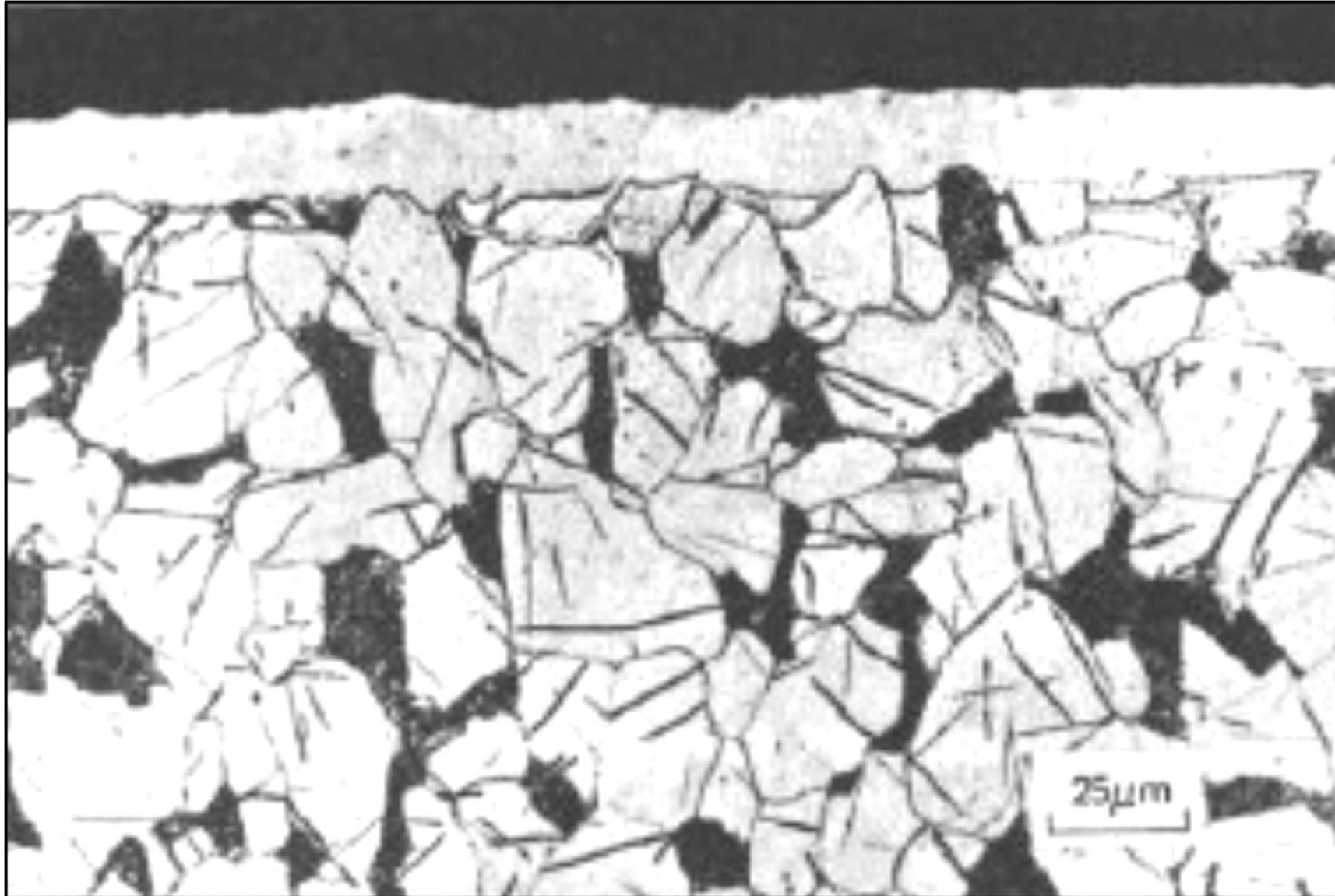
- Aços de baixa liga contendo alumínio;
- Aços de médio carbono, ao cromo, das séries 41xx, 43xx, 51xx, 61xx, 86xx, 87xx e 98xx;
- Aços ferramenta com 5% cromo;
- Aços inoxidáveis nitrônicos, Ferríticos, Martensíticos;
- Aços conter alumínio ou cromo (Ideal série Nitraloy – 1%Al e 1,2%Cr).

Nitretação a gás

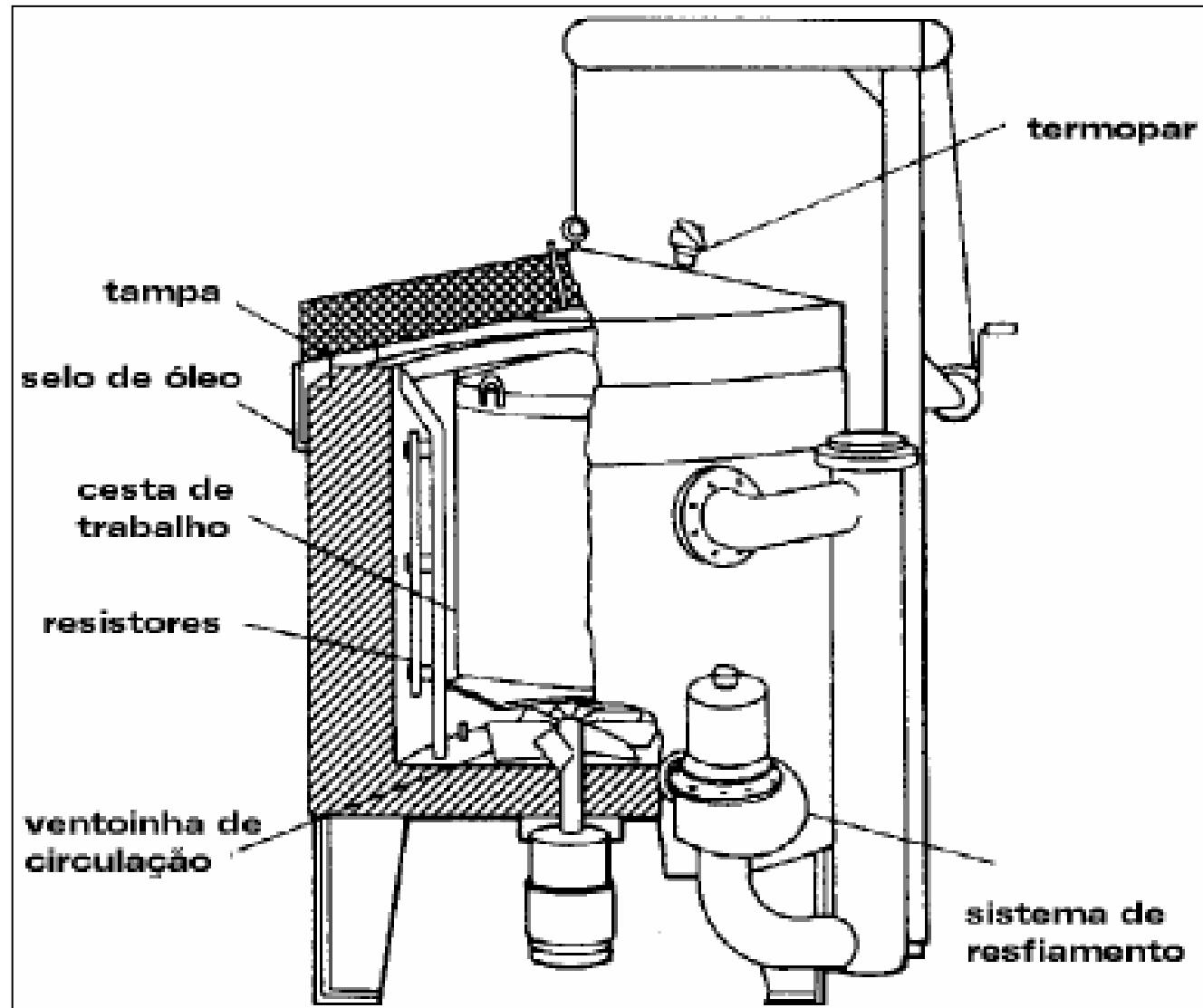
Processo mais comum, para aços:

1. Têmpera e revenimento, 25°C acima da temperatura de nitretação para garantir estabilidade dimensional;
2. Usinagem grosseira;
3. Revenimento para alívio de tensões a (500° a 600°C);
4. Usinagem Final;
5. Nitretação;
6. Retífica.

Nitretação a gás



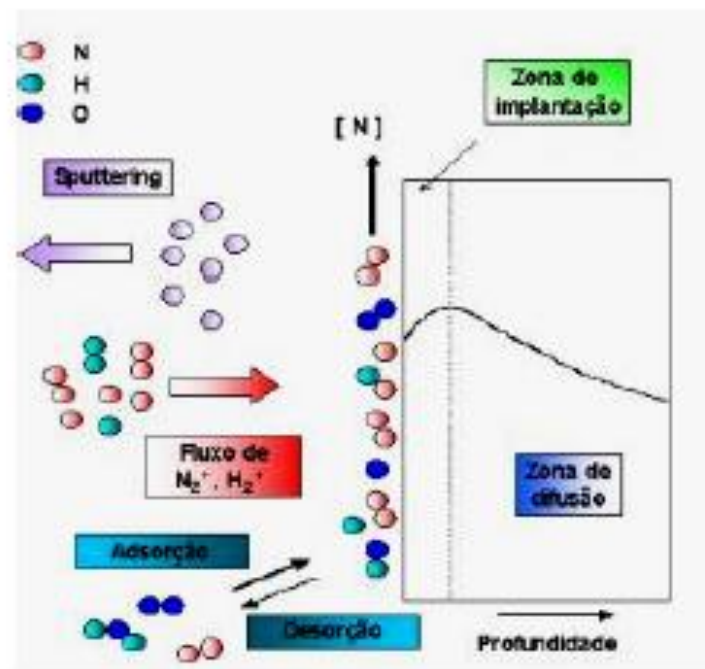
Forno de Nitretação Gasosa



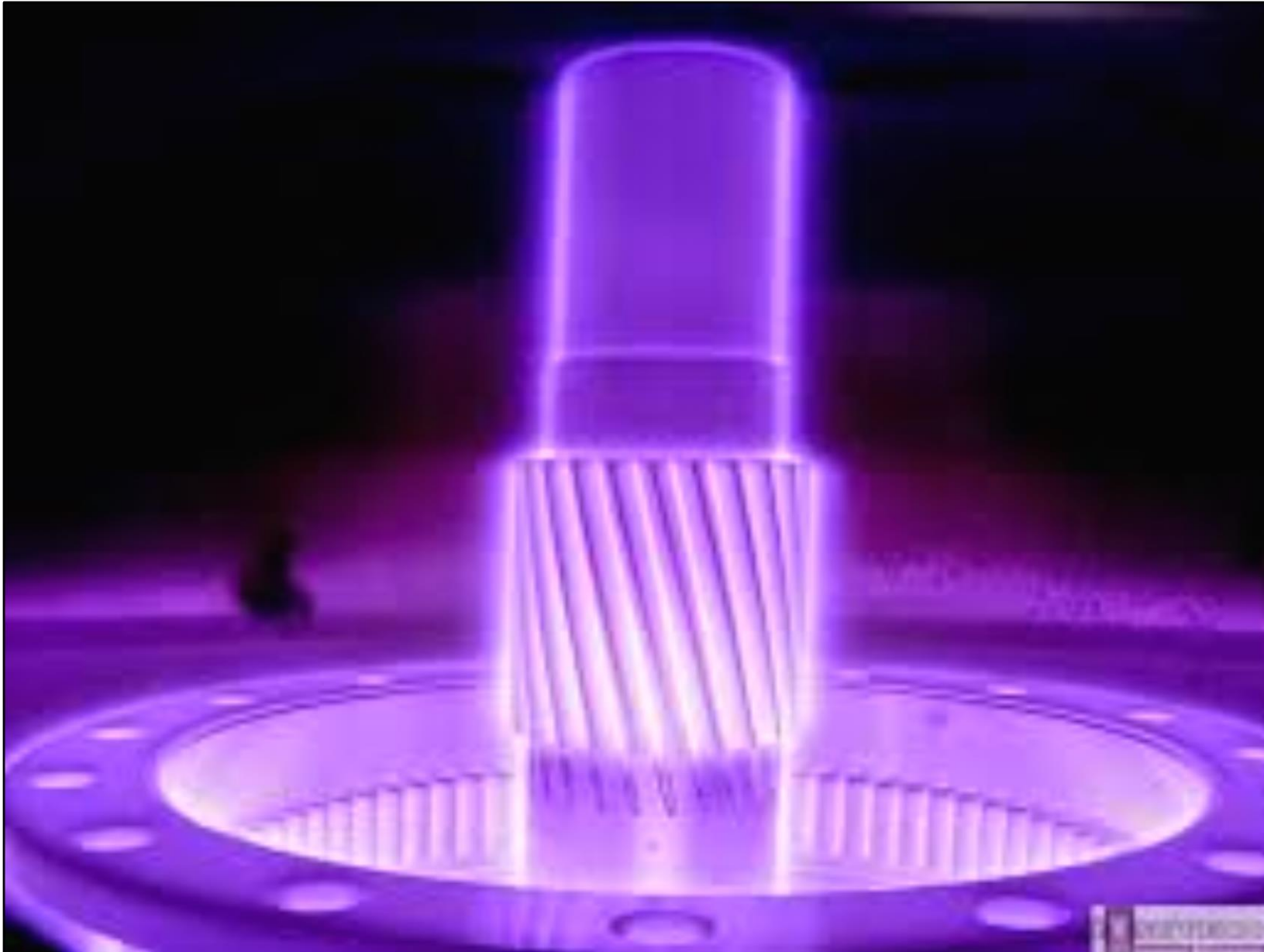
Nitretação

PLASMA

- Nitretação a Plasma: realizado em níveis de vácuo que variam entre 100 Pa e 1.000 Pa. O processo de nitretação inicia-se pela aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos, na presença de uma mistura gasosa composta basicamente de N_2 e H_2 parcialmente ionizados. os íons carregados positivamente são acelerados para a superfície do anodo (peça) e os elétrons são direcionados para o catodo (carcaça). Após a implantação, estes íons neutralizam-se e penetram por difusão térmica no material.



PEÇA DURANTE NITRETAÇÃO A PLASMA



NITRETAÇÃO

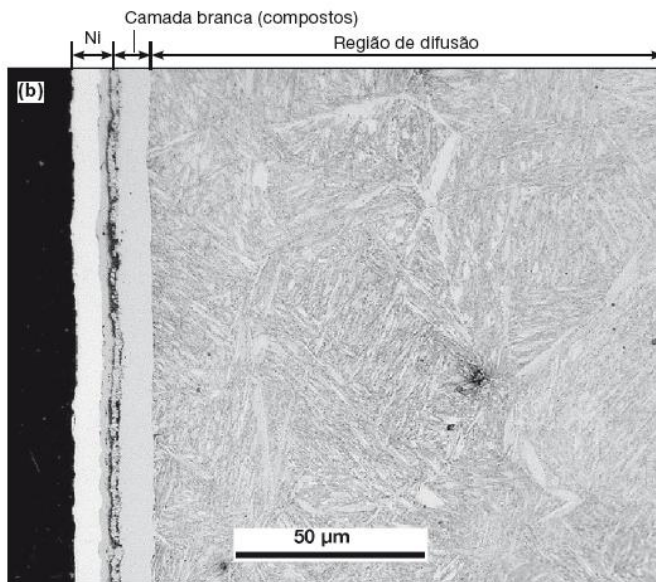
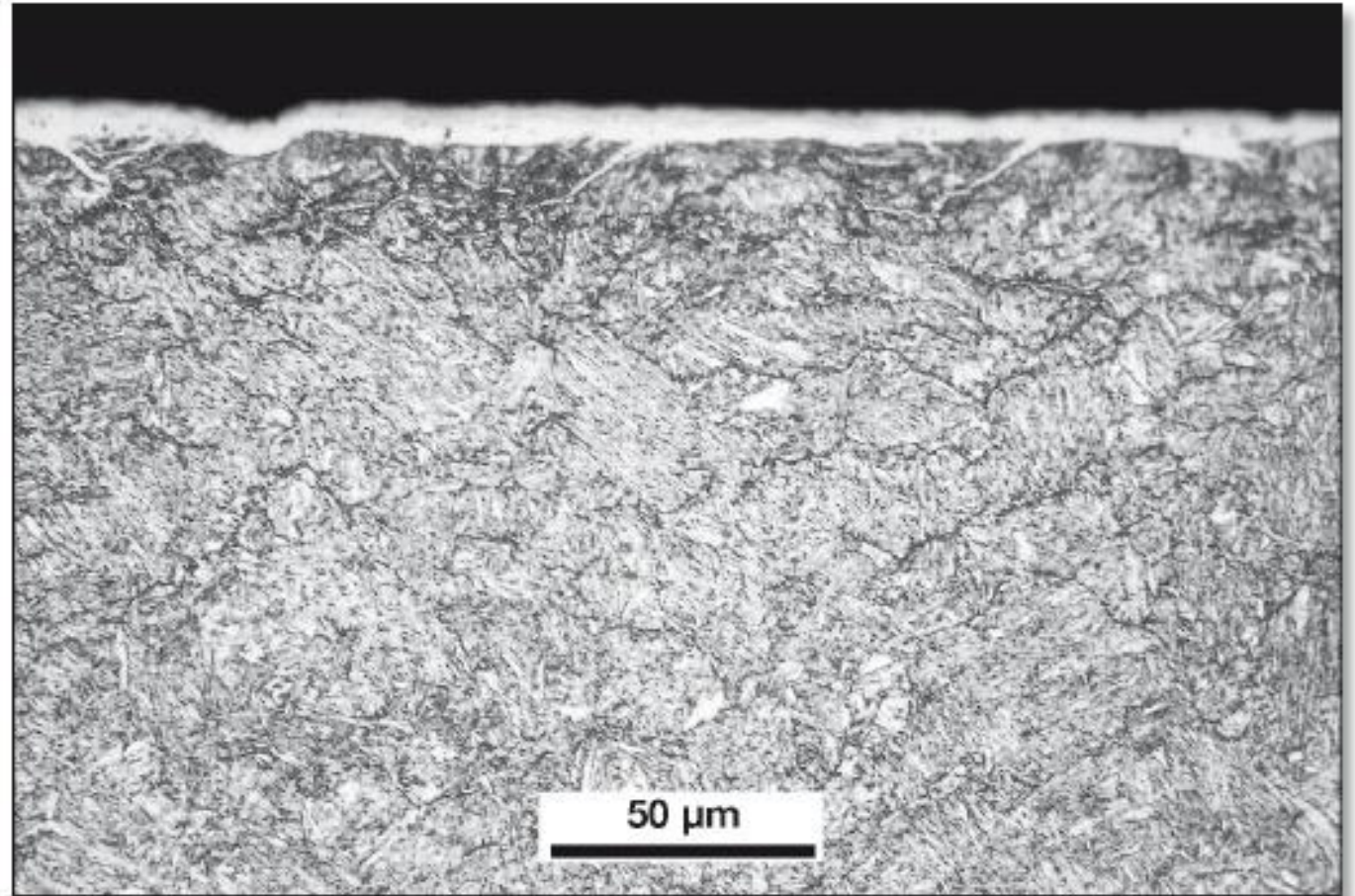
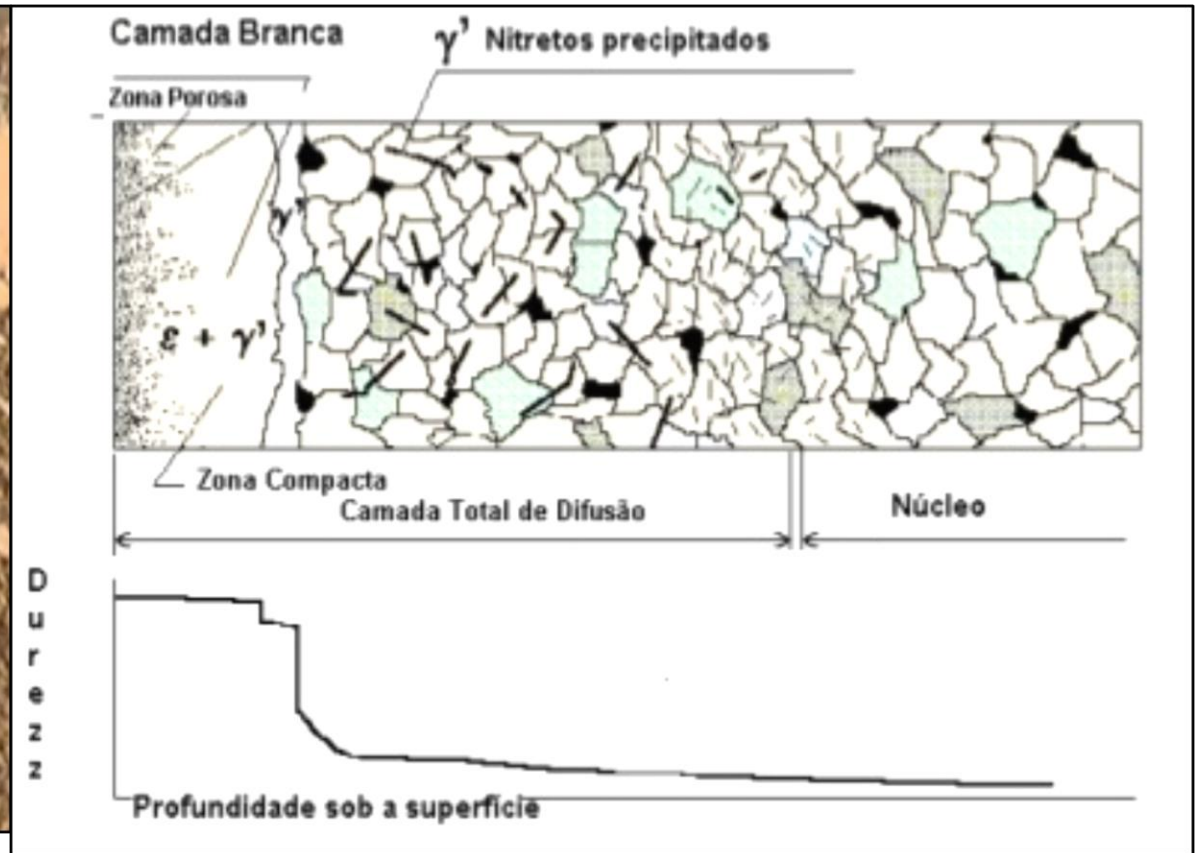
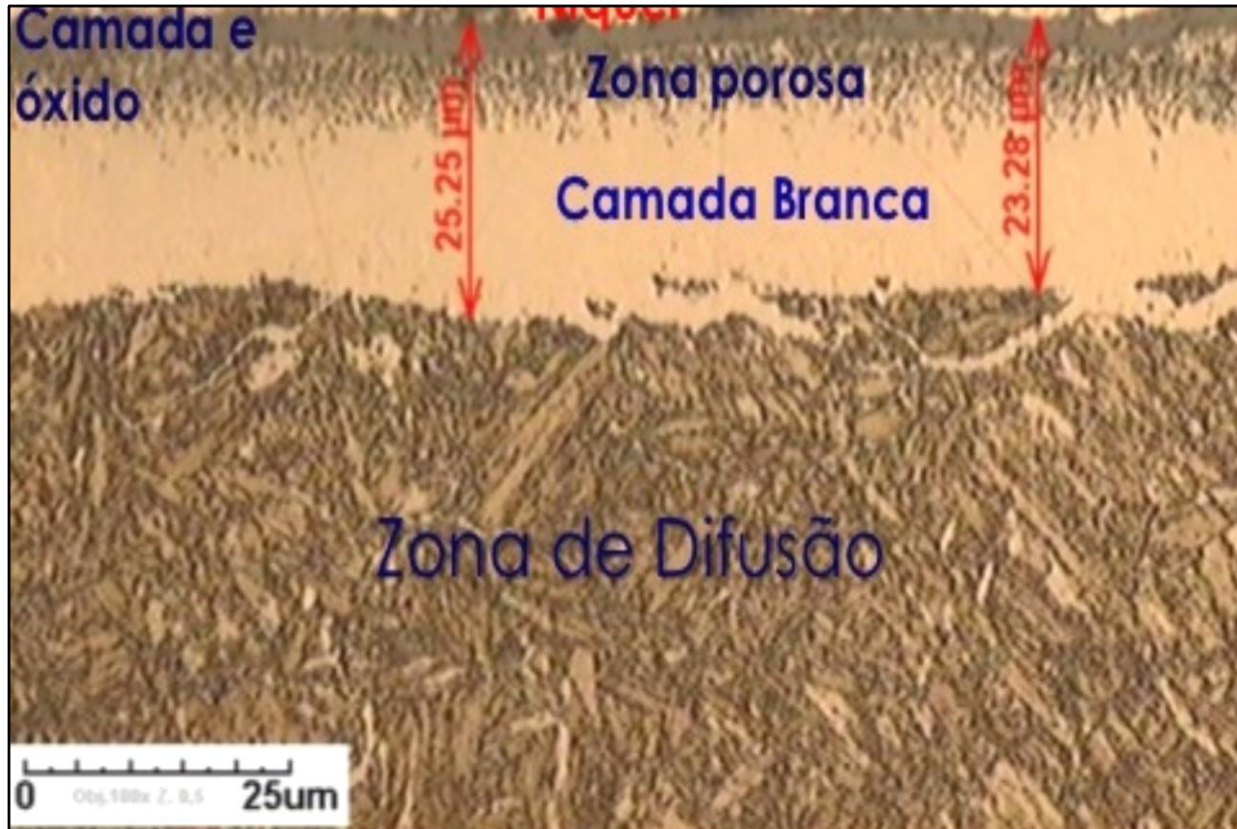


Figura 10.94

Seção transversal à superfície de uma peça de aço AISI 4340 temperado e revenido e nitretado. Observa-se a camada branca, de nitreto de alta dureza (ver [2]). Cortesia A. Zeemann, Tecmetal, RJ, Brasil.

Camada Branca e camada de difusão-Imagem de MO e desenho esquemático com perfil de dureza



A camada branca é formada por uma combinação dos nitretos ϵ e γ' . O nitreto γ' é mais duro e frágil. A camada branca é dura e frágil e pode ser reduzida ou eliminada, conforme a aplicação. Abaixo desta camada existe a camada de difusão.

FIM