



## **AÇO FERRAMENTA parte II**

**Prof. Msc Robson Silva Bussoloti**

**Sup. Laboratório GGD Metals**

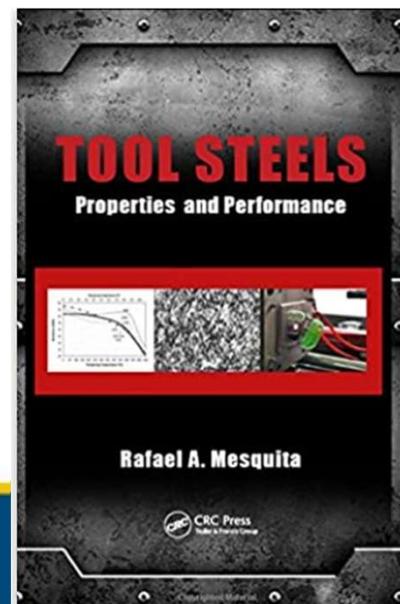
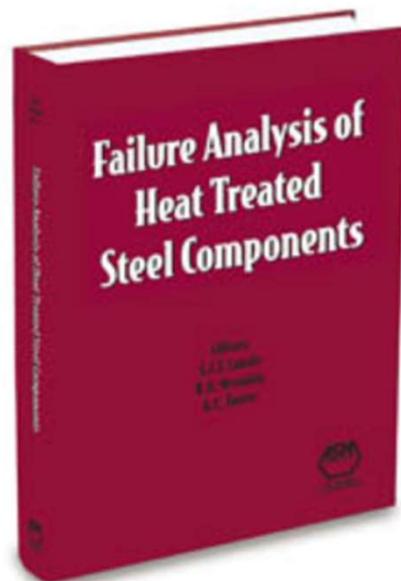
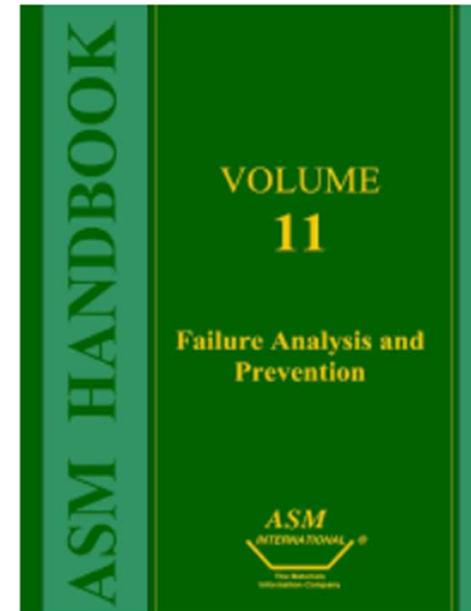
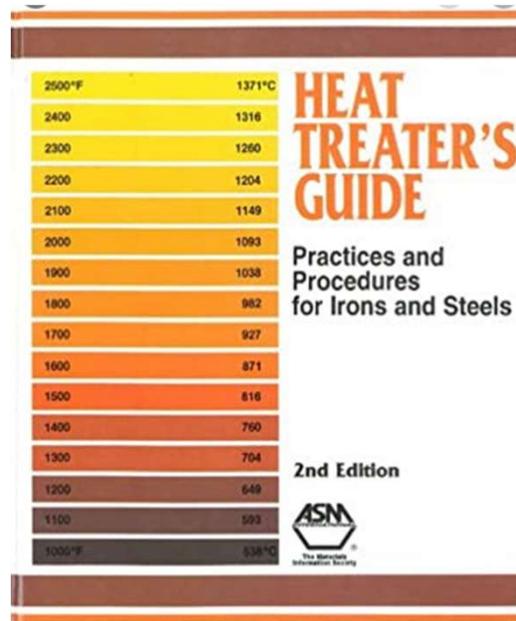
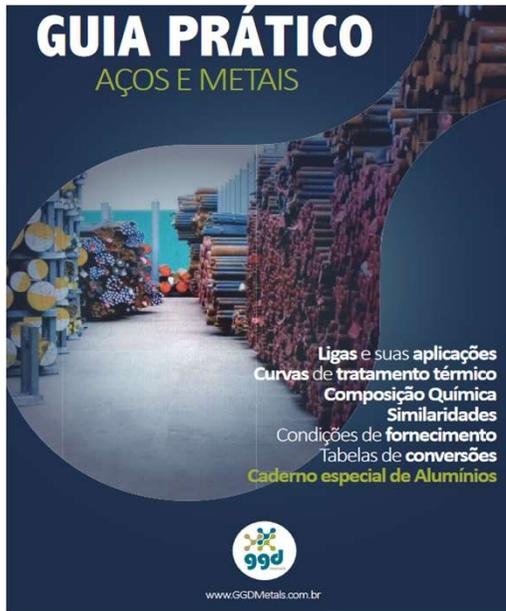
**[robson.bussoloti@ggdmets.com.br](mailto:robson.bussoloti@ggdmets.com.br)**



# AÇO FERRAMENTA



# REFERÊNCIAS:



# TUNGSTEN HIGH-SPEED TOOL STEELS

## T-SERIES



## HISTÓRIA:

O primeiro grande impulso causado nos materiais de ferramentas aconteceu na virada do século XIX, quando desenvolveram o primeiro aço rápido (HSS). As velocidades de corte puderam ser aumentadas em uma ordem de grandeza: de 3 a 5 m/min com ferramentas de aço carbono para 30 a 35 m/min com os aços rápidos.

As principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte podem ser assim listadas:

- Alta dureza;
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo;
- Alta resistência a compressão;
- Alta resistência ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Alta resistência ao impacto;
- Ser inerte quimicamente

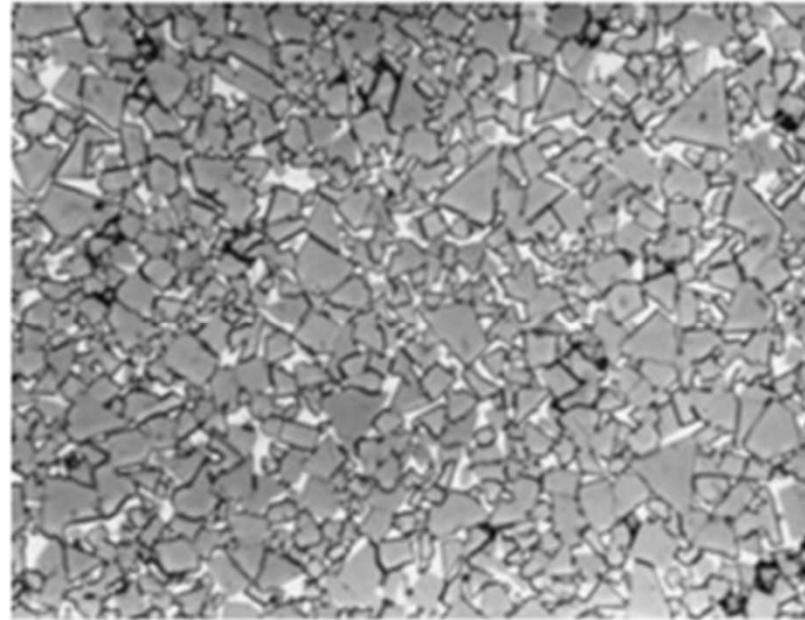
## HISTÓRIA:

Estas propriedades foram alcançadas com associação da adição de elementos de ligas formadores de carbonetos e tratamentos térmicos apropriados.

- No final do século XVIII e início do XIX os aços ao carbono eram os principais materiais no final do século XIX, os aços de baixa, e média liga, introduzidos por Müshet em 1868, já representavam as primeiras inovações em ferramentas de corte.
- Na virada do século XIX, quando Taylor e White desenvolveram o primeiro aço rápido, contendo 0,67% C, 18,91% W, 5,47% Cr, 0,11% Mn, 0,29% V temperados e revenidos, mais tarde durante a Segunda Guerra Mundial foram desenvolvidas as ferramentas a base de Co, contendo W; Cr e Mo em solução sólida possuíam maior dureza e mantinham esta dureza a temperaturas mais elevadas tornando as velocidades de corte em torno de 25% maiores.
- Com o desenvolvimento do Metal Duro (WC, WiDia, Carbetos) as velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente dez vezes (de 35 m/min com os aços-rápidos para 250 - 300 m/min). Esta descoberta aconteceu por volta de 1920, na Alemanha, quando Schröter conseguiu produzir em laboratório o carboneto de tungstênio, WC, em pó pela primeira vez. A mistura deste pó com o cobalto, também em pó trouxe ao mercado, em 1928, este que é um dos mais revolucionários grupos de materiais para ferramentas de corte.

## HISTÓRIA:

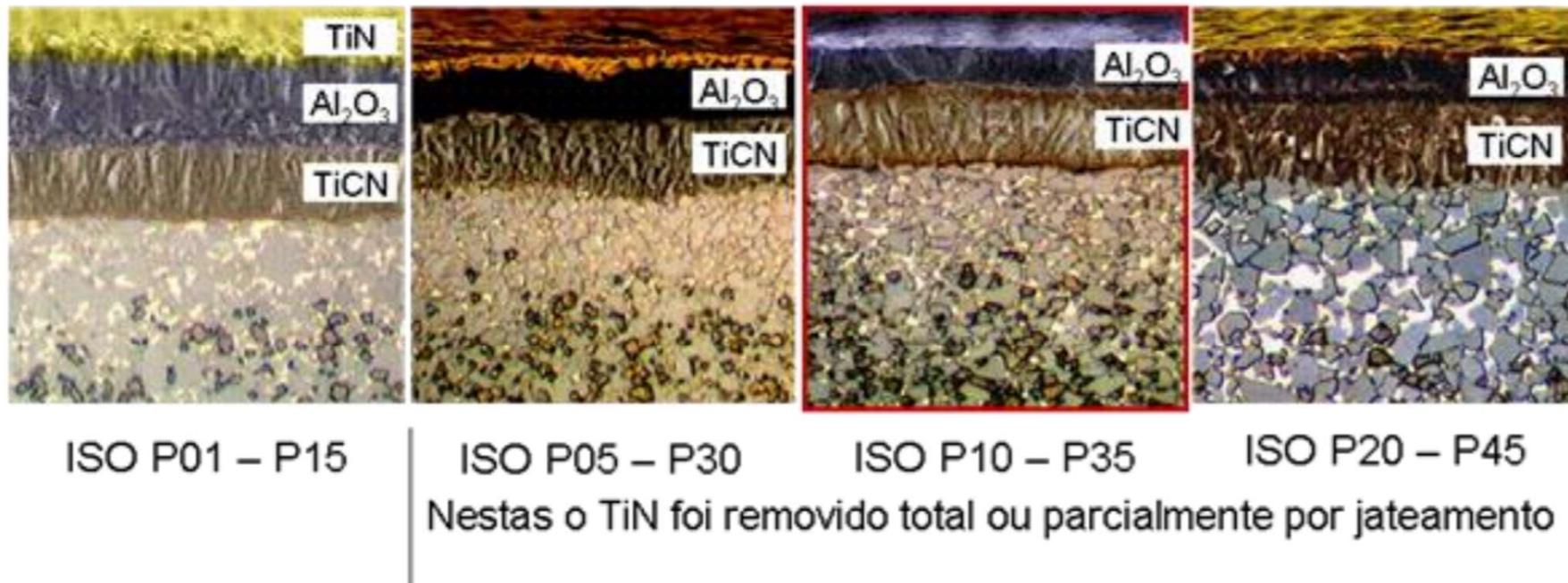
As pastilhas de metal duro produzidas pela metalurgia do pó é constituídas de carbetos de tungstênio, cobalto, molibdênio entre outros elementos revolucionaram a tecnologia de usinagem:



## HISTÓRIA:

- Posteriormente com o desenvolvimento de processos termoquímico a base de plasma chamado de PVD é constituído hoje o estado da arte em revestimento com objetivo de aumentar a dureza superficial, aumentar a resistência à corrosão e diminuir o atrito aumentando assim a vida útil do ferramental.

## Metal Duro Revestido PVD e CVD



# METALURGIA DO PÓ

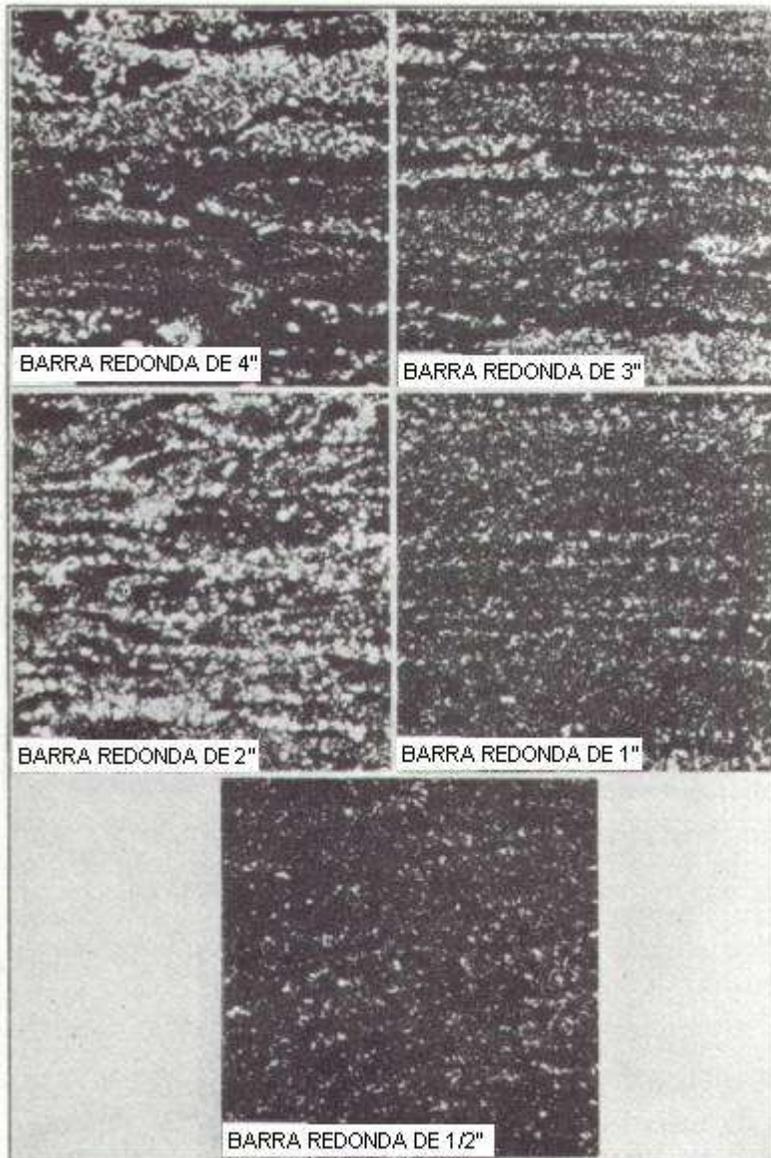
## TOOL STEELS



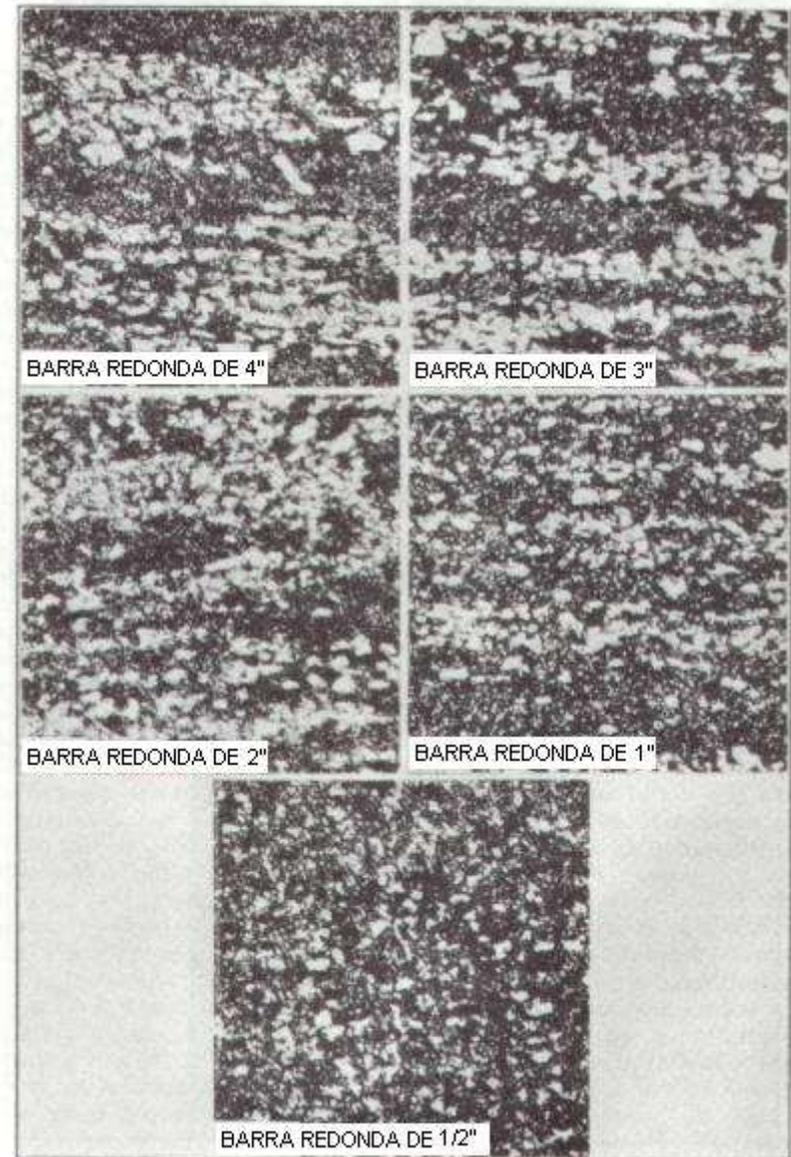
## Evolução microestrutural durante processamento dos aços ferramenta



Fig. 8.26 - Microestruturas de aço M2. a) bruto de solidificação. b) forjado a quente com 75% de redução. c) forjado a quente com 90% de redução.

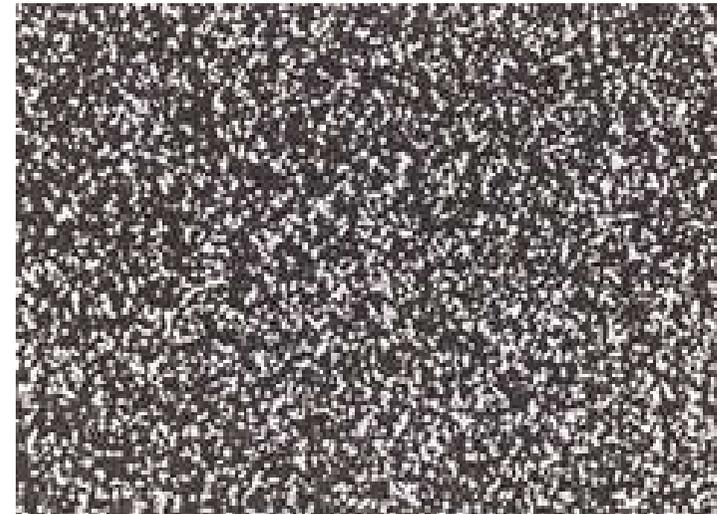
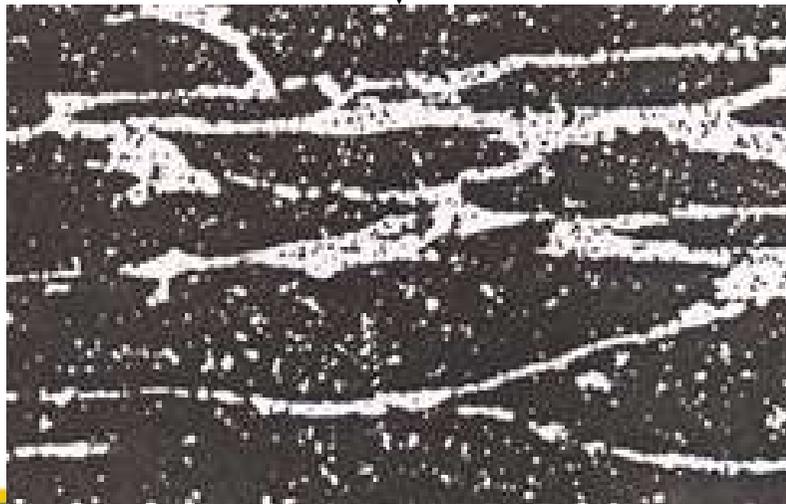
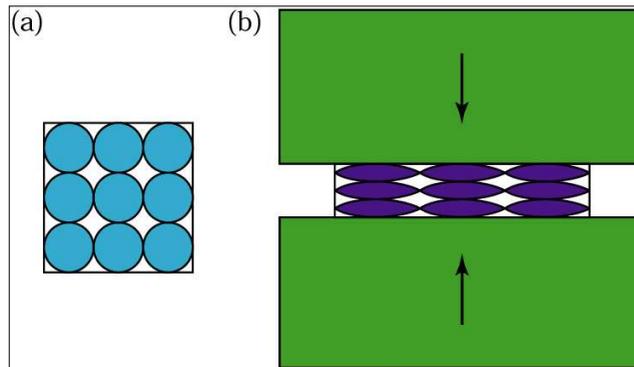


Segregação de carbonetos na direção longitudinal de barras conformadas a quente.  
Aço rápido T1 com 18%W, 4%Cr e 1%V



Segregação de carbonetos na direção longitudinal de barras conformadas a quente.  
Aço para trabalho a frio com 2%C e 12%Cr

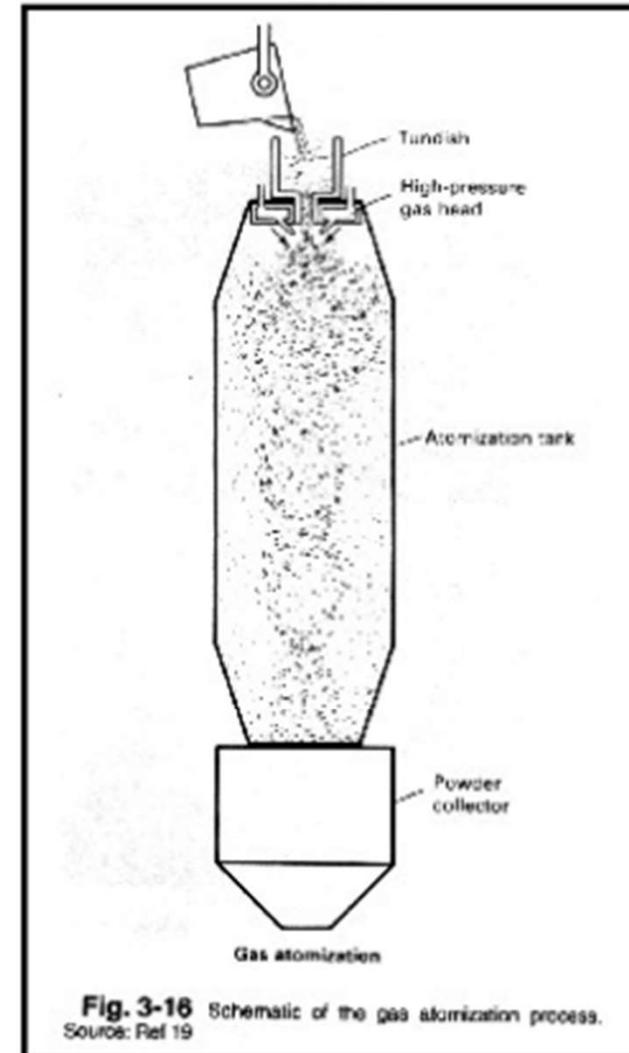
# Anisotropia



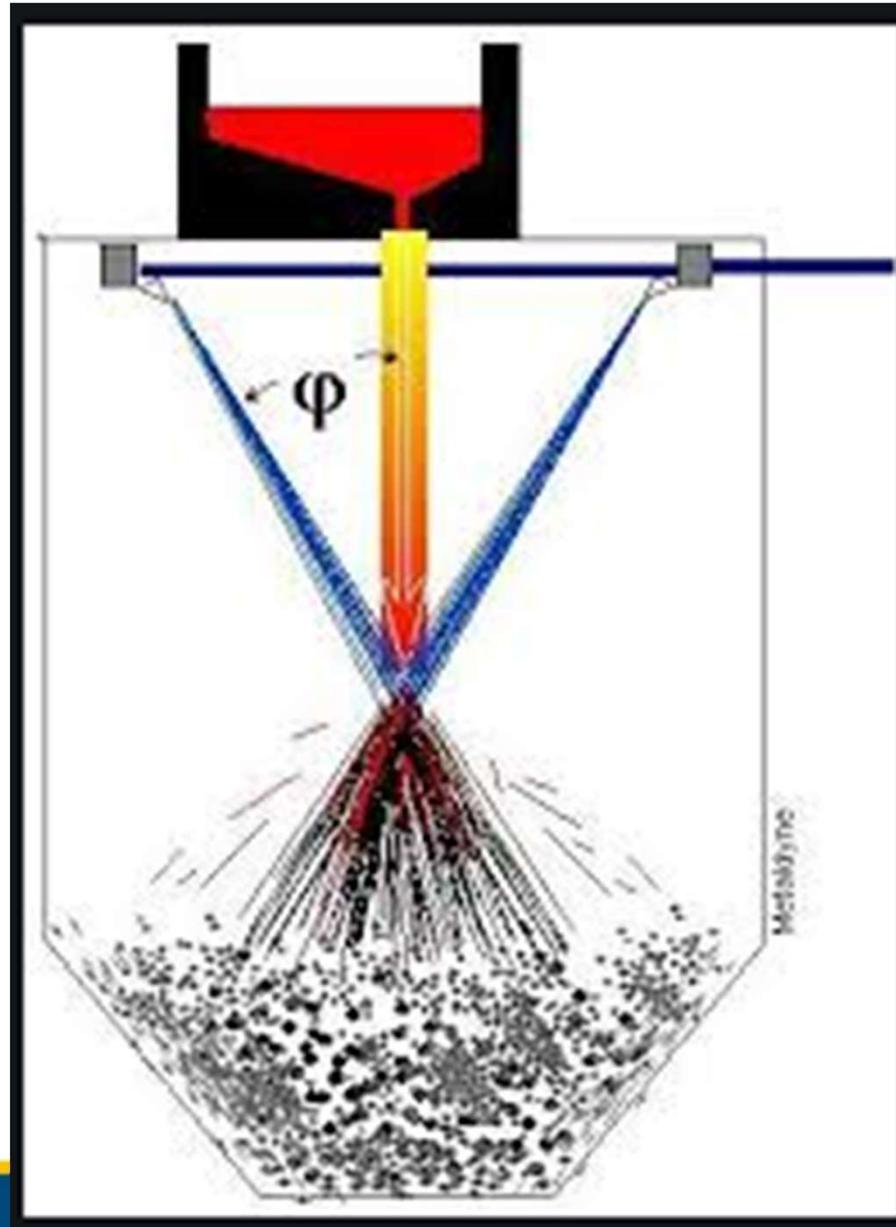
Aço produzido pela Metalúrgia do Pó

# METALURGIA DO PÓ

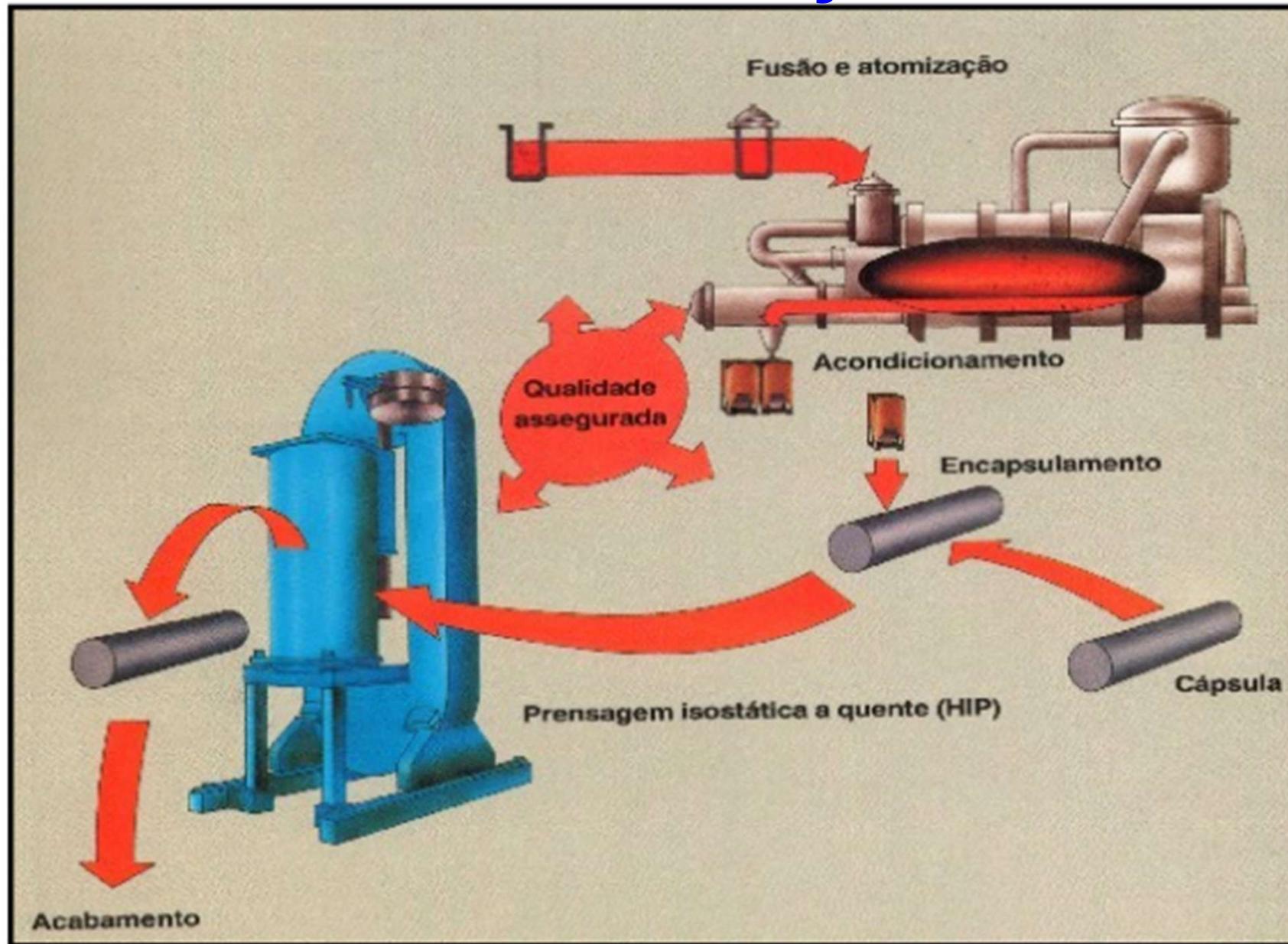
- **Fusão**
- **Atomização (obtenção do Pó)**
- **Moldagem da Pré-forma**
- **Sinterização (obtenção do Metal)**  
Densidade: 95 – 100%
- **Deformação**  
Densidade: 98 – 100%



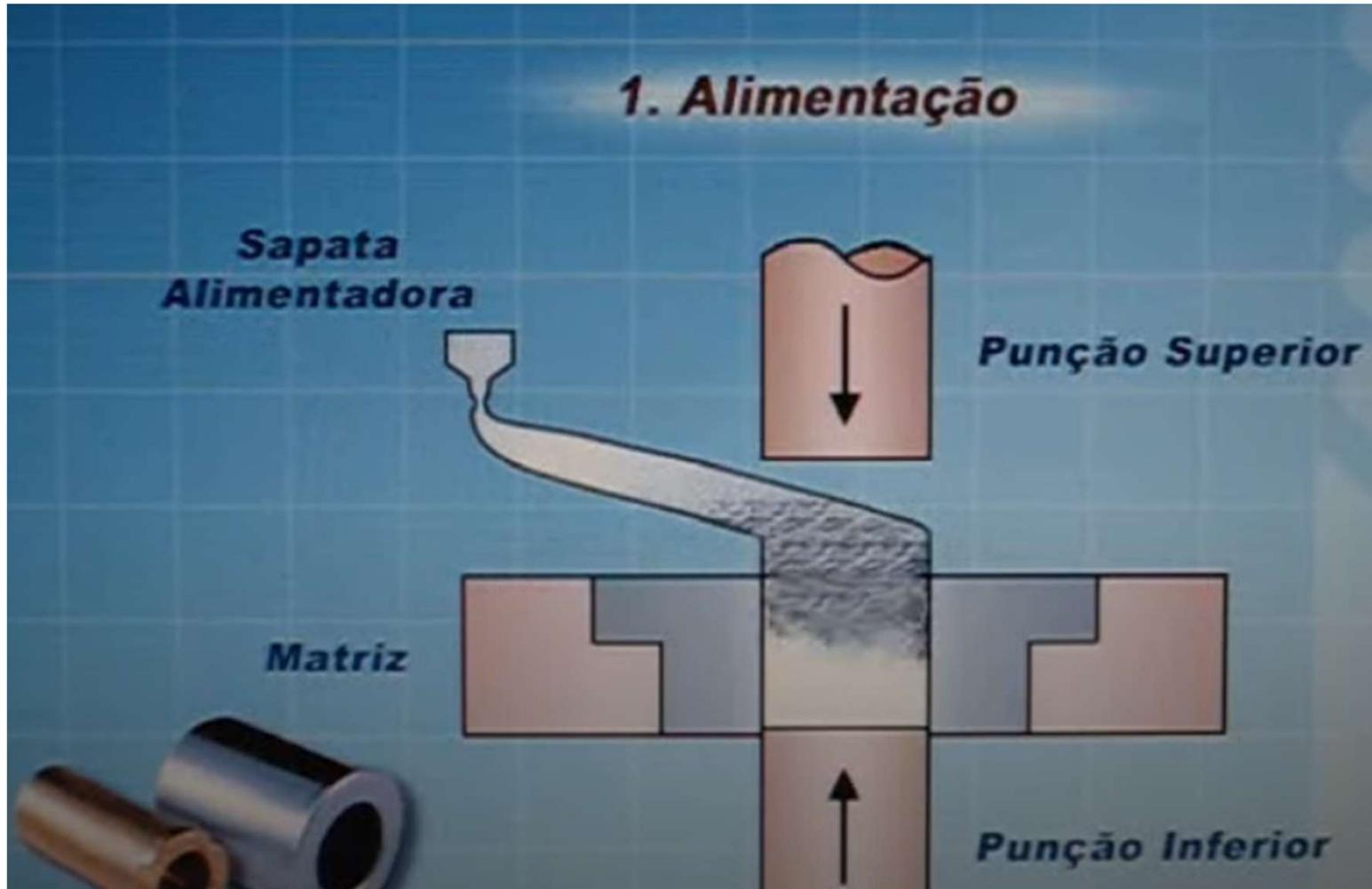
# ATOMIZAÇÃO



# CONFORMAÇÃO



# COMPACTAÇÃO

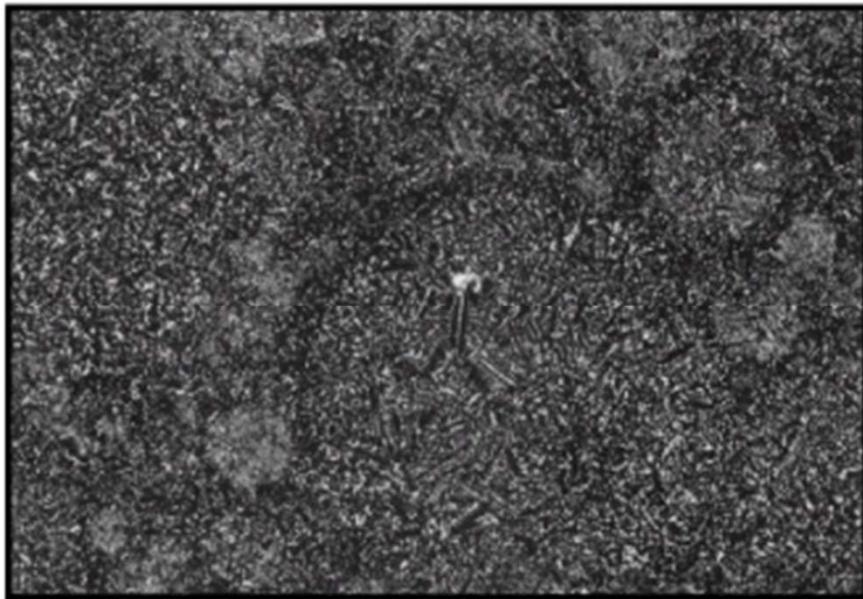


## **SINTER 23 – RD 112 mm - Recozido**



# ESTRUTURA APÓS RECOZIMENTO PM x Convencional

SINTER 23 – RZ RD 112mm

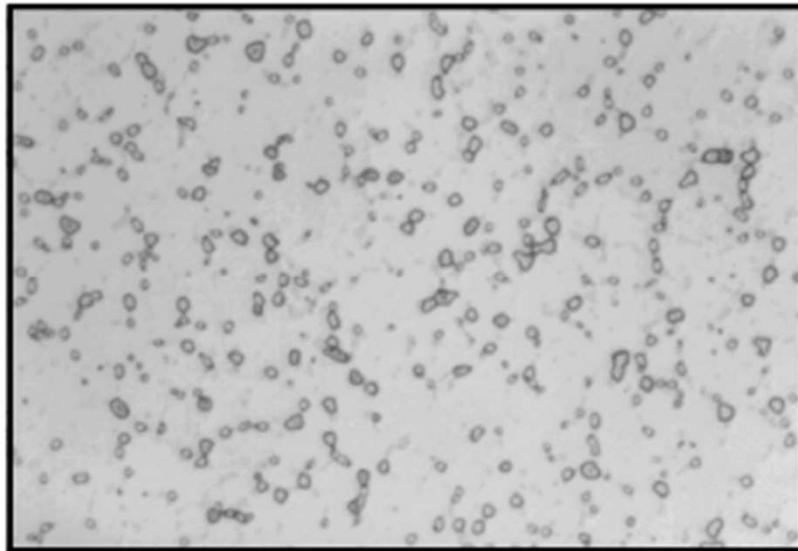


AISI M2 – RZ RD 7,94 mm

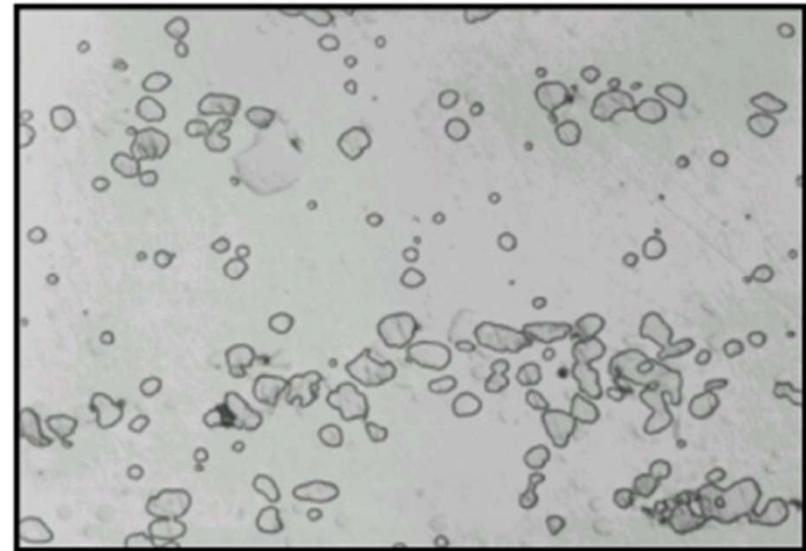


## TAMANHO DOS CARBONETOS PM x Convencional

SINTER 23 – TP: 1180°C

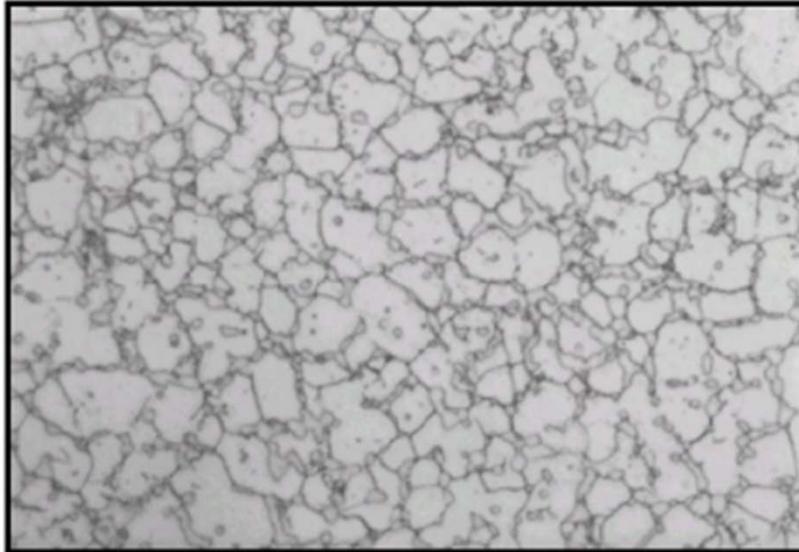


AISI M2 – TP: 1190°C

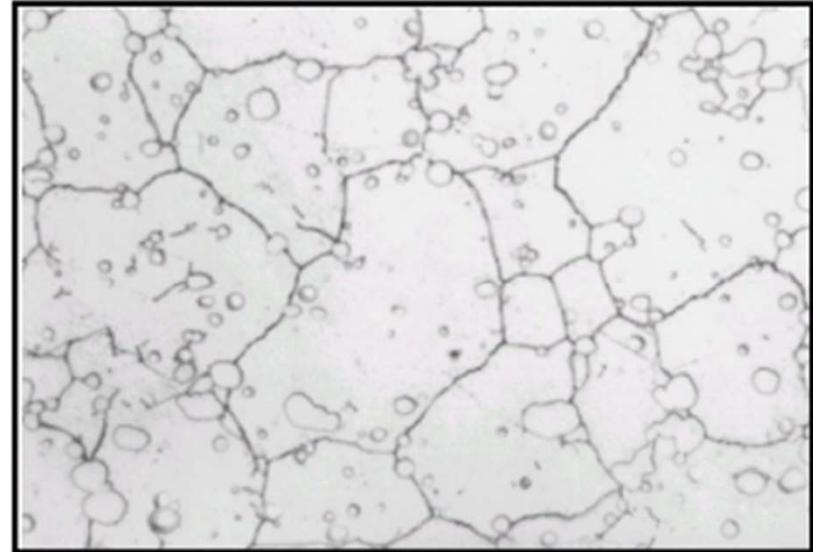


# TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO PM x Convencional

SINTER 23 – TP: 1180°C



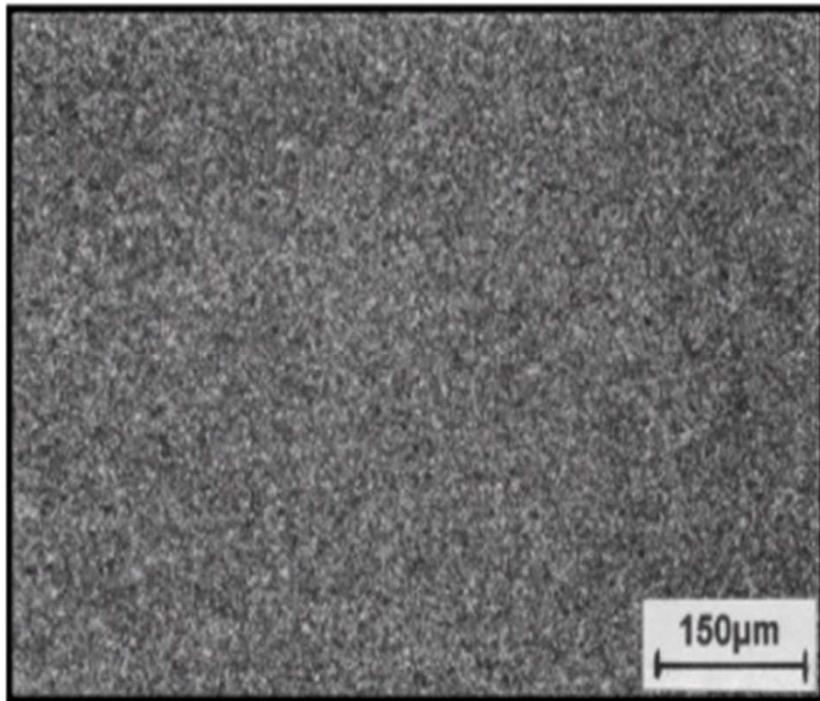
AISI M2 – TP: 1190°C



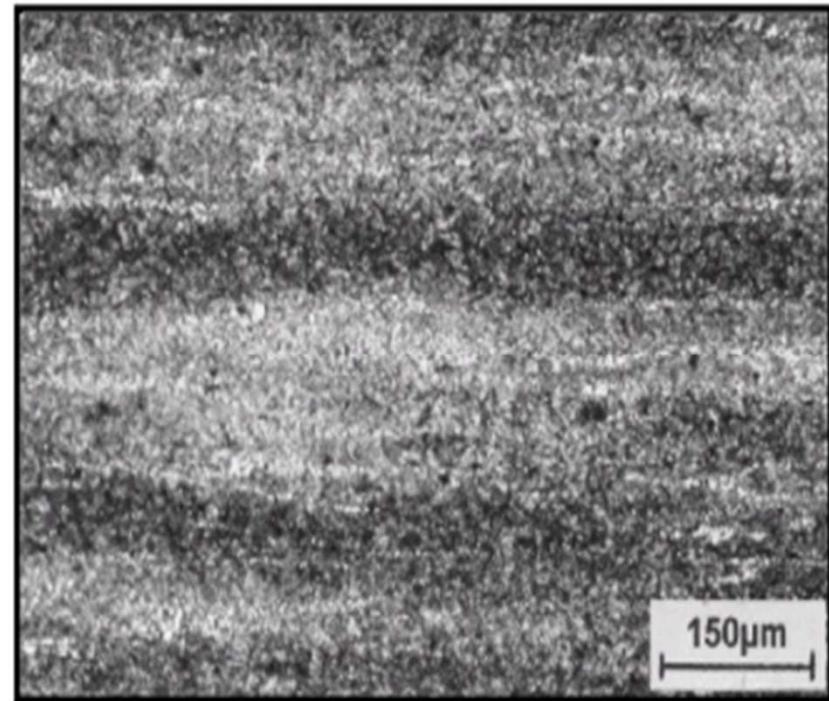
# ESTRUTURA APÓS TP + RV

## PM x Convencional

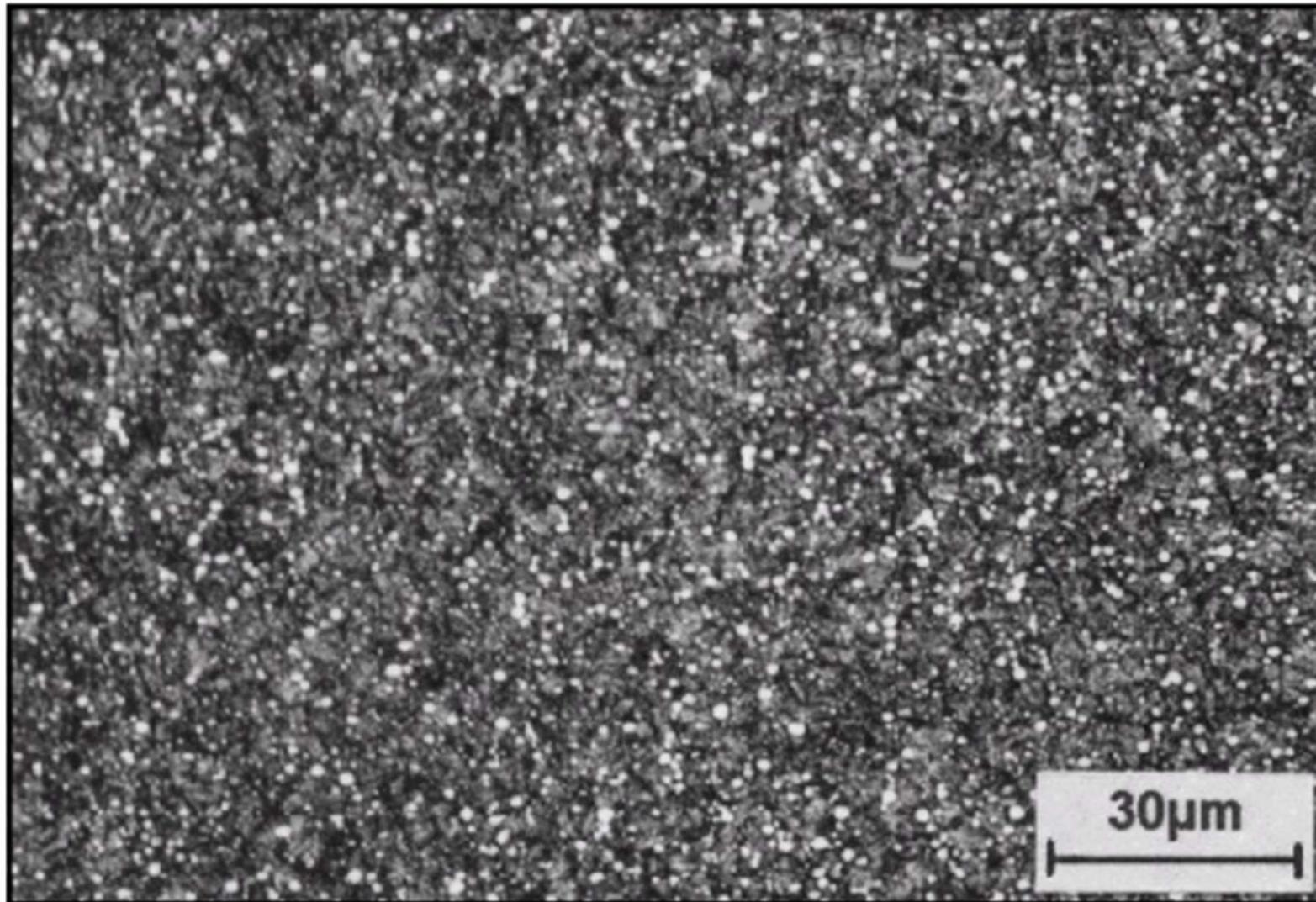
SINTER 30 – TP + RV



AISI M35 – TP + RV

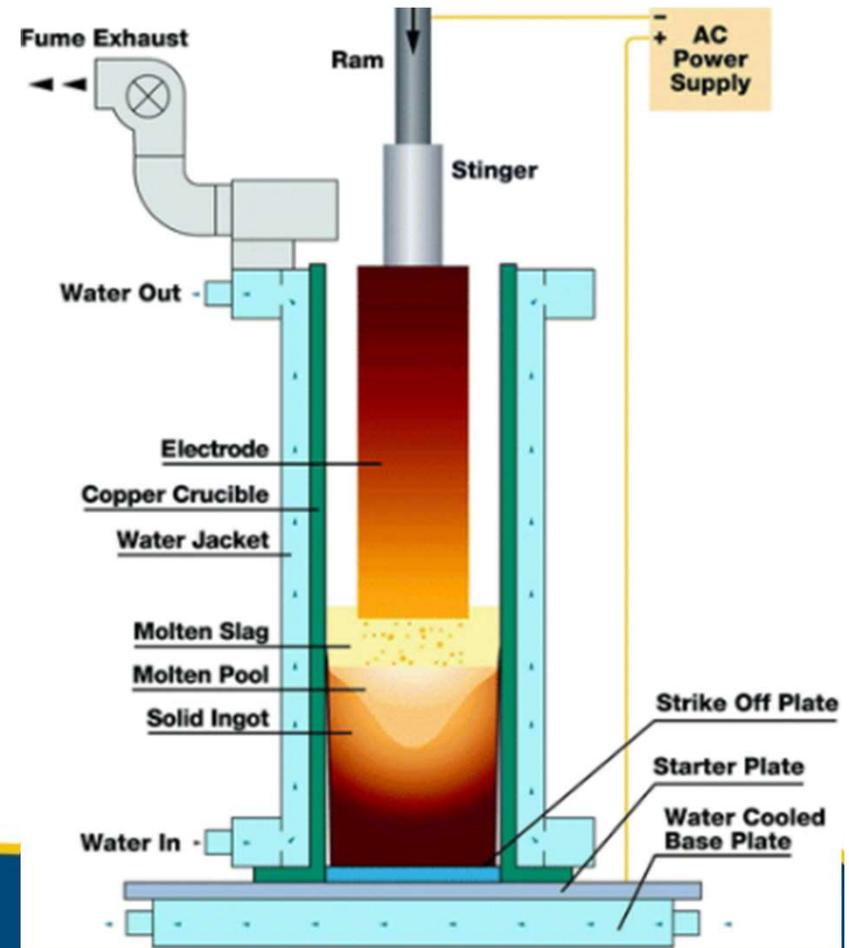


## ESTRUTURA APÓS TP + RV - Detalhe



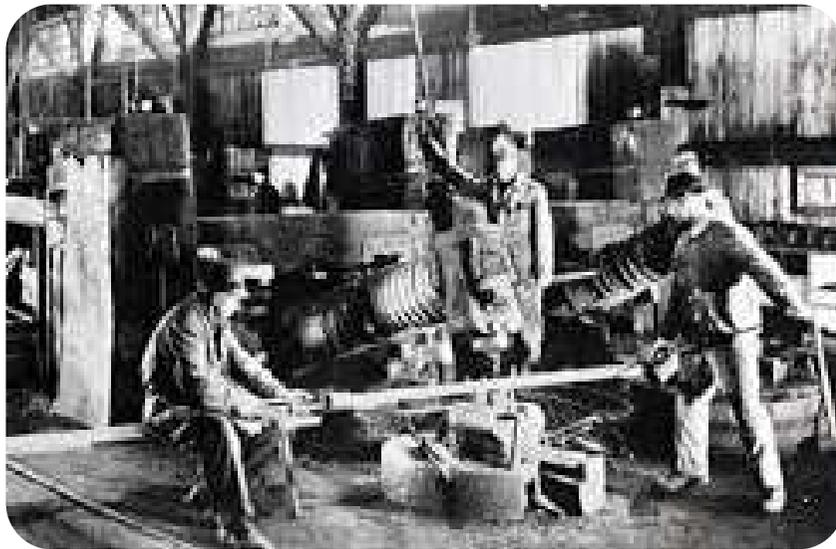
# AÇOS FERRAMENTAS PRODUZIDOS POR ESR

## ELETRO SLAG



# HISTÓRICO DO PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

## HISTÓRIA DO ESR

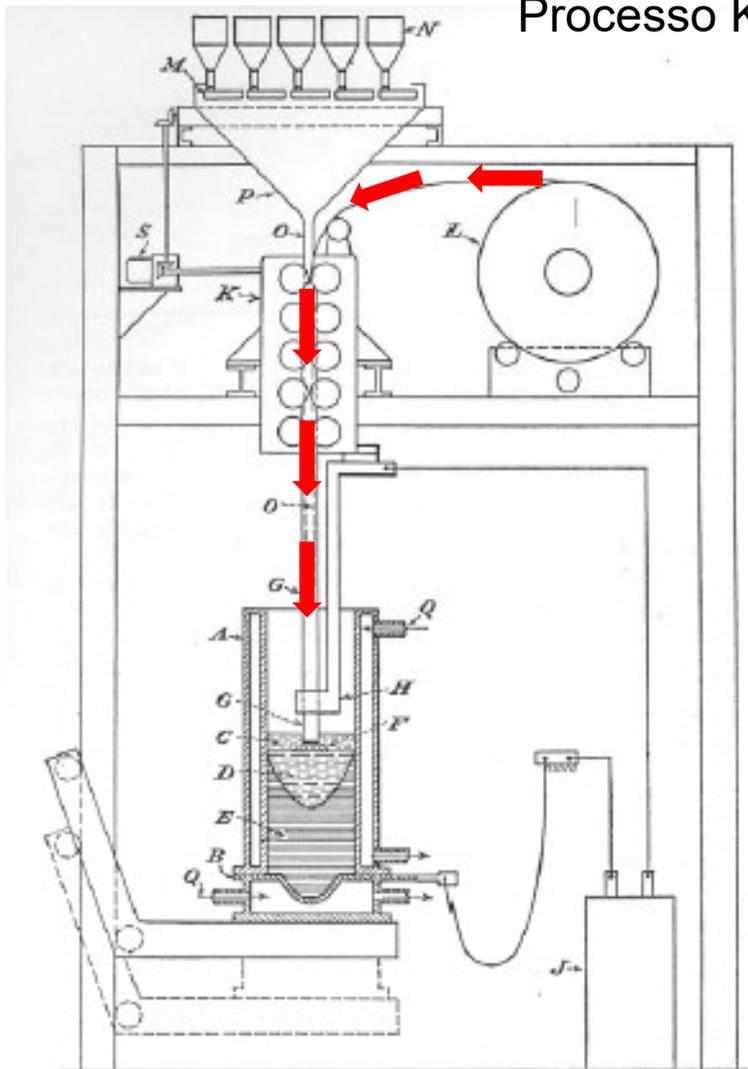


# HISTÓRICO DO PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

- Ano 1935 (EUA). Inventor R.K Hopkins;
- Processo **Kellog Eletric Ingot Process** - Predecessor do processo ESR;
- **Fita metálica** base em bobina / Escória de fluorita;
- Fita em **aço 1010** para aços ligados e **Níquel** puro para ligas a base ( níquel);
- Desvantagens: Inclusões de fita metálica nos produtos acabados;

# HISTÓRICO DO PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

Processo Kellogg Electric Ingot Process



- A Molde refrigerado
- B Base refrigerada
- C Escória líquida
- D Metal líquido
- E Ingot metálico sólido
- F Descarga de corrente

- G Eletrodo tubular consumível
- H Garra de contato
- J Fonte de Potência
- K Máquina formadora de tubo
- L Bobina de fita

- M Dispositivo de medição de adições
- N Silos de adições
- O Condutor de adições
- P Coletor
- Q Entrada de água
- S Motor

# HISTÓRICO DO PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

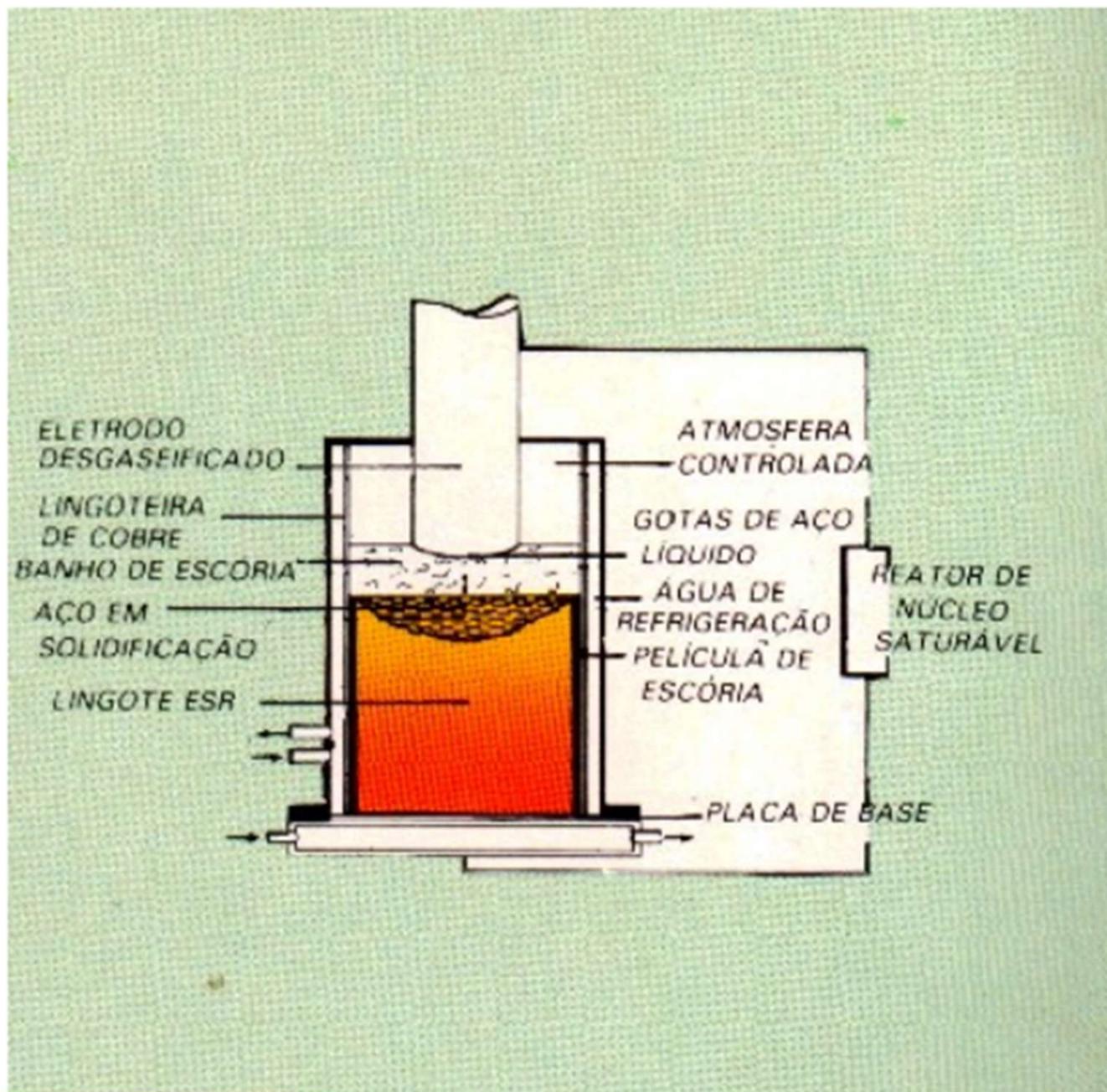
- Em função das inclusões geradas por partes da fita dentro do material, as fitas foram substituídas por eletrodos sólidos com composição química próxima da liga esperada;
- Eletrodos sólidos = Poucas inclusões;

# HISTÓRICO DO PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

- 2ª Guerra mundial – Demanda de produtos com alto grau de limpeza e forjabilidade;
- Em 1953 a empresa Firth Sterling desenvolveu Liga A-286 (ASTM A453) processo VAR (Vaccum Arc Remelting);
- Boa qualidade porém com necessidades de tratamento da superfície do eletrodo / Cortar extremidades;
- Taxa de fusão deveria ser baixa para se evitar segregação. Piora na superfície do lingote, e necessidade de novos retrabalhos;

Processo VAR (Vaccum Arc Remelting);







# HISTÓRICO DO PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

## TENTATIVA DE SOLUCIONAR O PROBLEMA

- Foram enviados vários eletrodos para a M. W. Kellogg para serem testados no processo Hopking;
- Em três condições:
  - 1) Bruto
  - 2) Esmerilhado
  - 3) Forjado/Torneado sem a cabeça quente;
- Diferente do que pensavam os três casos foram excelentes, levando a empresa Firth Sterling à adquirir o processo Hopkins em 1959, pela qualidade e custo baixo sem necessidade de retrabalhos;

# HISTÓRICO DO PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

## Início do processo ESR em grande escala

- 1963, Inglaterra na English Steel Corporation e na British Iron and Steel Association;
- Desenvolvimento de ligas com propriedades excelentes na época;
- Um dos principais motivos da época era a remoção do enxofre, atualmente podendo ser executado por metalurgia de panela;

# HISTÓRICO DO PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

## Processo ESR atualmente

- A produção tem crescido em torno de 3,8% ao ano (Dados de 2006);
- De 1992 à 2006 a produção cresceu de 400.000 t para 650.000 t;
- A previsão em 2008 era de um crescimento de 4% na produção dos aços ferramentas e 5% nas ligas a base de níquel e aços inoxidáveis especiais;
- Desta forma o processo ESR se mantém como uma excelente alternativa para fabricação de ligas de altíssima exigência;

# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

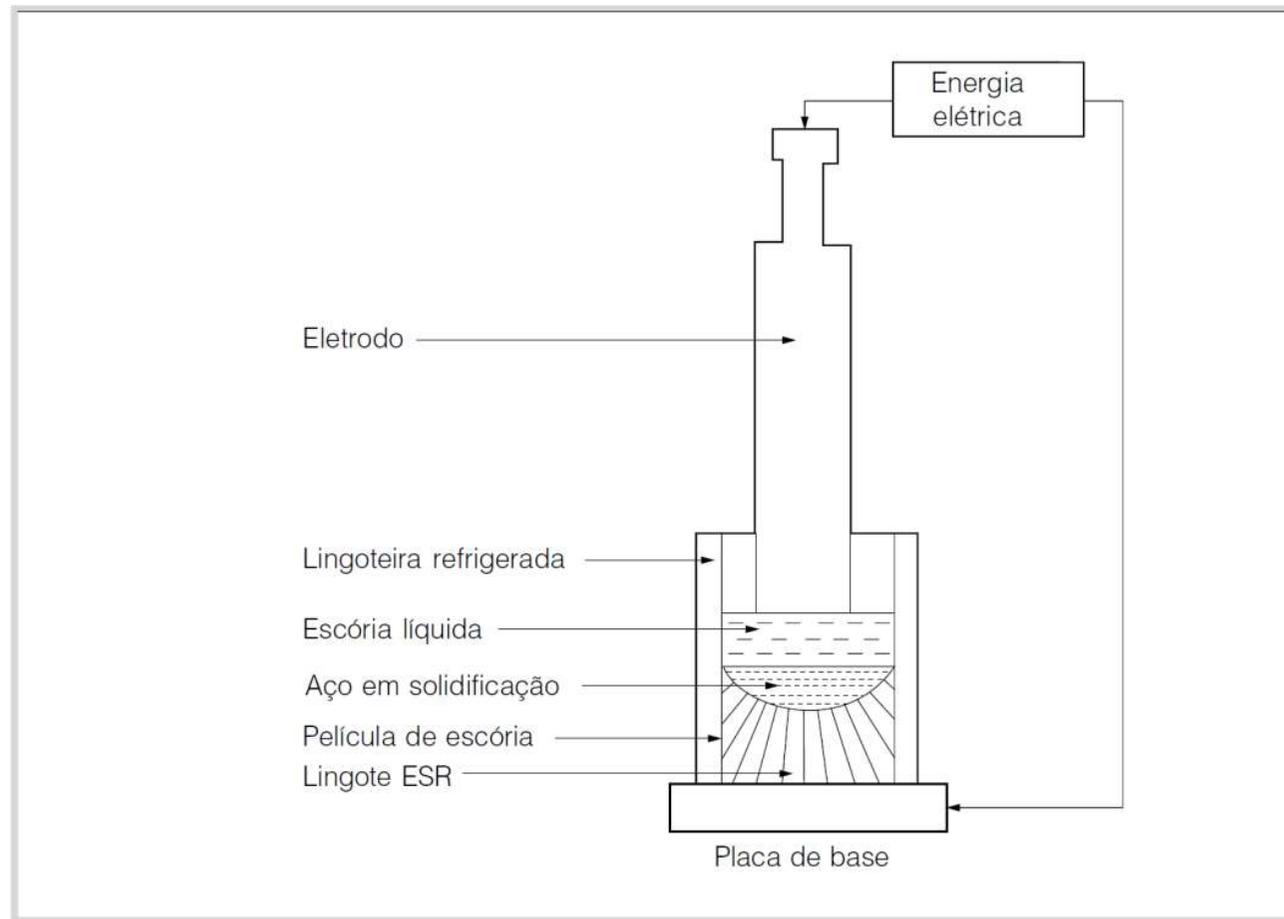


Figura 9.17 Esquema de um forno de refusão sob escória (*Electroslag remelting* – ESR).

# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

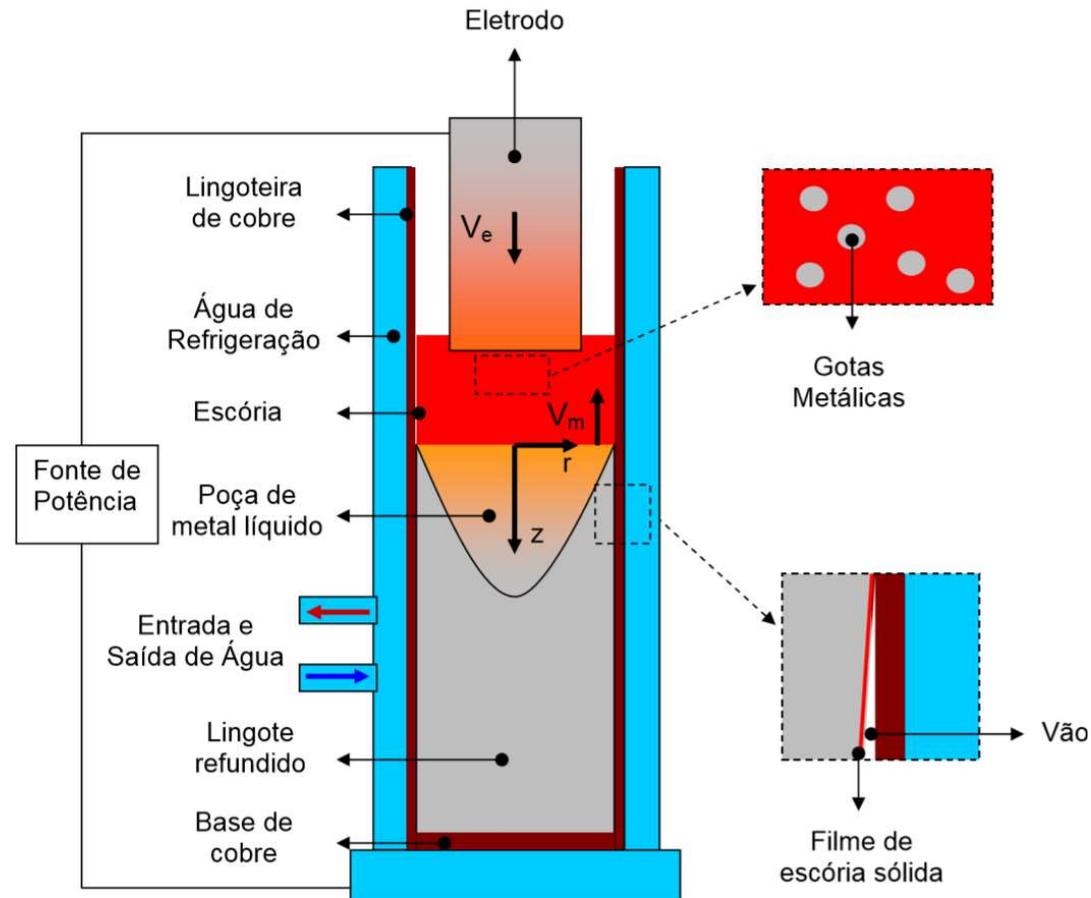


Figura 1 - Desenho esquemático do forno ESR com lingoteira estática, onde  $V_m$  indica a velocidade de crescimento do lingote refundido e  $V_e$  a velocidade de descida do eletrodo.

# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA



Terminais de Retorno da  
Corrente Elétrica

Porta Eletrodo

Eletrodo

Figura 3 - Foto lateral da parte superior forno ESR número 1 da Villares Metals S.A..

# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

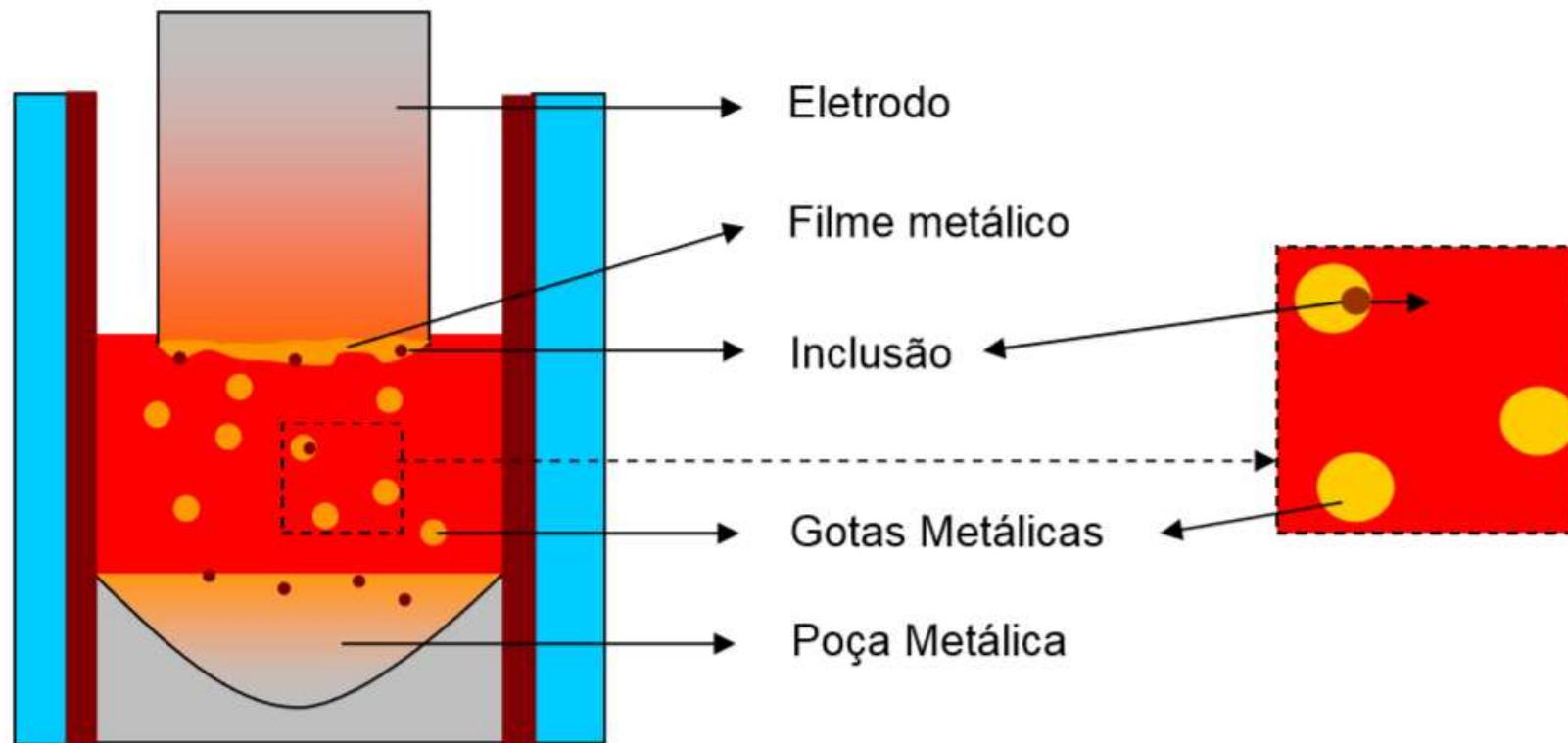
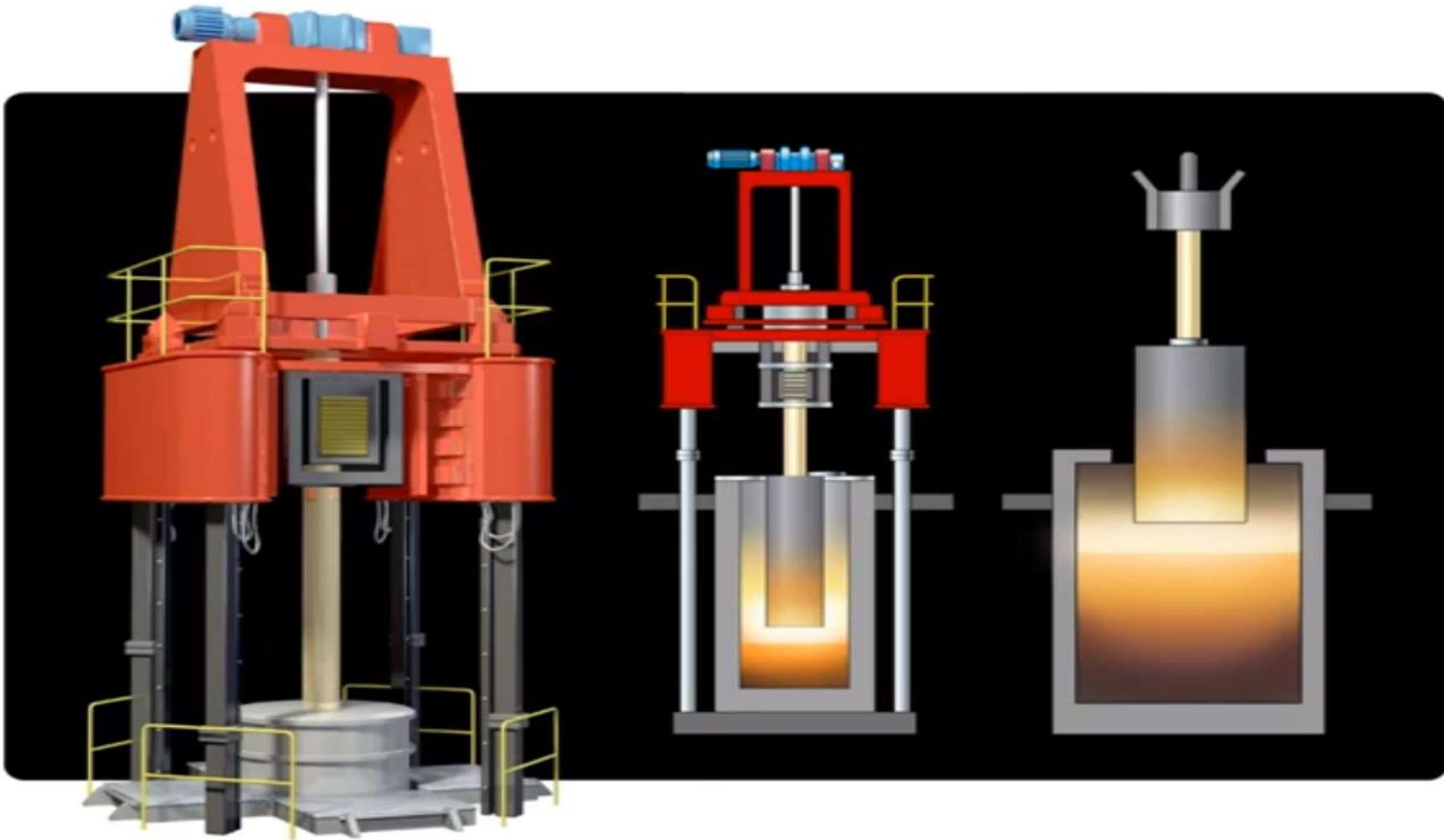


Figura 7 - Detalhe dos sítios onde ocorre a interação entre as inclusões e a escória.

# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA



# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

Os lingotes produzidos pelo processo ESR apresentam as seguintes vantagens em relação àqueles produzidos pelos processos convencionais (DUCKWOTH e HOYLE, 1969):

1. Estrutura bruta de solidificação isenta de rechupes e poros;
2. Inclusões em menor quantidade e menor tamanho;
3. Estrutura metalúrgica (grãos e dendritas) mais refinada;
4. Maior ductilidade e tenacidade;
5. Maior rendimento metalúrgico (relação entre os pesos do produto final e do lingote);
6. Melhores propriedades a altas temperaturas, como a resistência à fluência;
7. Melhor qualidade superficial devido à formação de um filme de escória entre o lingote e a parede lateral da lingoteira (a remoção de defeitos superficiais antes do trabalho a quente posterior não é necessária).

# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

Duckworth e Hoyle (1969) ainda ressaltaram as seguintes vantagens do processo ESR em relação aos processos de lingotamento convencionais:

1. Menor quantidade de deformação a quente requerida posteriormente à refusão para que o centro do produto final atinja as especificações metalúrgicas necessárias (tenacidade, resistência à tração, distribuição de carbonetos);
2. Melhor controle sobre a direção e velocidade de solidificação;
3. Melhor controle do tamanho de grão e, no caso de aços rápidos, do tamanho de carbonetos;
4. Redução controlada de elementos indesejáveis como o enxofre e o oxigênio, e diminuição da oxidação de elementos geralmente muito oxidados, como o silício e o titânio.

# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

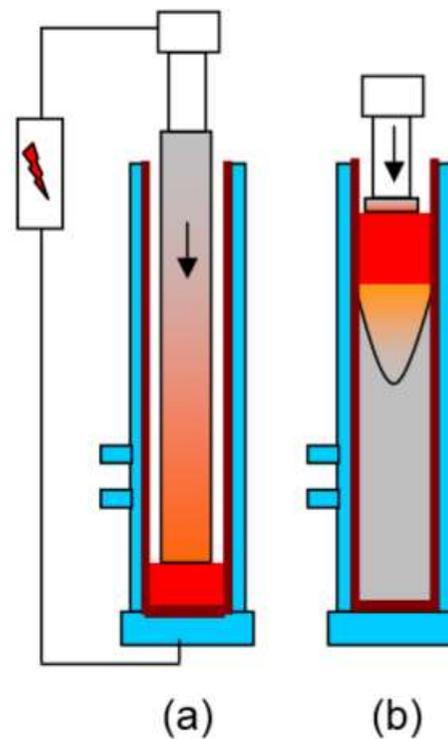


Figura 8 - Forno com lingoteira estática utilizando apenas um eletrodo: (a) início e (b) final da refusão.

# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

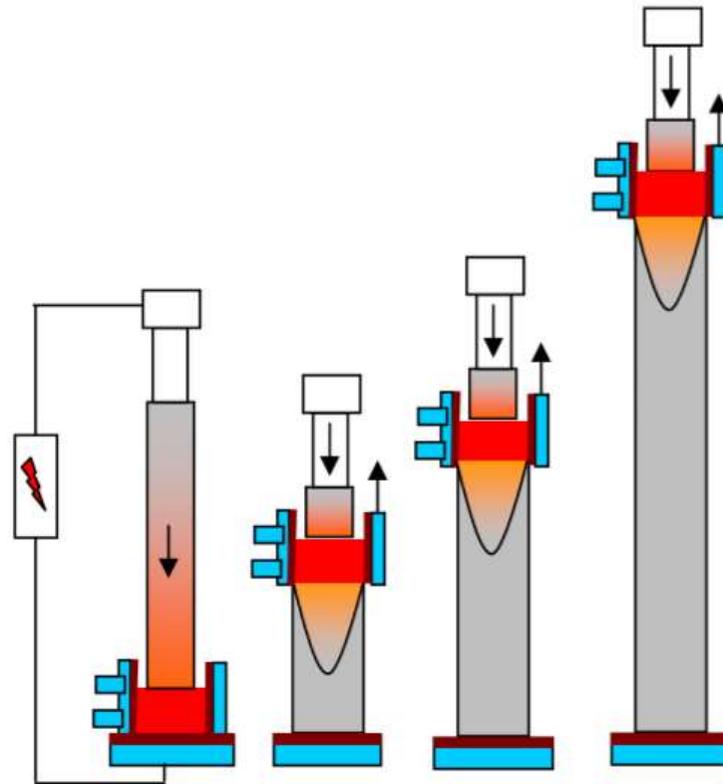
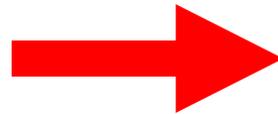
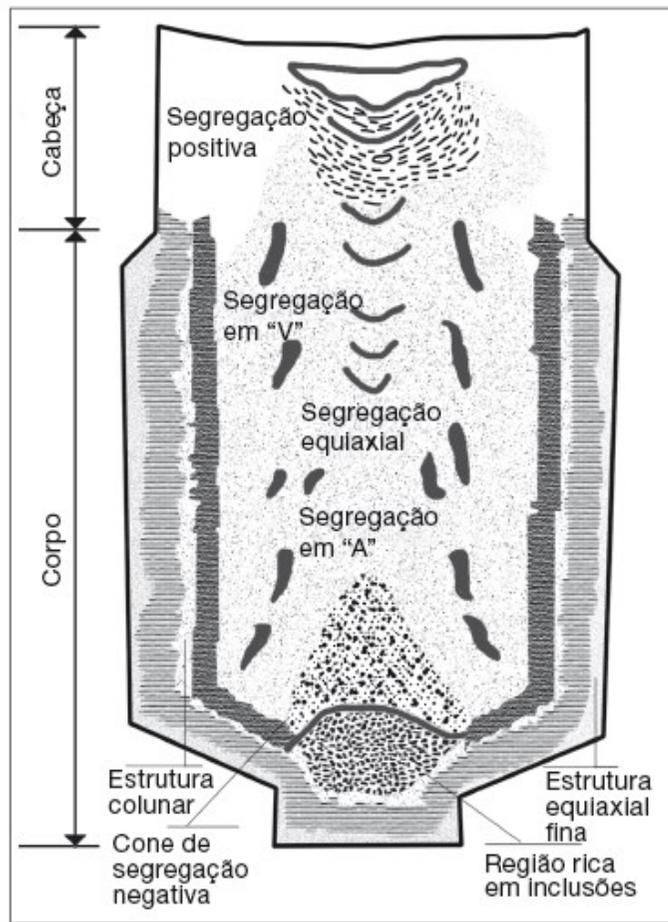
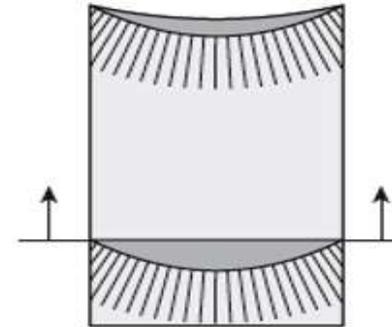


Figura 9 - Seqüência de etapas consecutivas na refusão de um lingote no forno com lingoteira deslizante utilizando seqüencialmente 3 eletrodos.

# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA



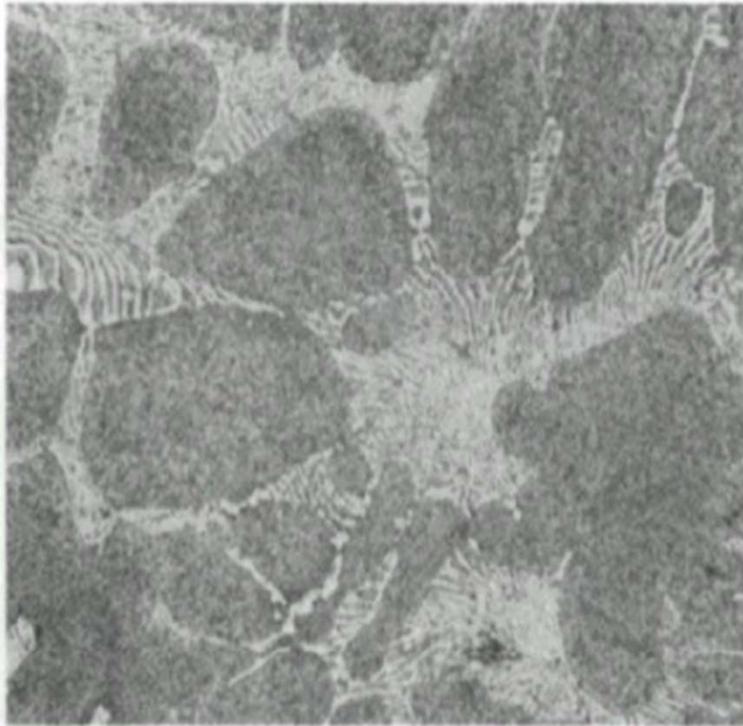
Solidificação progressiva



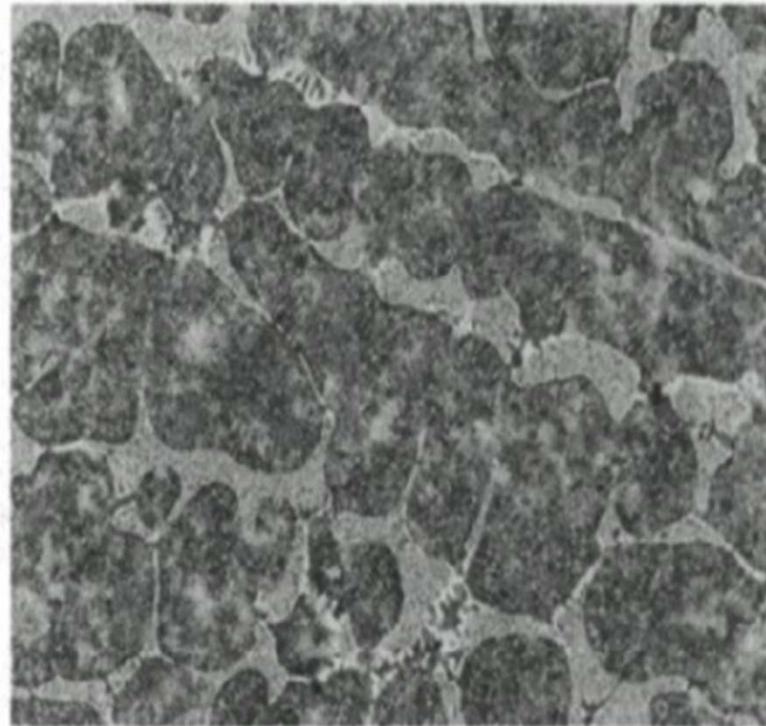
Lingote refundido



Ausência de macrossegregação  
Homogêneo e denso  
Inclusões dispersas

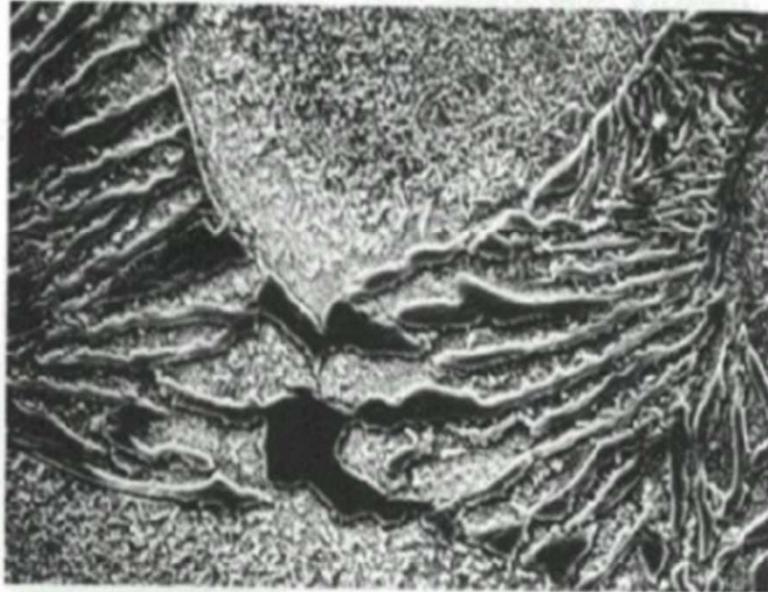


(a)

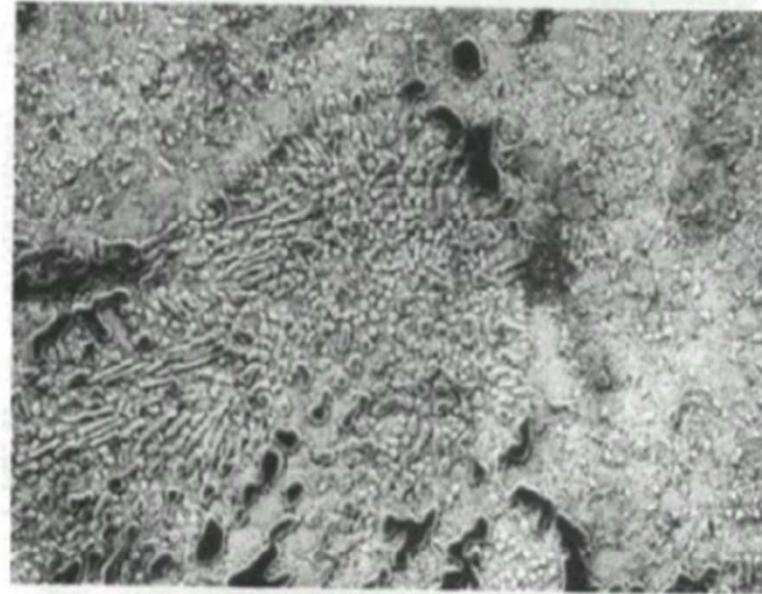


(b)

**Fig. 3-5** Eutectic cell size for 1360 kg (3000 lb) M42 high-speed steel ingots produced by conventional static casting (a) and ESR (b). 30x, center position. Courtesy of Allvac



(a)



(b)

**Fig. 3-6** Eutectic carbide particle size for 1360 kg (3000 lb) M42 high-speed steel ingots produced by conventional static casting (a) and ESR (b). 610 $\times$ , center position. Courtesy of Allvac

# PROCESSO DE REFINO POR ELETROESCÓRIA

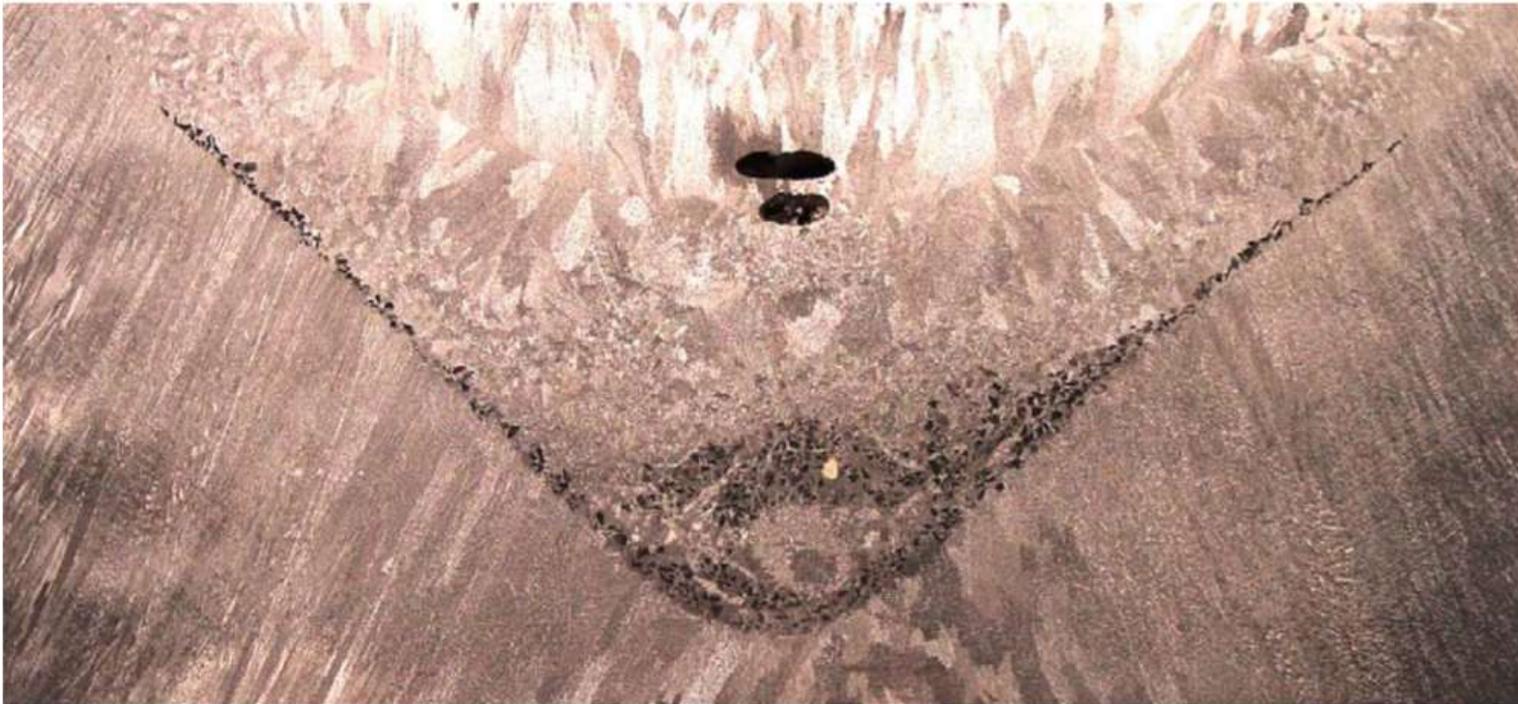
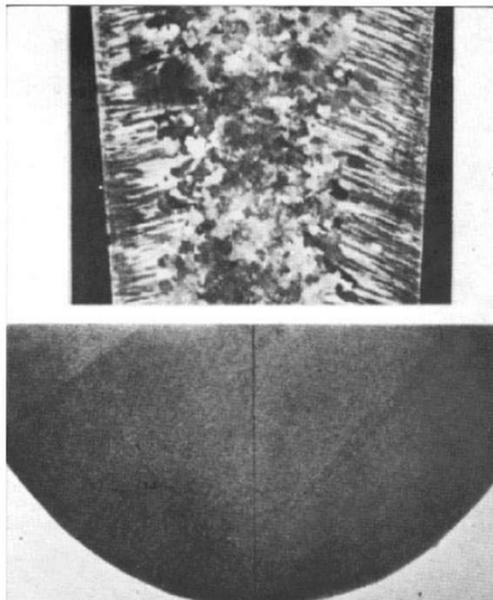
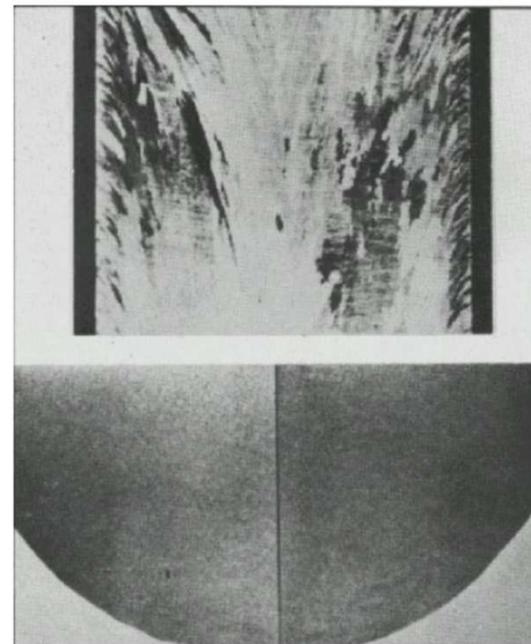


Figura 51 - Macrografia obtida a partir da seção longitudinal da cabeça de um lingote de 20 polegadas de diâmetro da liga VI138 (ASTM F138)

**MACROESTRUTURA  
CONVENCIONAL**

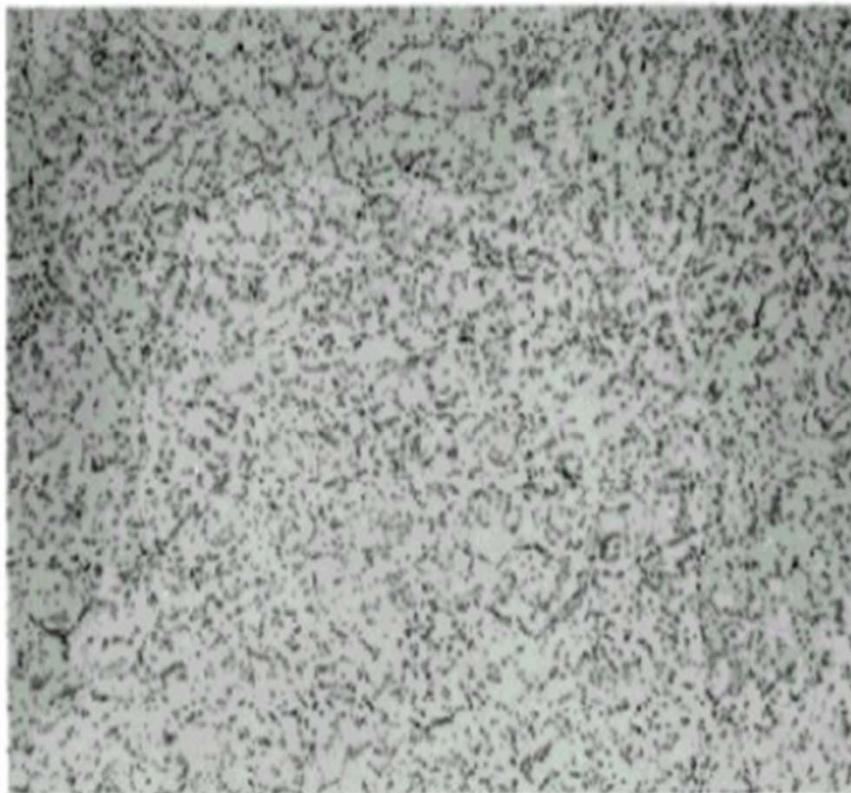


**MACROESTRUTURA  
ESR**



## RECOZIMENTO ESPECIAL - MATERIAL ISOMAX

**Cabeça**

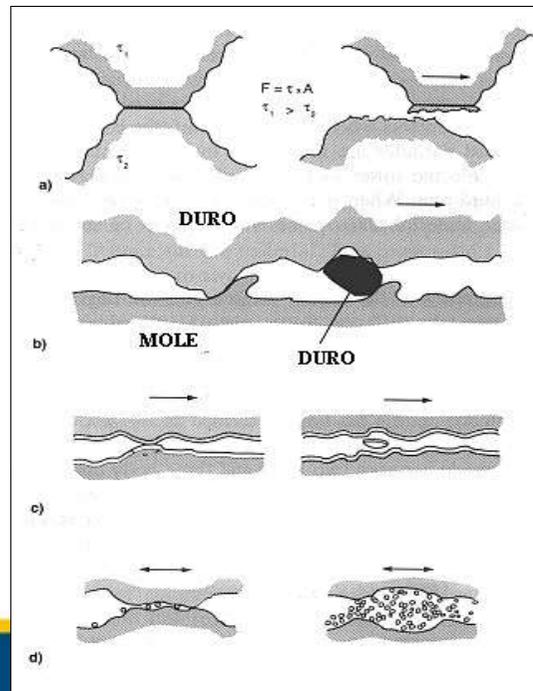


**Pé**



# TIPOS DE DESGASTE:

<b>Autor ou referência</b>	<b>Mecanismo de desgaste</b>
Burwell e Strang	Abrasivo, adesivo, corrosivo, fadiga de superfície, atrito corrosivo, erosão e cavitação
Jahamir	Adesão, delaminação, atrito corrosivo, abrasão, erosão, impacto, fadiga de superfície, corrosão, difusão e contato elétrico
Godfrey	Adesivo simples, adesivo severo, abrasão, erosão, fadiga, delaminação, corrosão, eletrocorrosão, atrito corrosivo, cavitação, descargas elétricas e polimento.
Rice	Adesão, abrasão, fadiga, corrosão ou oxidação e elétrico
DIN 50320	Adesão, abrasão, fadiga de superfície e tribo químico



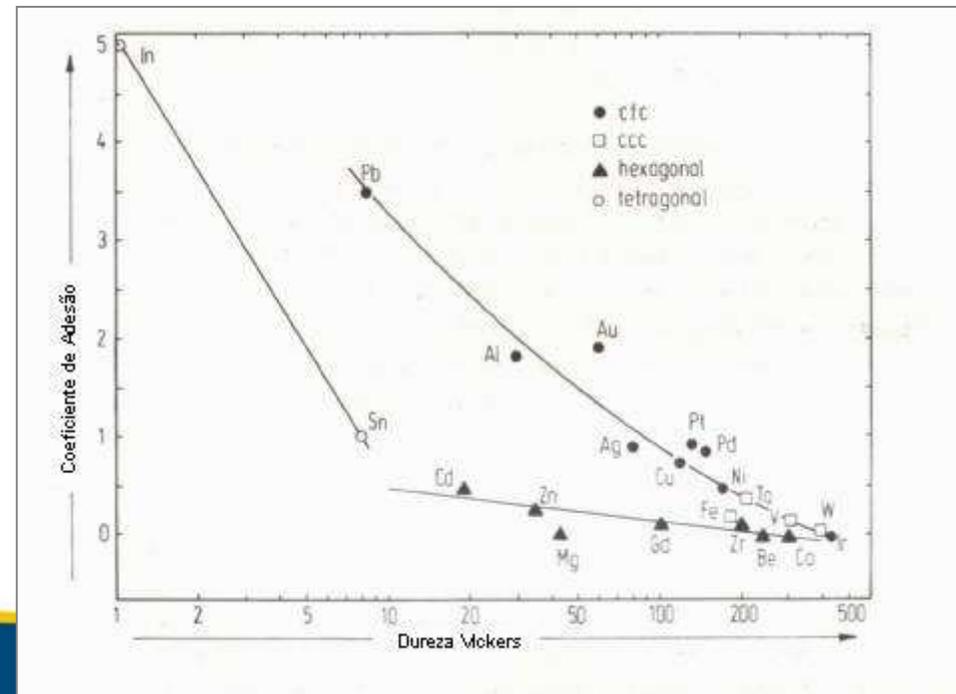
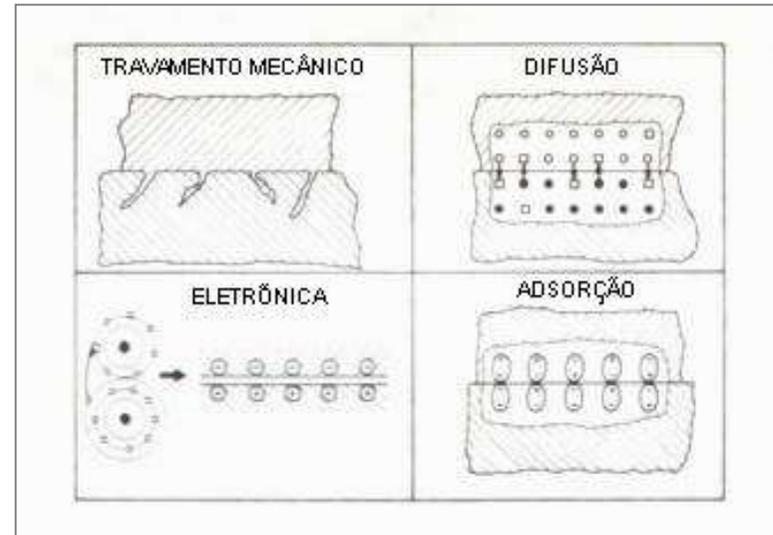
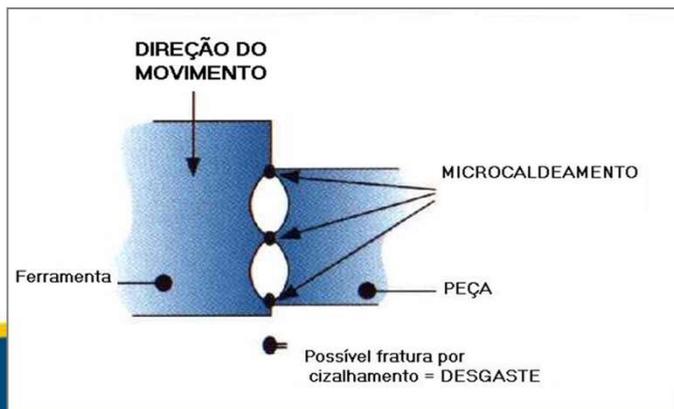
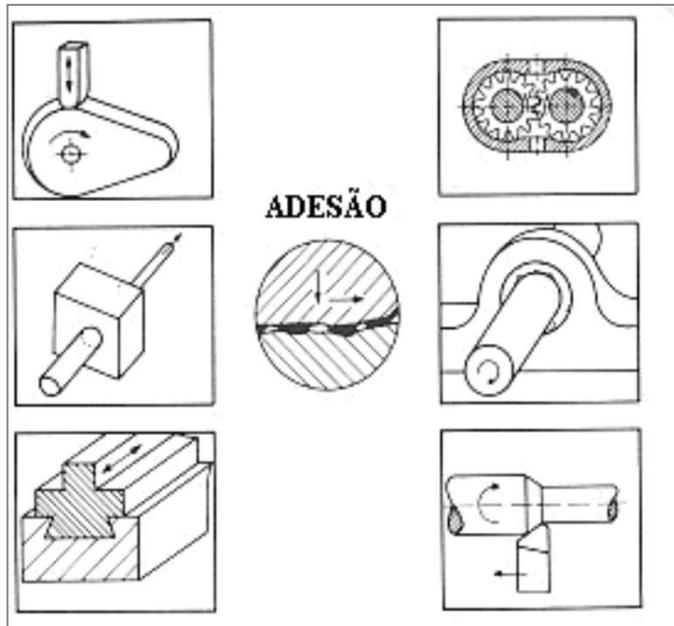
**(a) Desgaste ADESIVO**

**(b) Desgaste ABRASIVO**

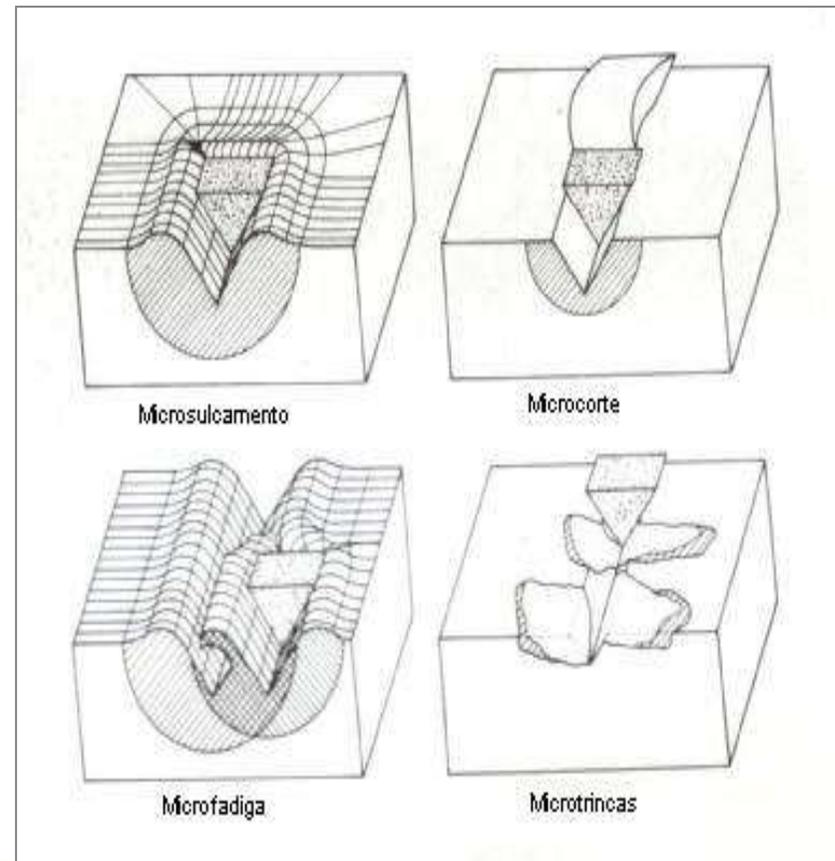
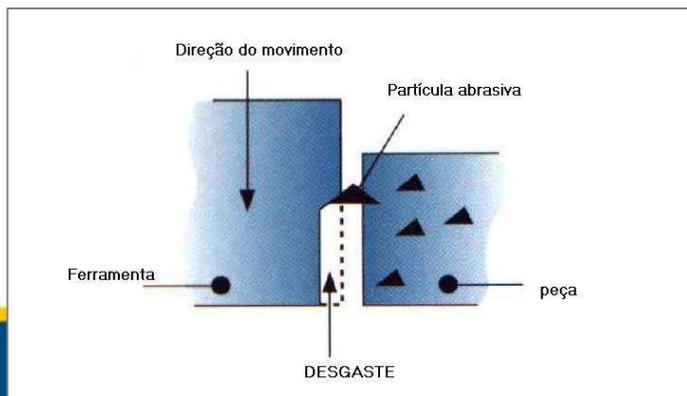
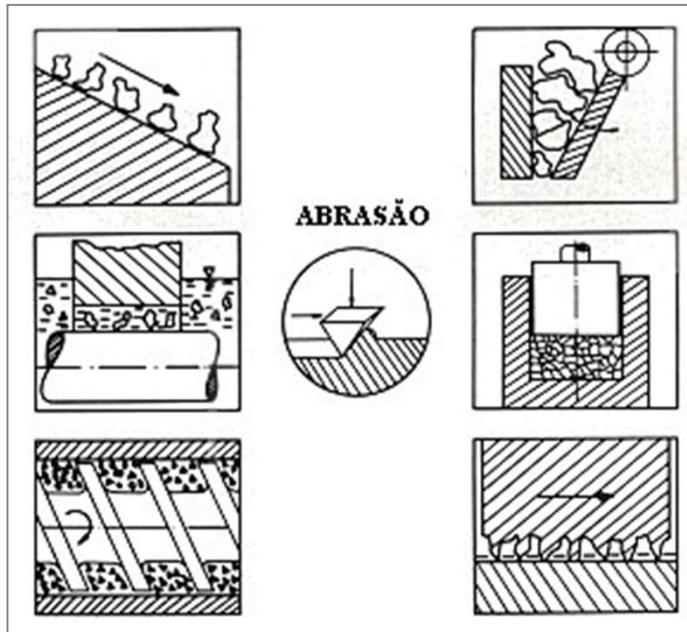
**(c) Desgaste por FADIGA**

**(d) Desgaste QUÍMICO**

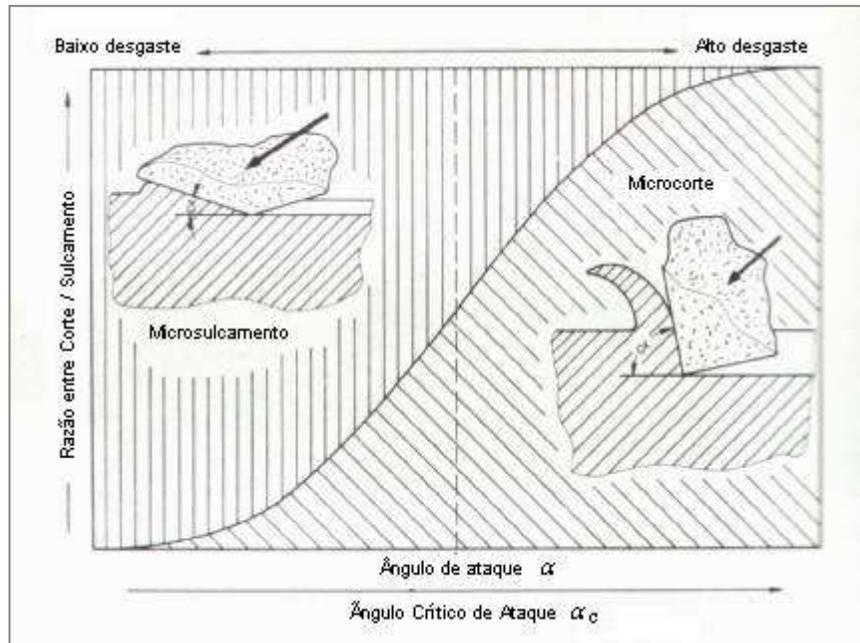
# ADESÃO



# ABRASÃO



# ABRASÃO

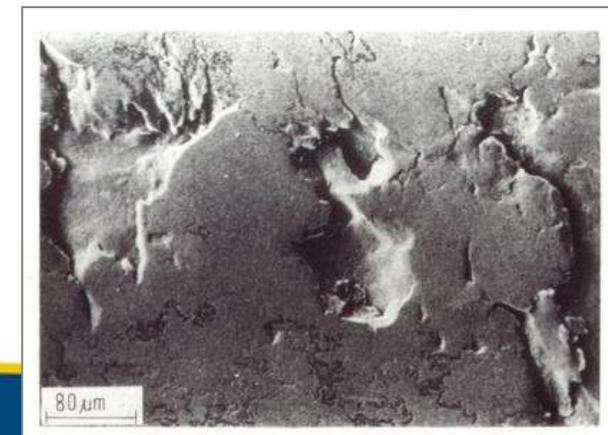
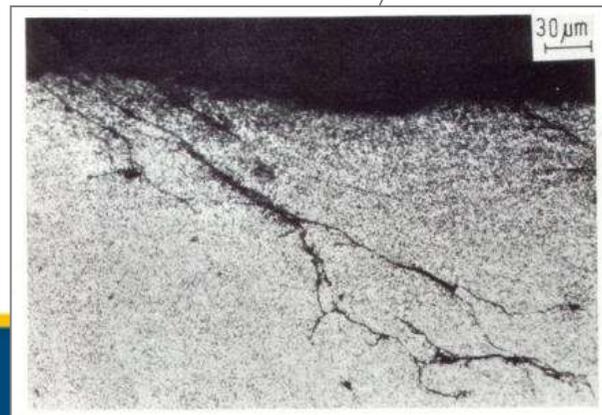
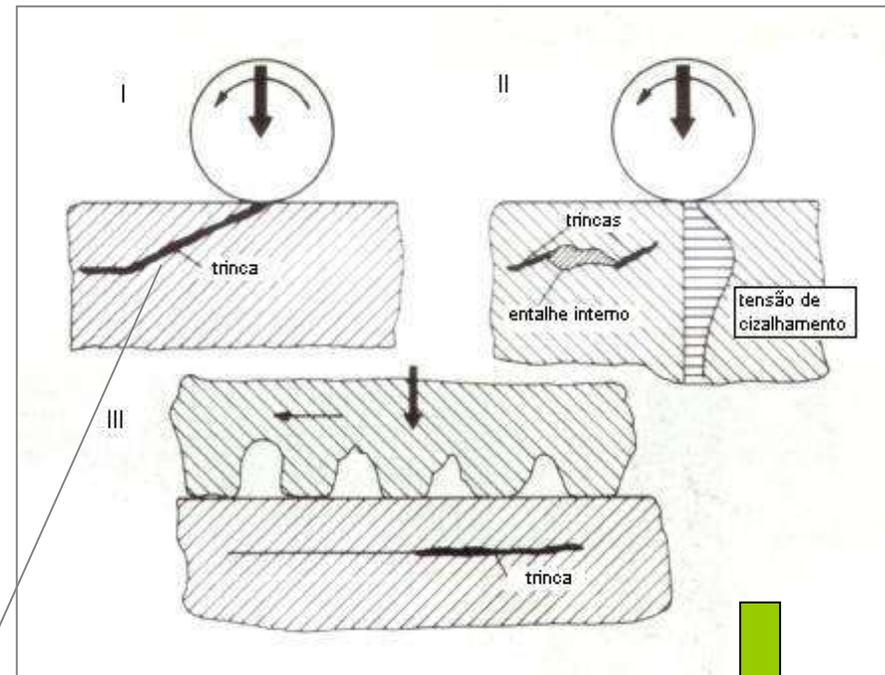
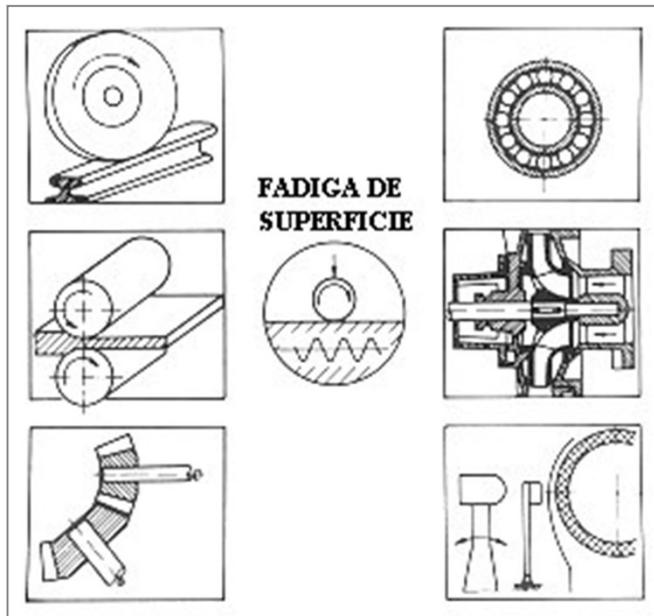


Razão entre microsulcamento e microcorte em função da razão entre o ângulo de ataque e o ângulo crítico  $\alpha_c$

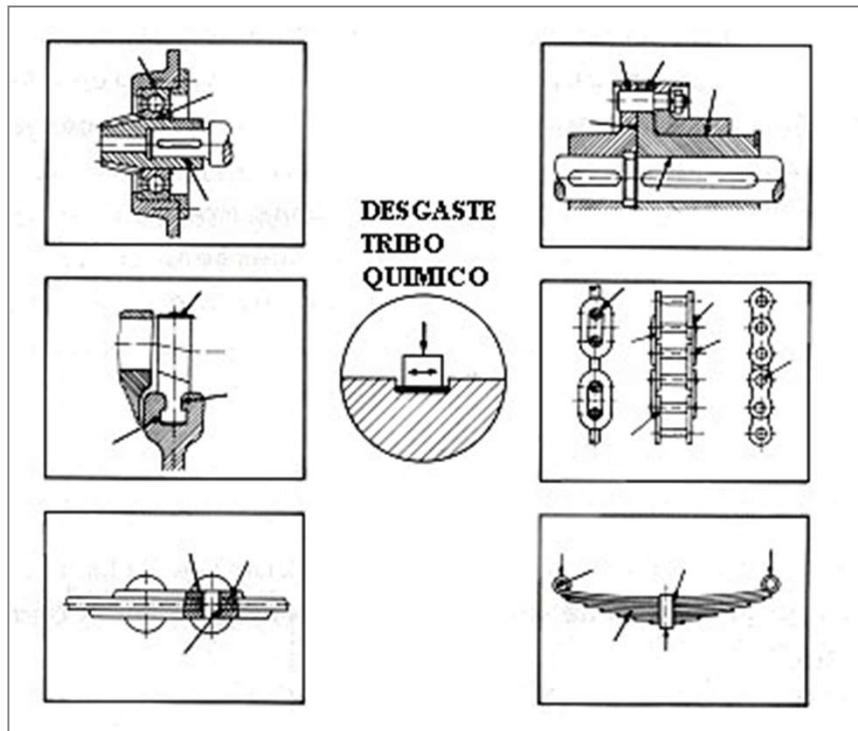
Micrografias mostrando: (a) microsulcamento, (b) microcorte e (c) microtrincas



# FADIGA DE SUPERFÍCIE



# REAÇÕES TRIBOQUÍMICAS

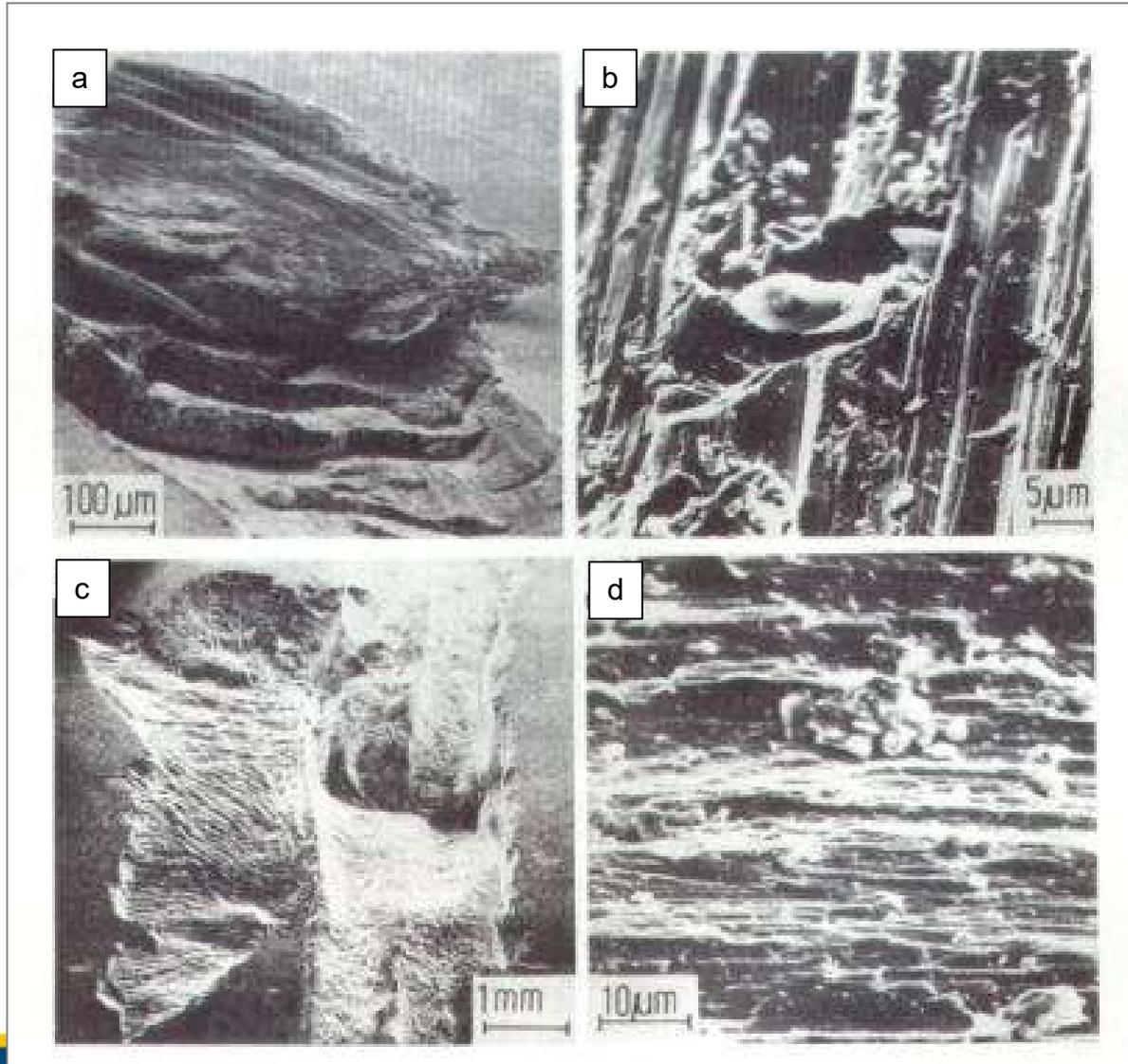


✓ Contato metálico entre as asperezas das superfícies que leva à remoção de metal por adesão.

✓ Reação química entre os metais e o ambiente resulta na formação de camadas superficiais protetoras que reduzem o contato metálico.

✓ Quebra da camada protetora superficial devido a altas pressões localizadas ou microfadiga, resulta na formação de detritos não metálicos.

✓ Detritos metálicos e não metálicos podem atuar de maneira abrasiva e tornar áspera as superfícies de contato. Novas formações de camadas protetoras podem diminuir novamente a aspereza das superfícies.



Aspecto superficial de superfícies desgastadas por:

(a) adesão

(b) Abrasão

(c) fadiga de superfície

(d) reações tribo-químicas

# FERRAMENTAS PARA INJEÇÃO DE ALUMÍNIO

## TRINCAS TÉRMICAS:

Causada pela fadiga térmica devida ao aquecimento e resfriamento alternado da superfície da ferramenta durante a fundição.



Superfície da ferramenta  
sem danos



Superfície da ferramenta,  
severamente atacada por  
fadiga térmica

# SOLUÇÃO IMEDIATA

- *NECESSIDADE:*

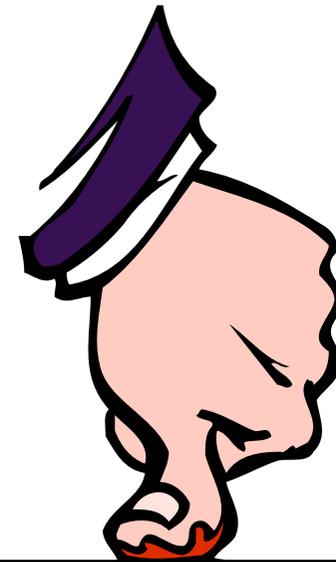
ALTA DUREZA SUPERFICIAL + NÚCLEO TENAZ

- *PRIMEIRA SOLUÇÃO*

NITRETAÇÃO

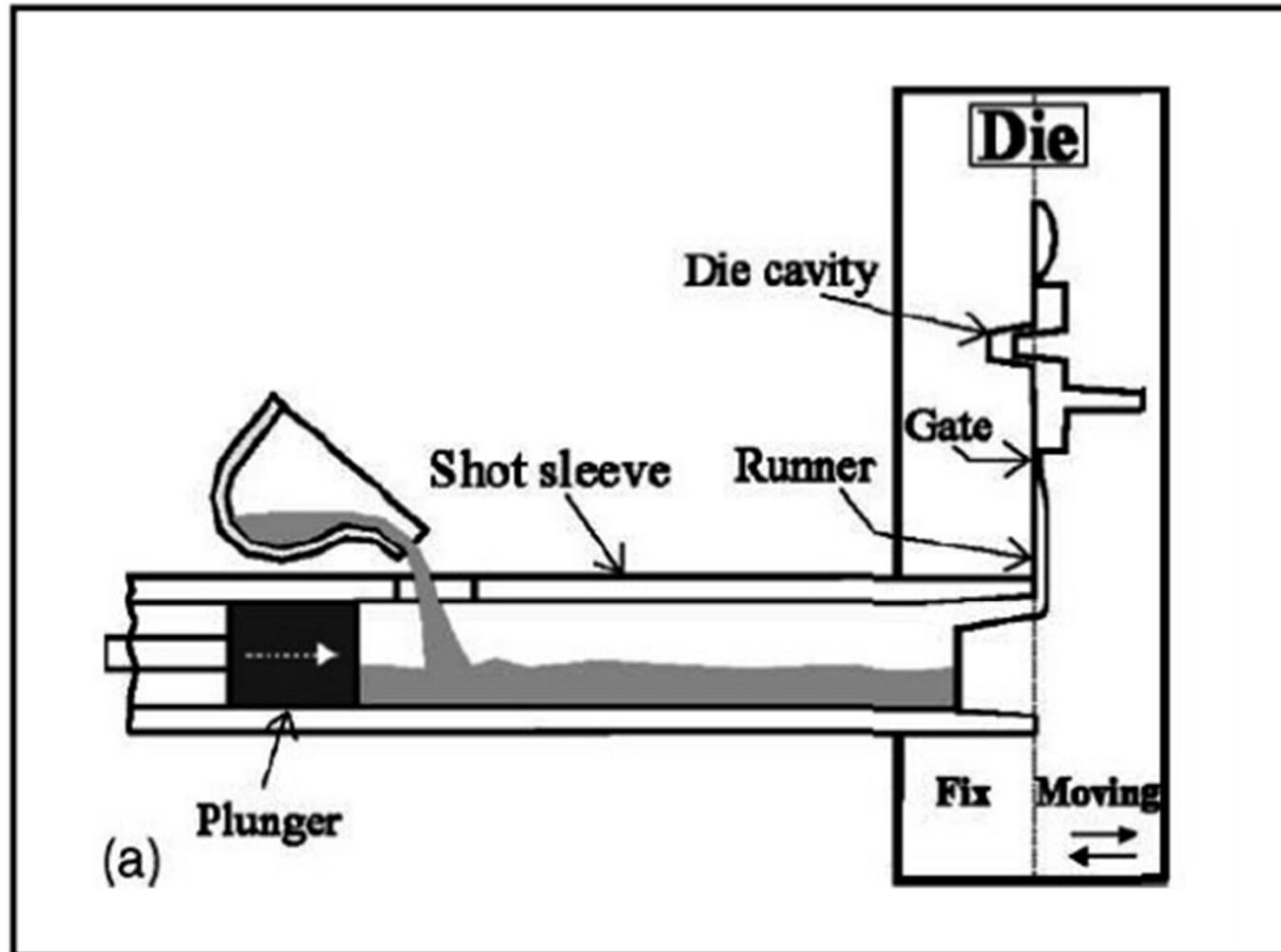
# PREVENÇÃO DO DESGASTE

- *Redução do atrito*
- *Aumento da dureza*
- *Resistência à oxidação*
- *Aumento do limite de fadiga*

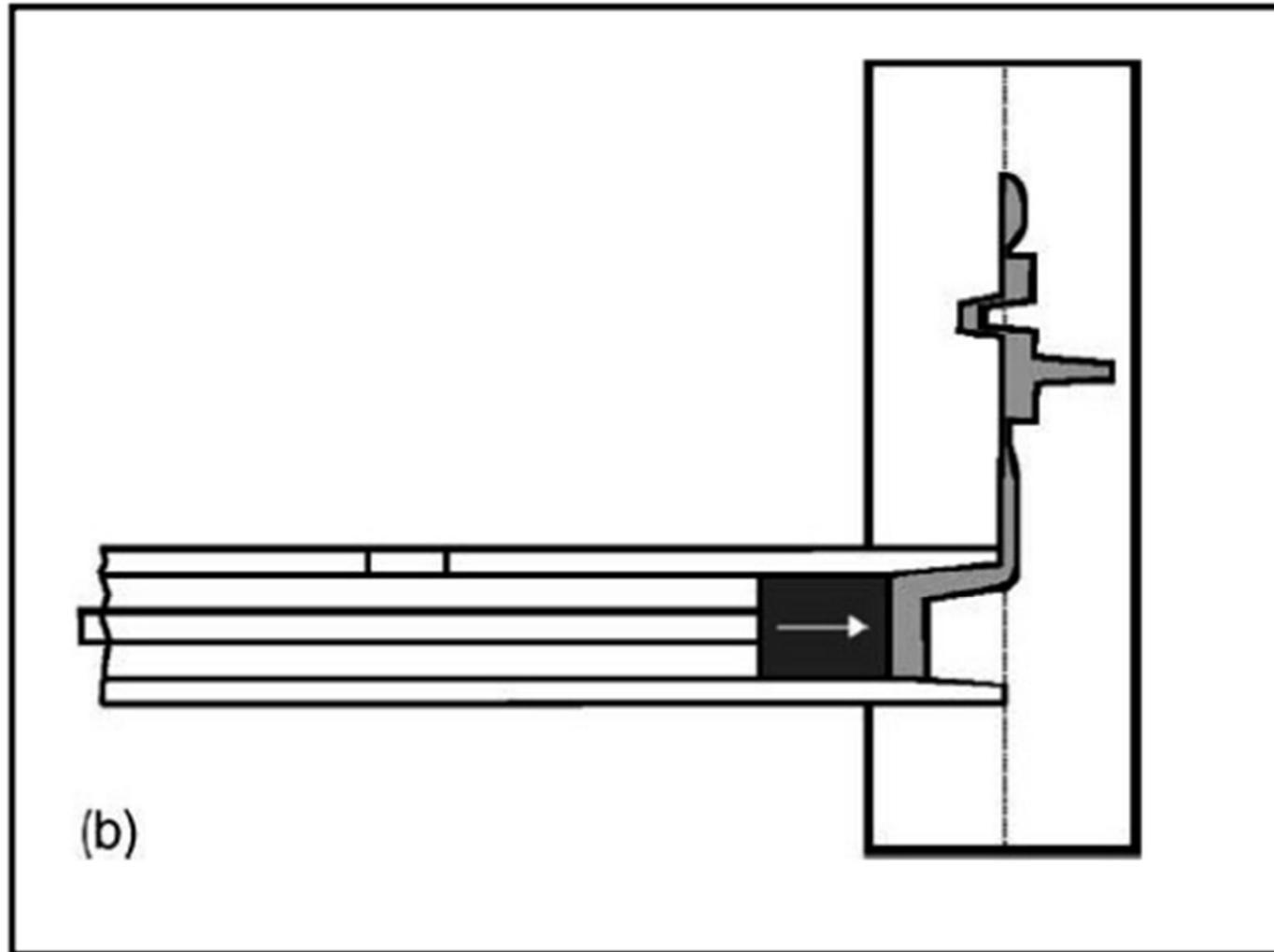


**ENGENHARIA  
DE  
SUPERFÍCIE**

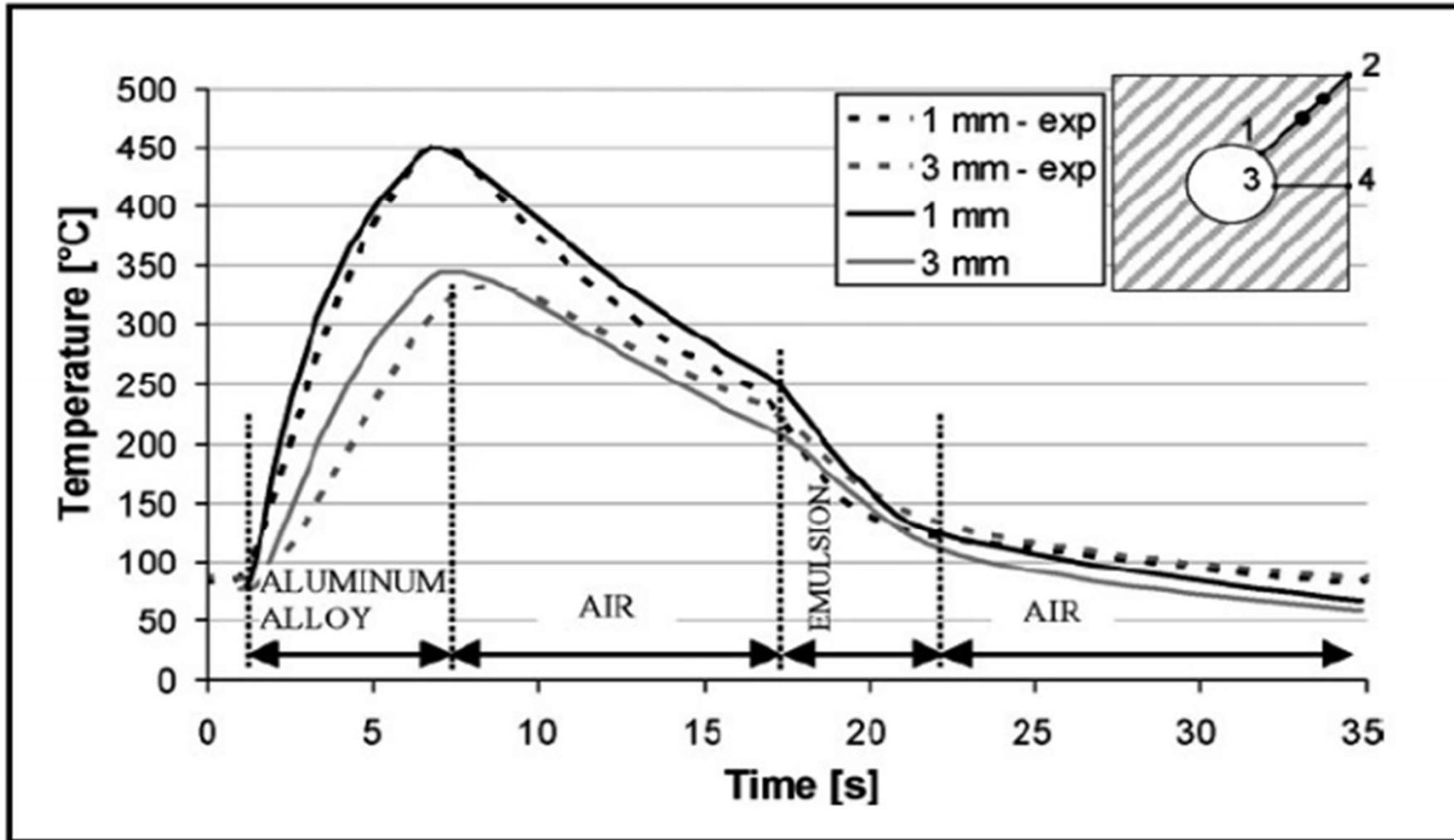
# Fundição Sob Pressão



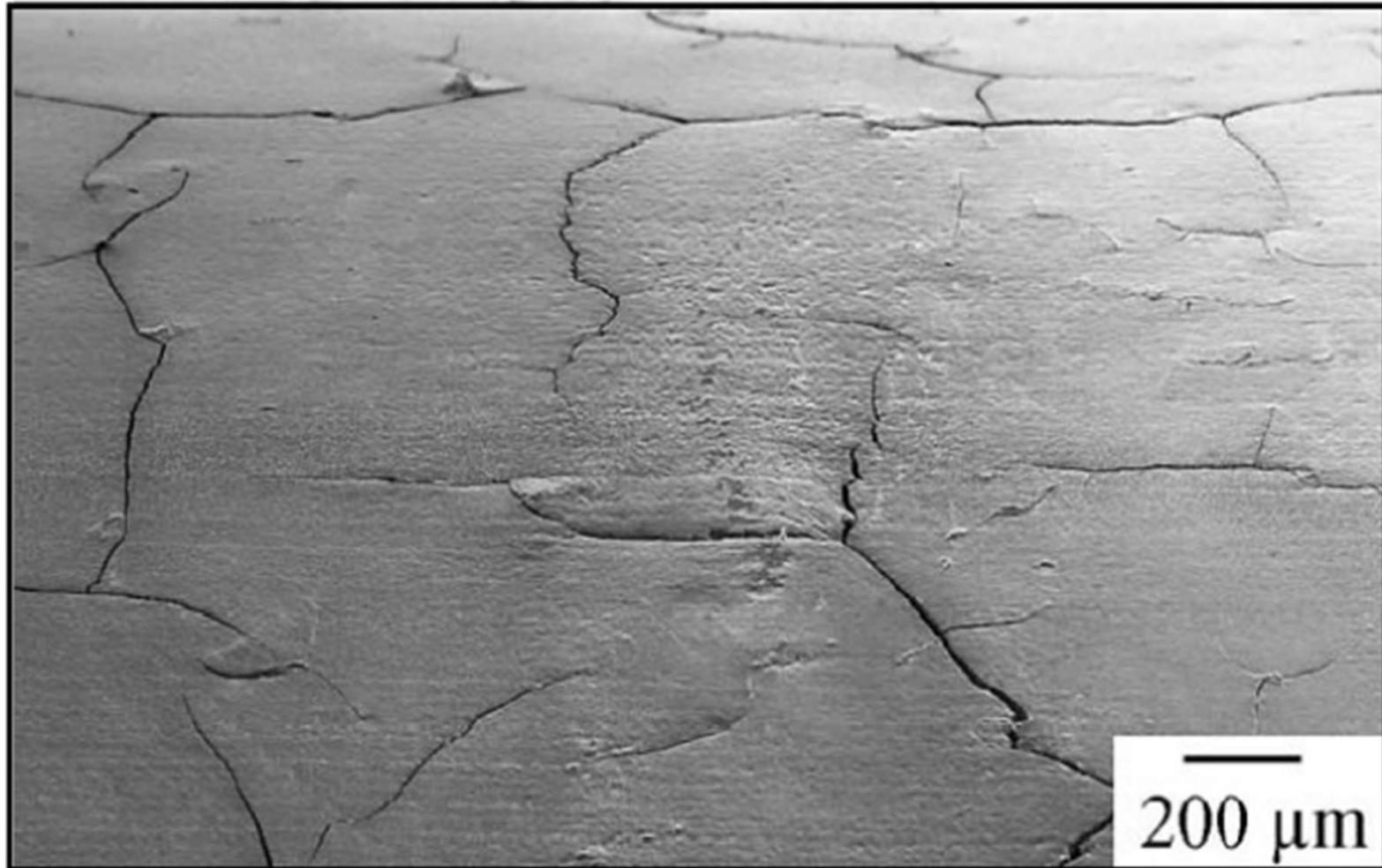
# Fundição Sob Pressão



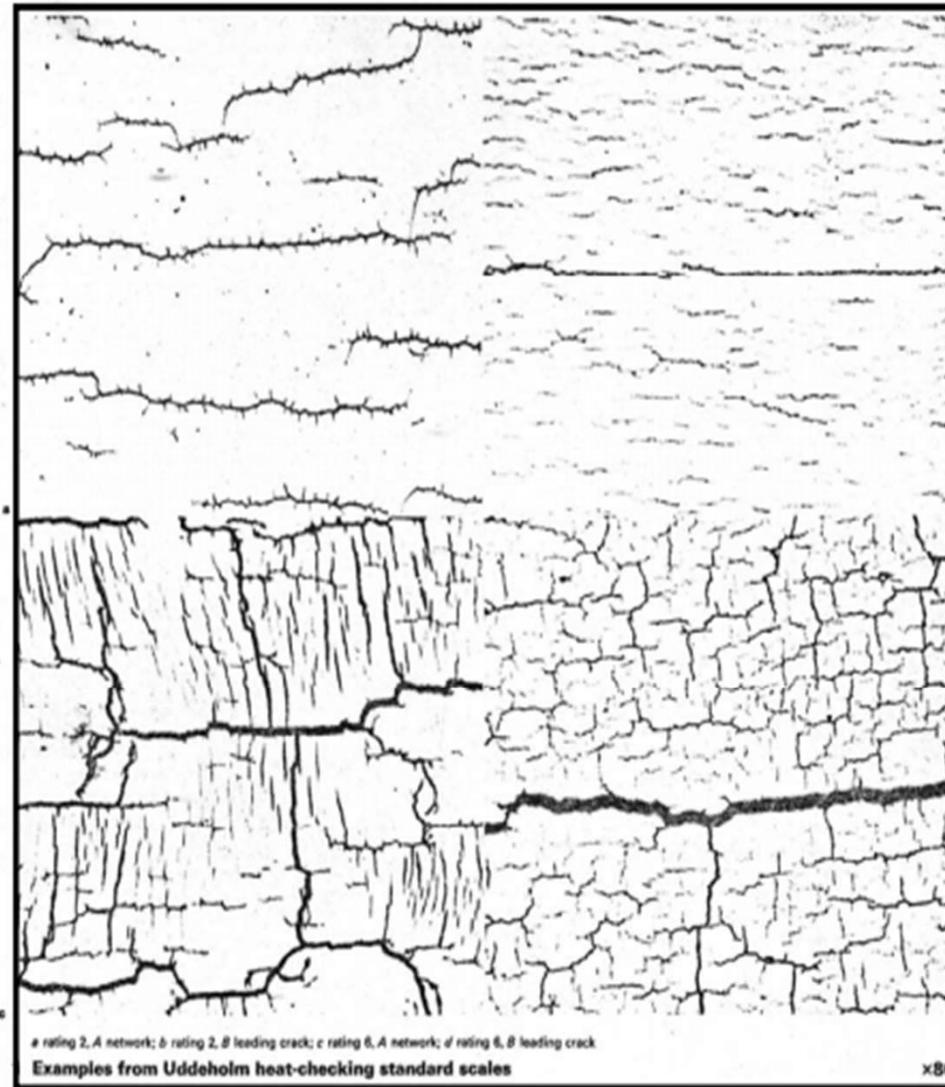
# Fundição Sob Pressão – Perfil de Temperatura



## Fundição Sob Pressão – Trincas na Superfície



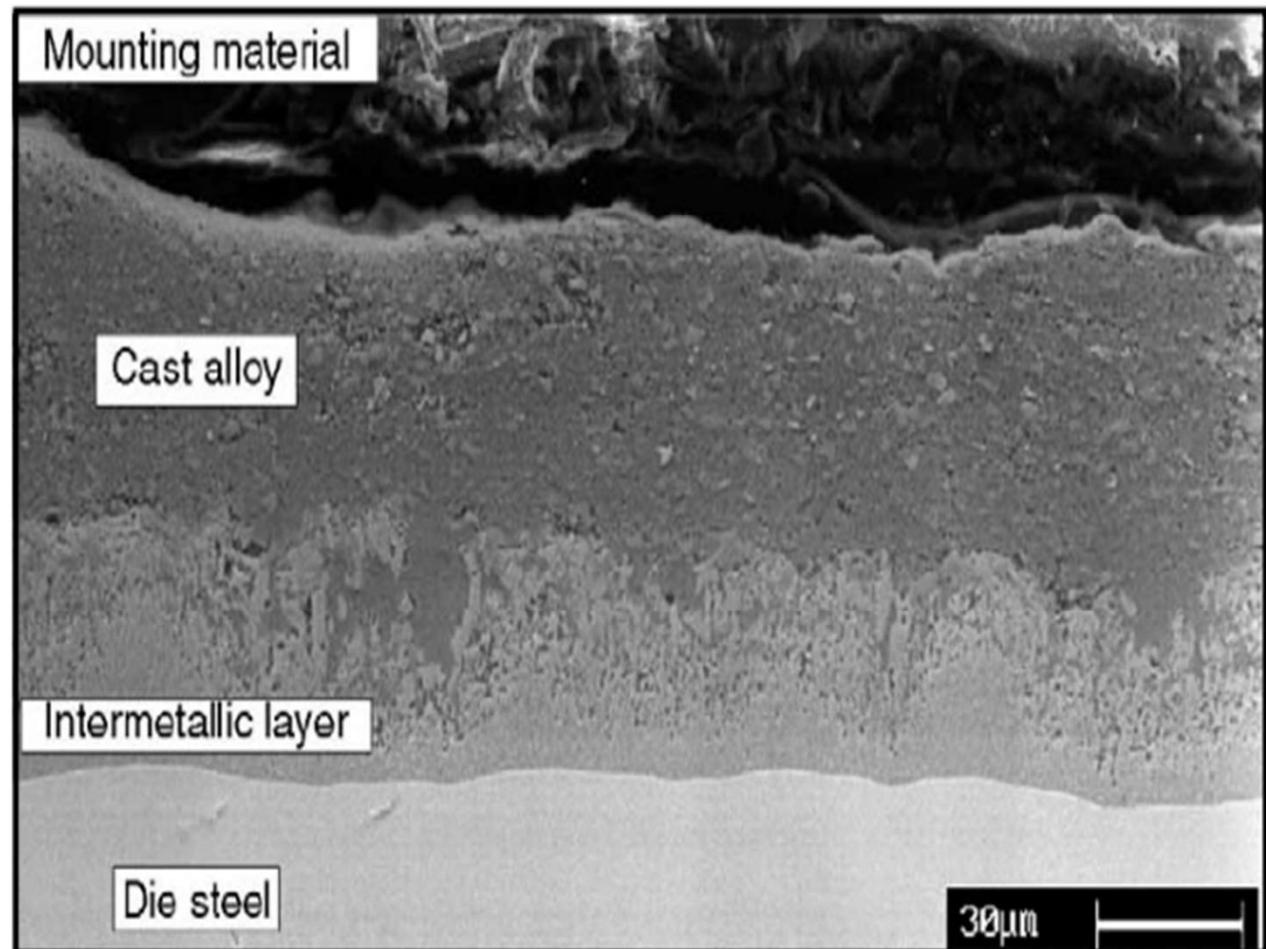
# Fundição Sob Pressão – Padrão de Trincas na Superfície



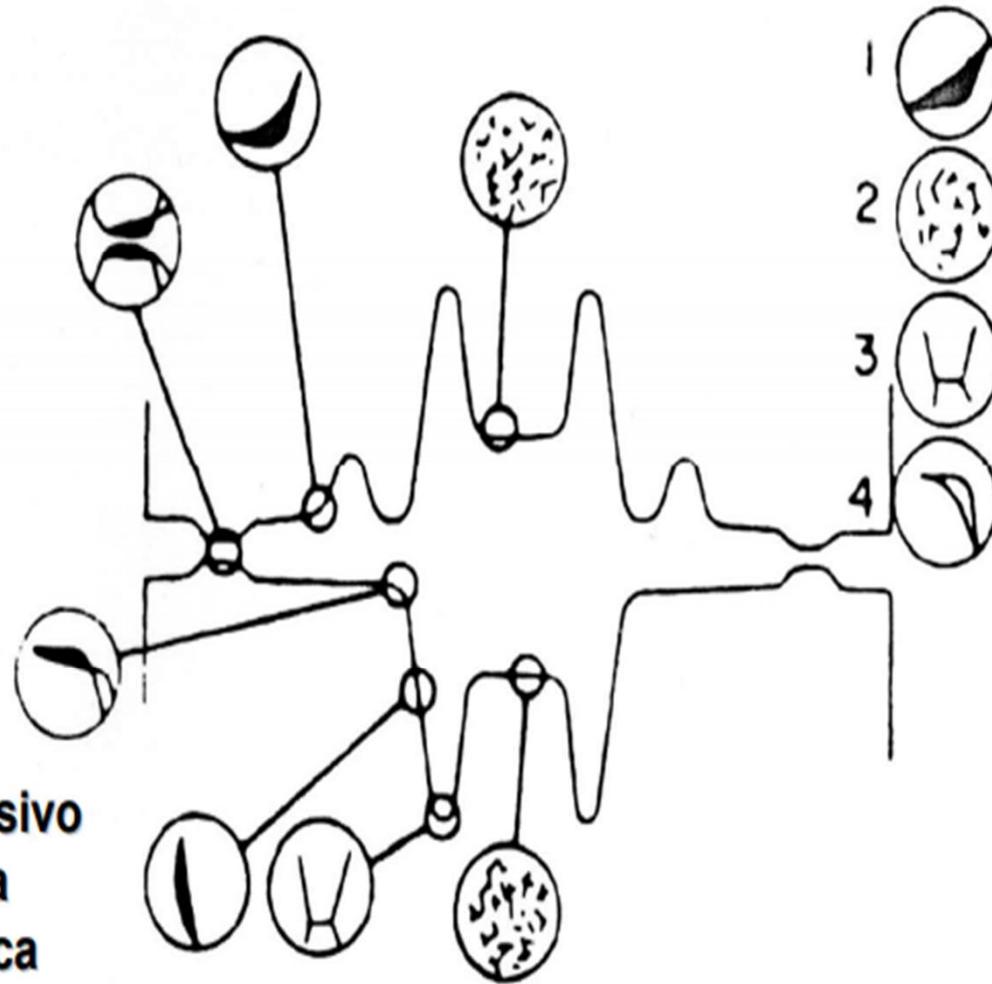
## Fundição Sob Pressão – Formação de Trincas



## Fundição Sob Pressão – Soldering (Corrosão)



# MECANISMOS DE FALHA DE MATRIZES DE FORJAMENTO



- 1 – Desgaste Abrasivo
- 2 – Fadiga Térmica
- 3 – Fadiga Mecânica
- 4 – Deformação Plástica

# NITRETAÇÃO

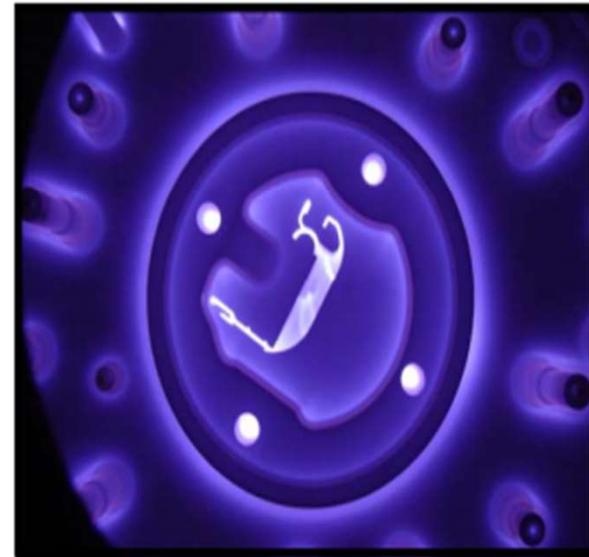
**Objetivo:** Introdução de nitrogênio no aço, melhorando a resistência à fadiga, ao desgaste e resistência ao ataque químico.

- **Temperatura: 500-570°C**  
Após nitretação não é necessário Têmpera para produzir o endurecimento da camada nitretada.
- **Dureza da camada: 70HRC**

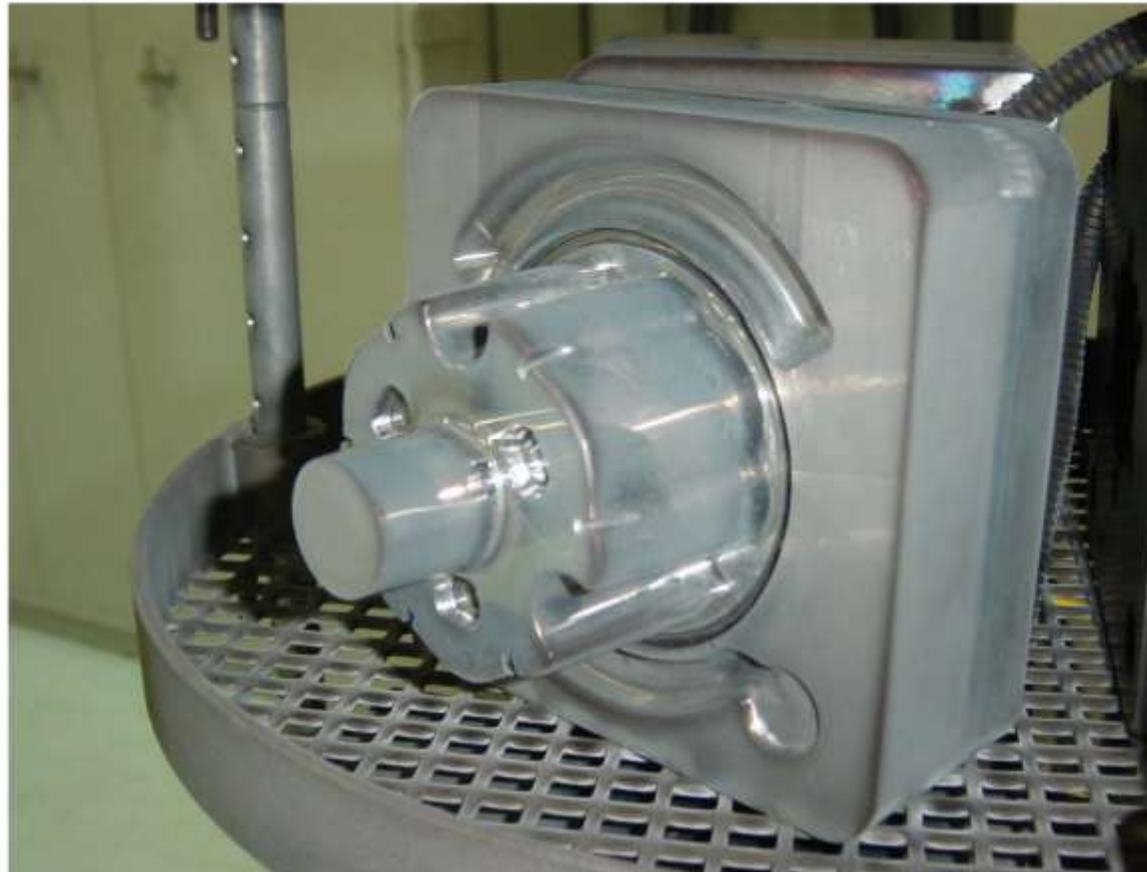
## Nitreção sob Plasma

### Principais Vantagens:

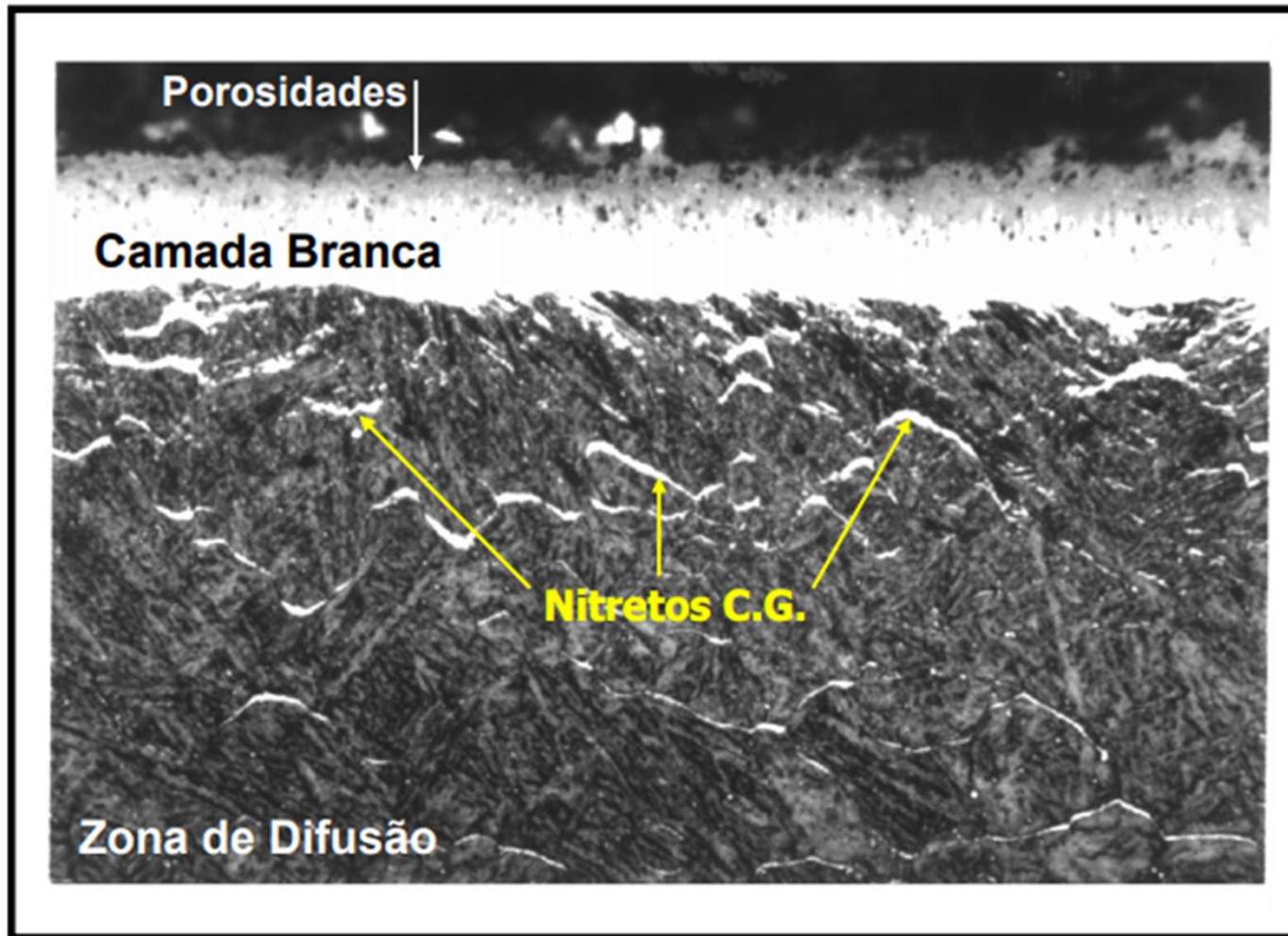
- Não causa dano ambiental ou a saúde.
- Elevada reprodutibilidade.
- Eliminação da Camada de Compostos.
- Controla Camada de Compostos,
- Baixa variação dimensional,
- Possibilidade de nitreção localizada,
- Oxidação superficial sob plasma,
- Geração de superfícies Dúplex.



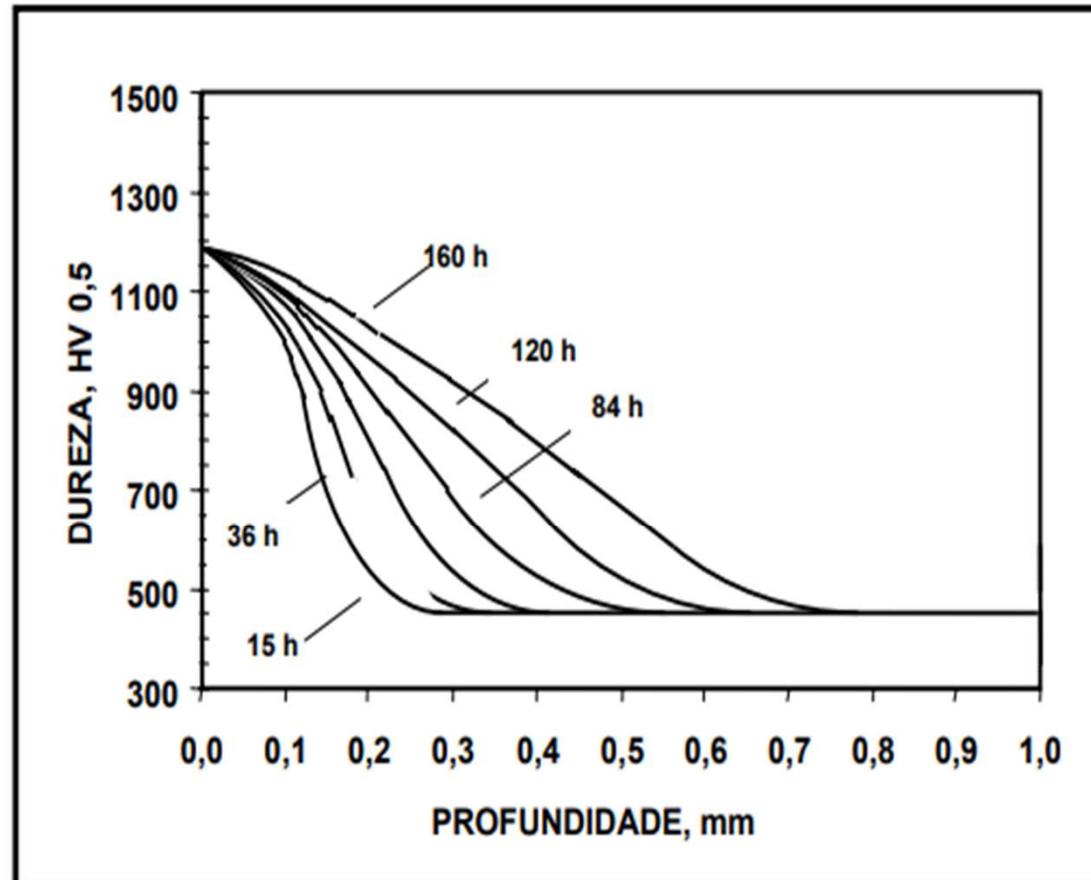
## AÇOS FERRAMENTA: TRATAMENTOS SUPERFICIAIS



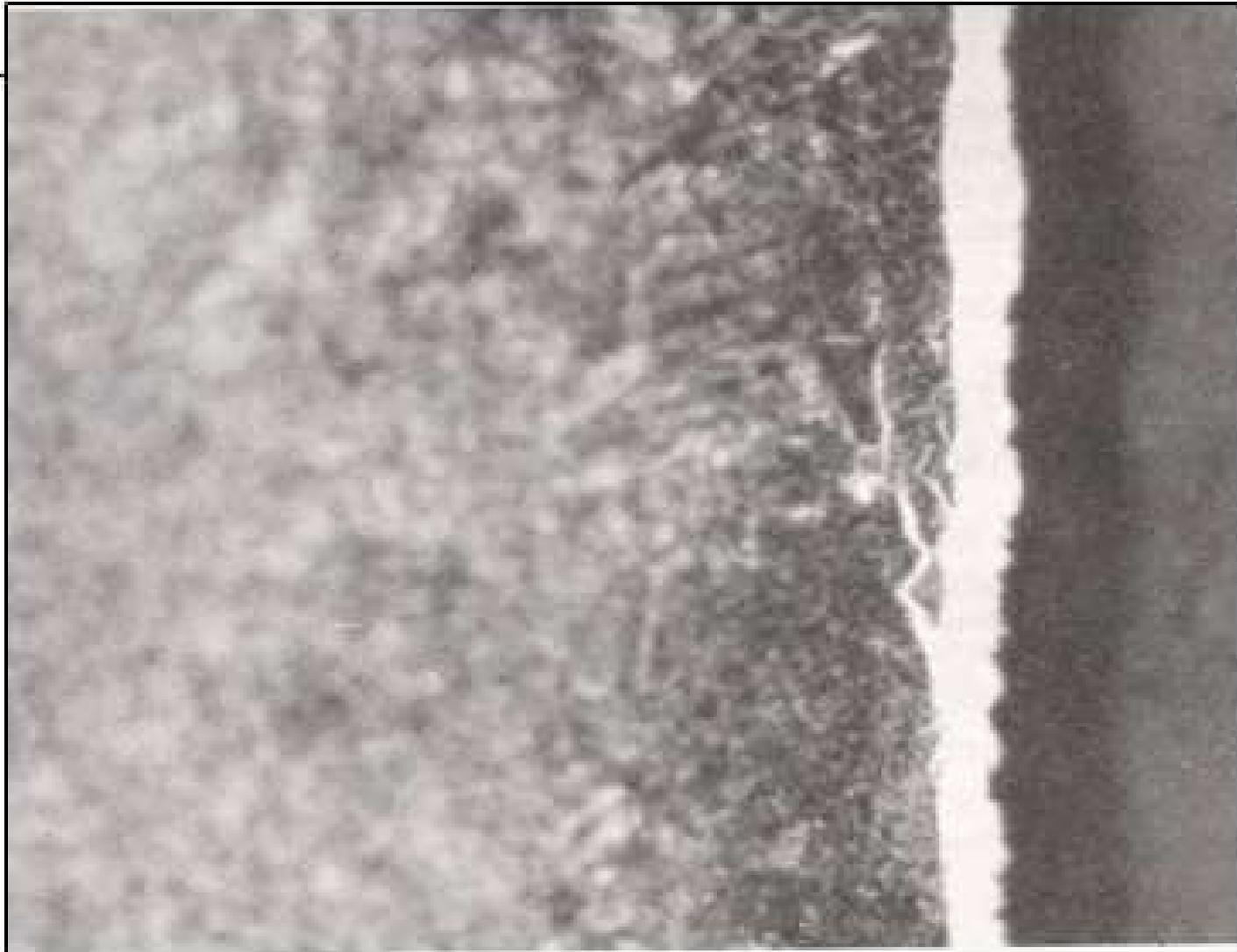
## Microestrutura Nitretada Básica – AISI H13 (Sal)



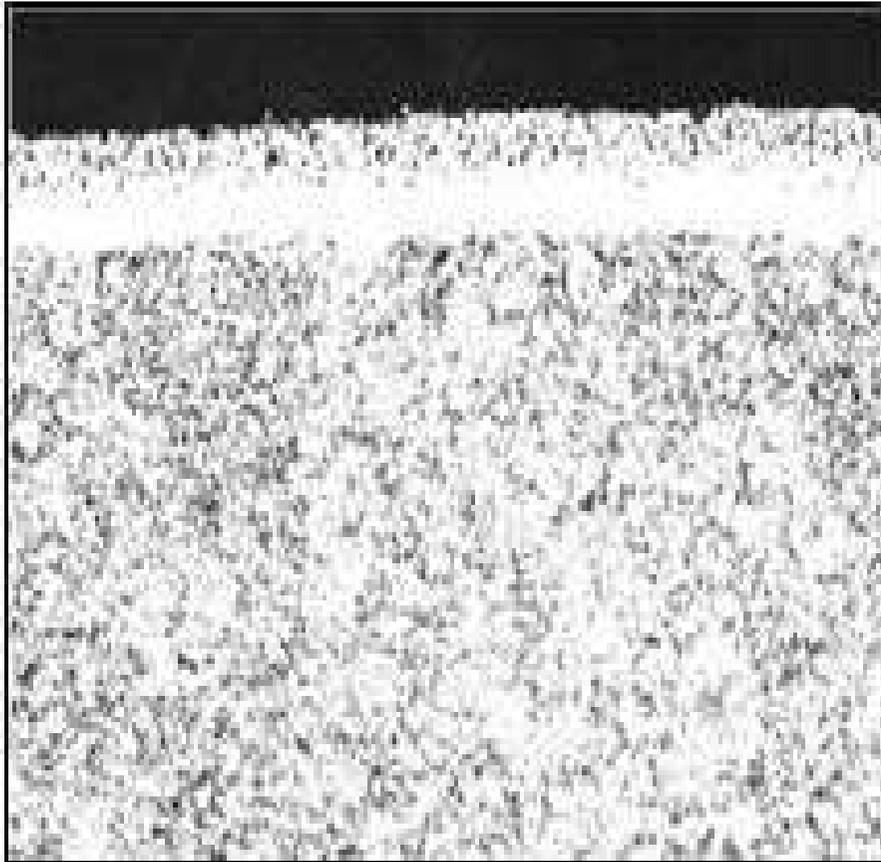
# Endurecimento Superficial do Aço Ferramenta AISI H13 Nitretação por Plasma



CAMADA NITRETADA 100X  
MATERIAL SAE 41Cr4

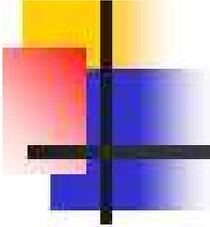


**CAMADA NITRETADA**



**CAMADA CEMENTADA**





# Nitretação

---

Temperatura de Nitretação: 500 – 570°C

- limite superior – pré-requisito para que não ocorra transformação de fase
- limite inferior – requerimento para que ocorra dissociação da amônia

## Reação de Nitretação:

Amônia em contato com a superfície aquecida do aço se dissocia:



O nitrogênio na forma atômica pode ser absorvido pelo aço.

A superfície ao atingir um determinado nível de saturação de nitrogênio, nitretos são formados através do mecanismo de nucleação e crescimento.

# Diagrama de Equilíbrio Fe-N

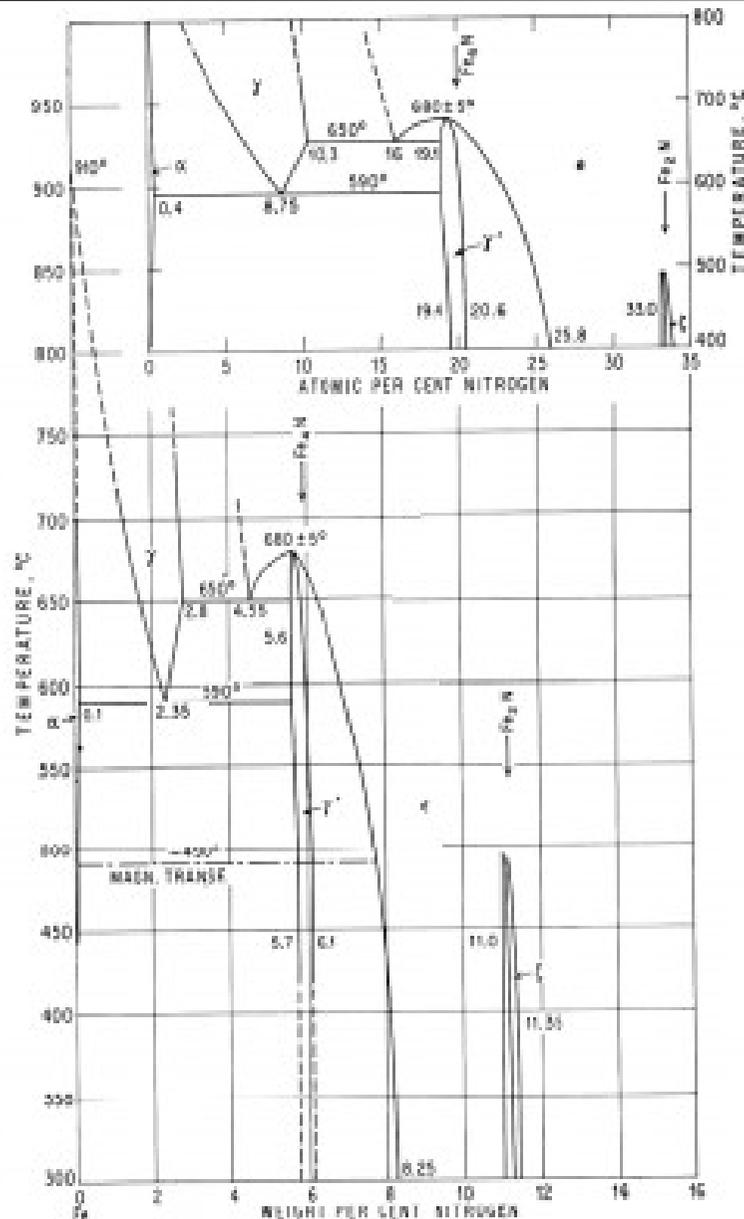


Fig. 376. Fe-N.

## Solubilidade do N no Fe - $\alpha$

- 0,004 wt % a 200 °C
- 0,10 wt % a 590°C – solub. máxima

## Solubilidade do N no Fe - $\gamma$

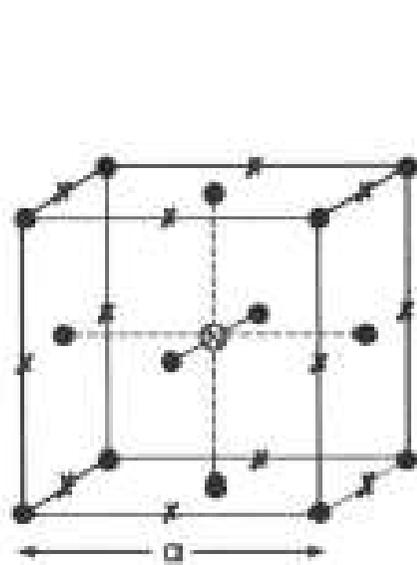
- austenita estável acima de 590 °C
- 2,8 wt% a 650°C – solub. máxima

## Estabilidade dos nitretos

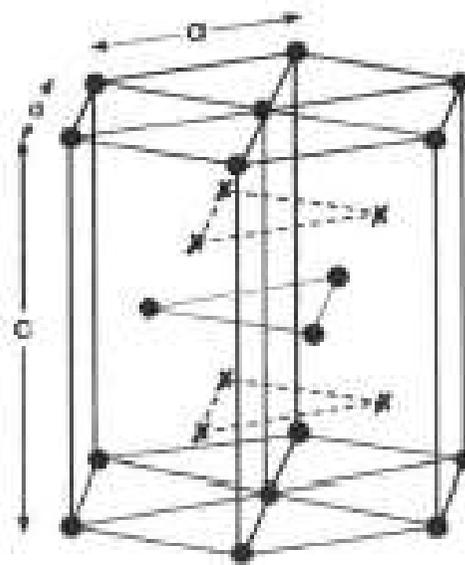
- $\gamma'$  -  $\text{Fe}_4\text{N}$  (CFC) - 5,7 a 6,1 wt %
- $\epsilon$  -  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$  (HC) – acima de 6,0 %
- $\xi$  -  $\text{Fe}_2\text{N}$  (ortorrômbica) – 11,0 % a 11,35 % e abaixo de 500°C.

# Células Unitárias

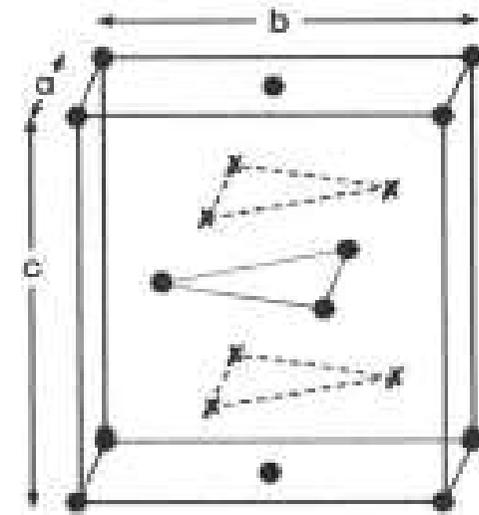
Estrutura cristalográfica das fases  $\gamma'$ ,  $\varepsilon$  e  $\xi$ .



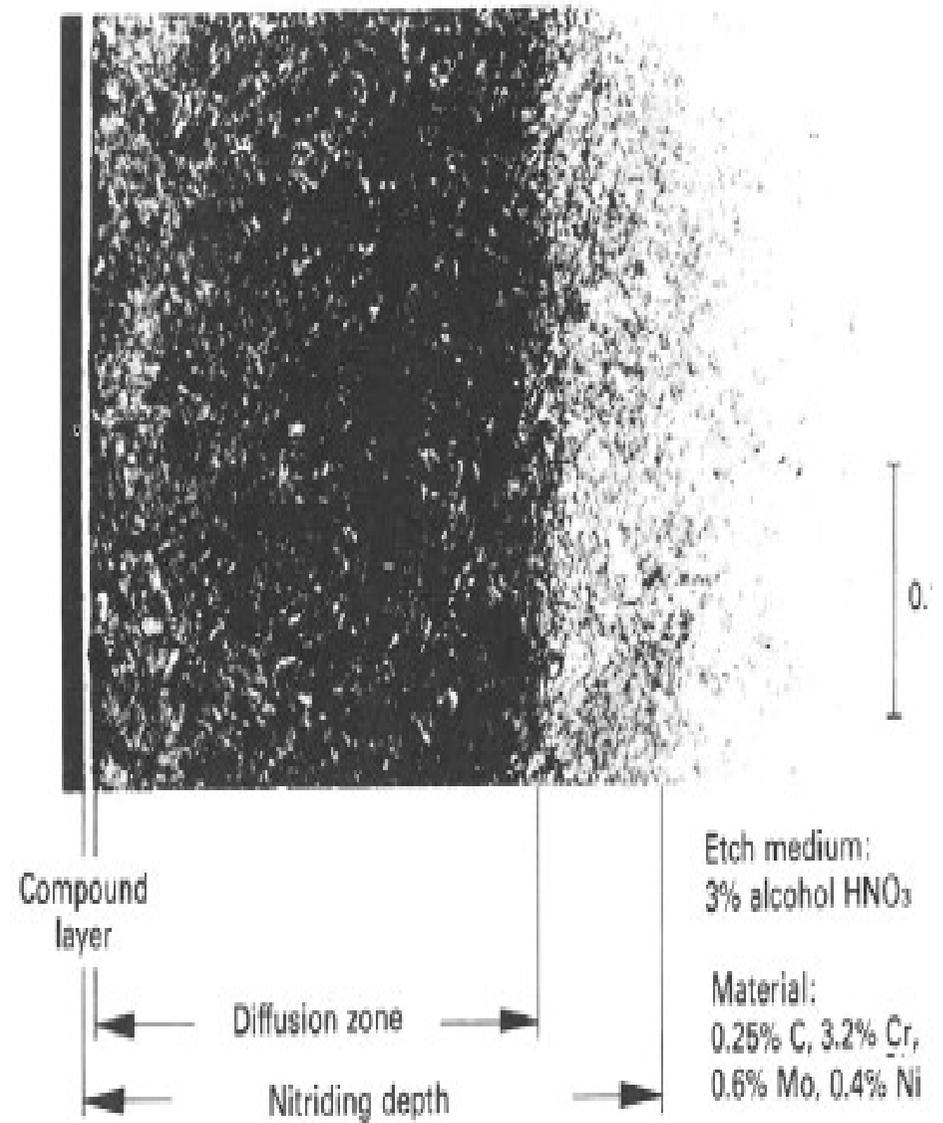
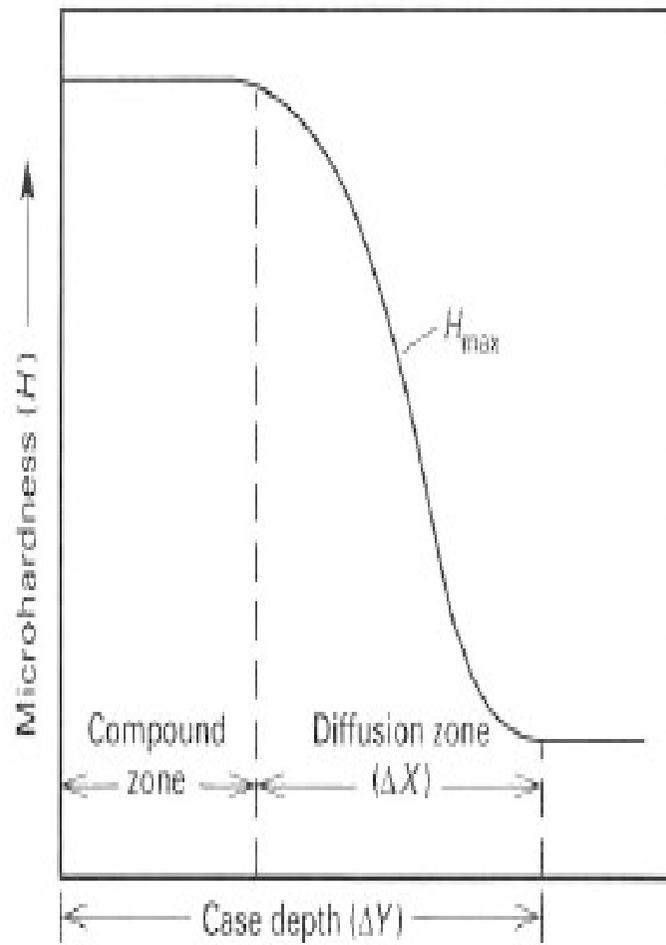
$\gamma'$  - CFC

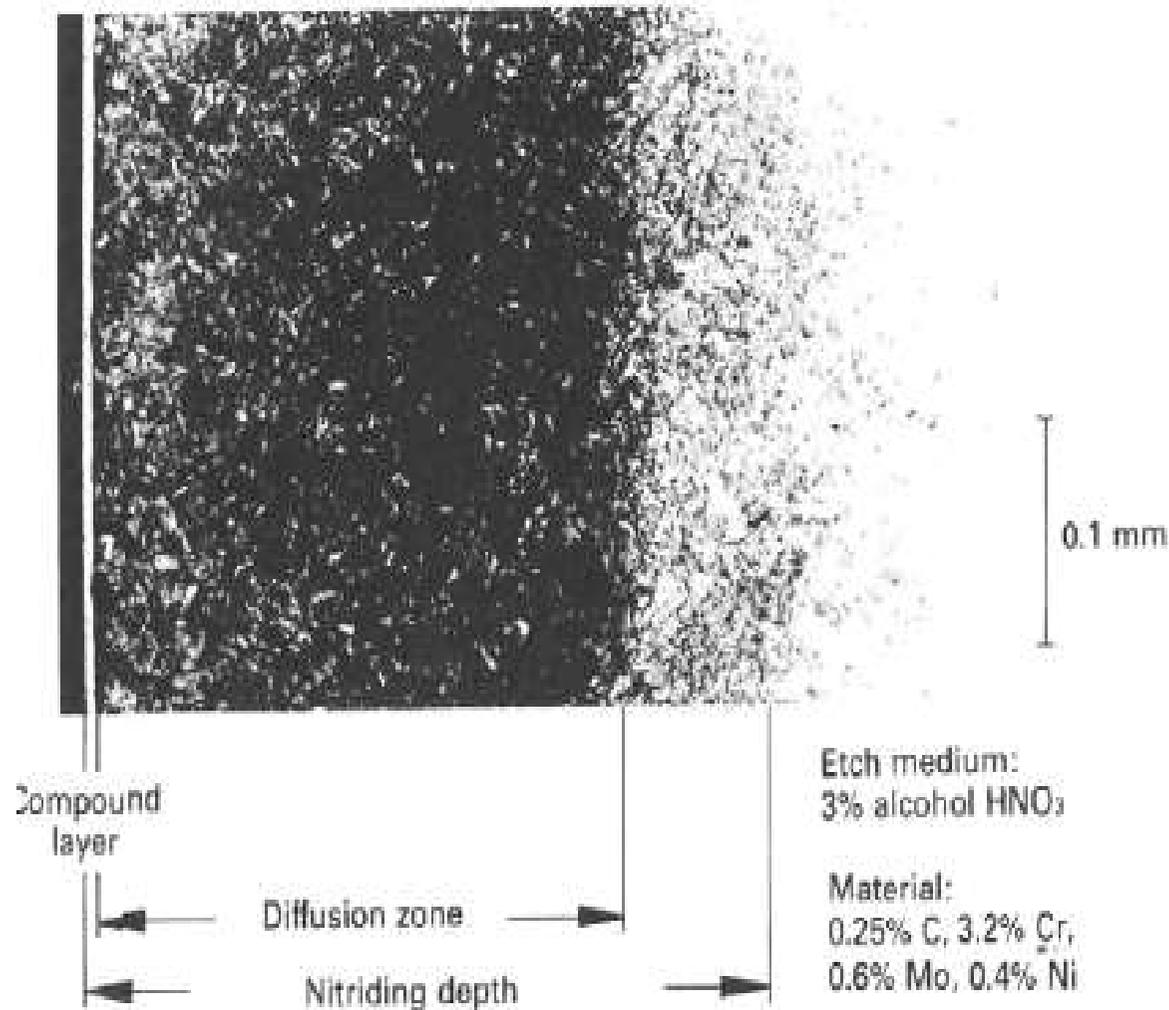


$\varepsilon$  - HC

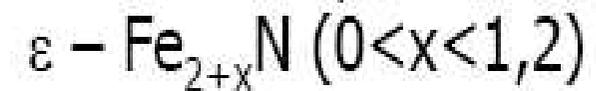
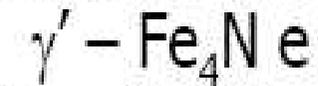


$\xi$  - Ortorrômbica





Camada de compostos  
formada por nitretos:



Zona de difusão:

N na forma intersticial  
ou na forma de nitretos  
de Fe ou de EL.

- Nos processos convencionais é necessário um determinado tempo para a concentração do nitrogênio na superfície ( $C_s$ ) seja elevada o suficiente para que ocorra a precipitação dos nitretos.
- Ao alcançar um determinado valor (concentração crítica -  $C^{cr}$ ), o primeiro nitreto a se formar é o  $\gamma'$  -  $Fe_4N$ .
- Para se formar o nitreto  $\epsilon$  é necessário elevar o potencial de N na mistura ou elevar a temperatura de nitretação.

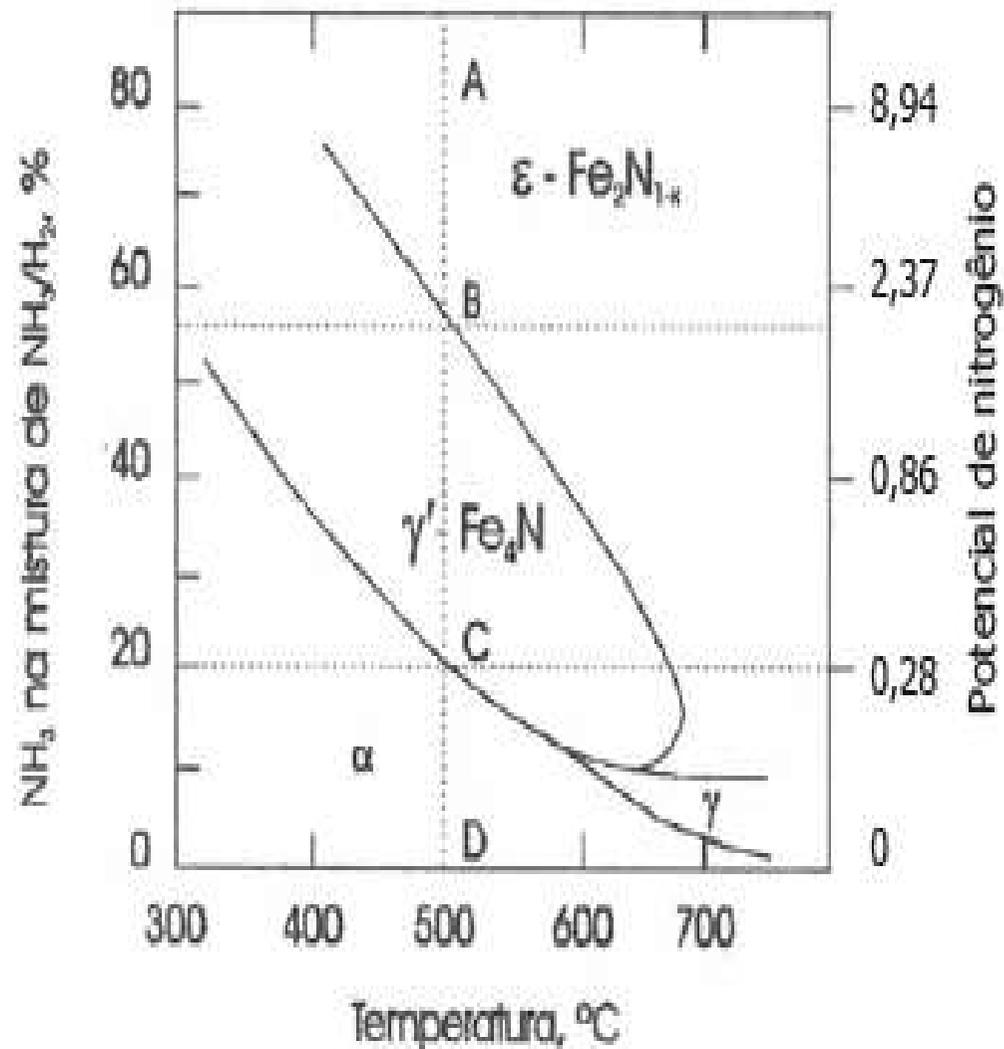


Diagrama de Lehrer – relação entre o potencial de N e as fases formadas na superfície de ferro puro.

# NITRETAÇÃO GÁS

**Consiste em submeter a uma atmosfera de amônia entre 500-550°C.**

- **Reação:  $\text{NH}_3 \Leftrightarrow \text{N} + 3/2 \text{H}_2$ .**
- **Materiais usados na nitretação: Aço ligados Al, Cr, V.**

# NITRETAÇÃO A GÁS

## PROCESSO:

**☐ Têmpera e revenimento, onde o revenimento tem que ser realizado a uma temperatura no mínimo 25°C acima da temperatura de nitretação para que não ocorra o amolecimento da matriz seguir para Nitretação e quando necessário Retífica.**

**☐ Tempo de processamento demorado podendo estender até 90 horas.**

# NITRETAÇÃO GASOSA



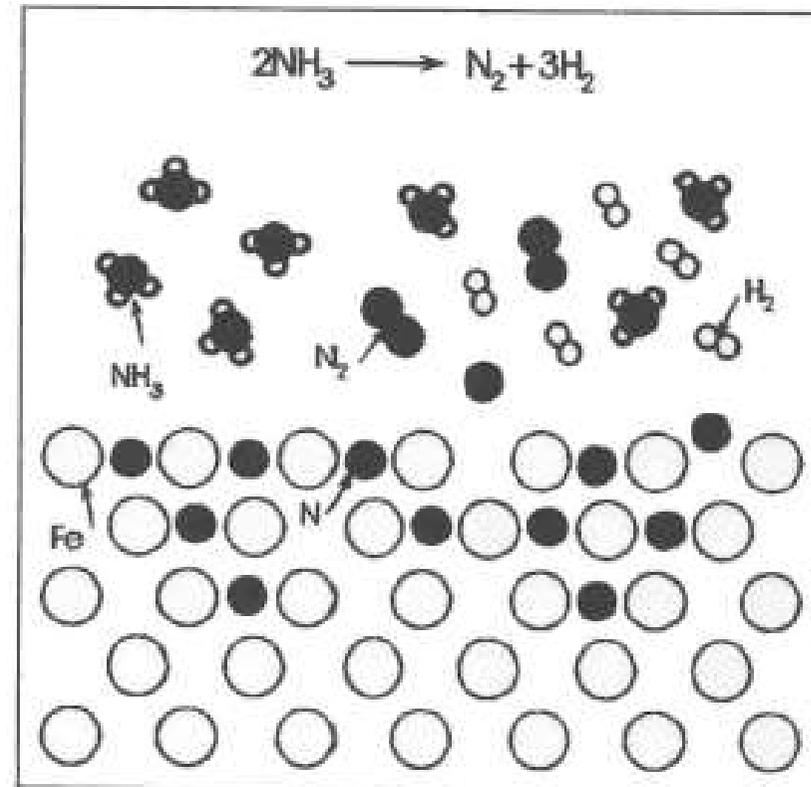
**Camada branca**

**Nitretos**

- Processo: gasoso 90 hs
- Camada espessa.

## Nitreção Gasosa

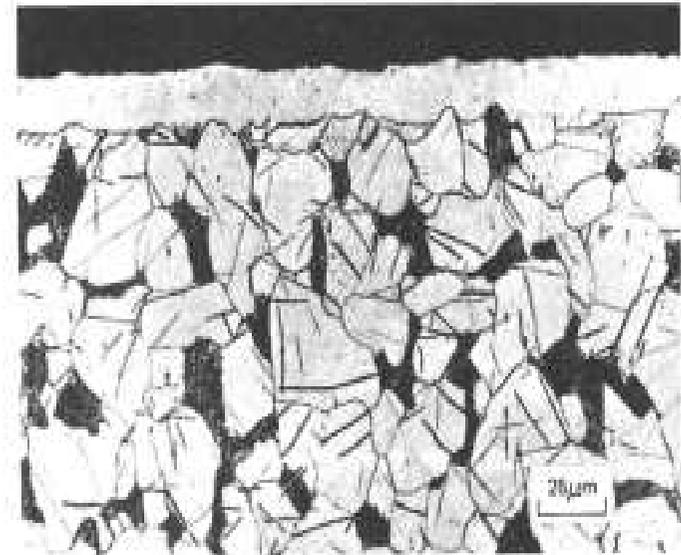
- É o mais clássico dos processos de nitreção.
- Primeira patente – março de 1908 – Adolph Machlet.
- Reação – em contato com o aço a amônia se dissocia liberando nitrogênio atômico, que pode ser absorvido pelo aço e dissolvido intersticialmente no Fe.
- Quando a superfície atinge um determinado nível de saturação, nitretos são formados através do mecanismo de nucleação e crescimento, requerendo um determinado tempo de incubação.



Dissociação da amônia em nitrogênio e absorção pelo aço [Thelning]

# Nitreção Gasosa

- Normalmente tempos mais longos de tratamento – 12 a 90 h.
- Camadas entre 0,2 a 0,7 mm.
- Para tempos longos – camadas de até 800  $\mu\text{m}$ .
- Aços mais usados são aqueles contendo Al (entre 0,85 e 1,50%).
- Aços contendo Cr também são usados - 4140.
- Aços carbono não são usados pois a camada composta é muito quebradiça e se desloca.
- Dos processos de nitreção é o que apresenta maior crescimento do material.



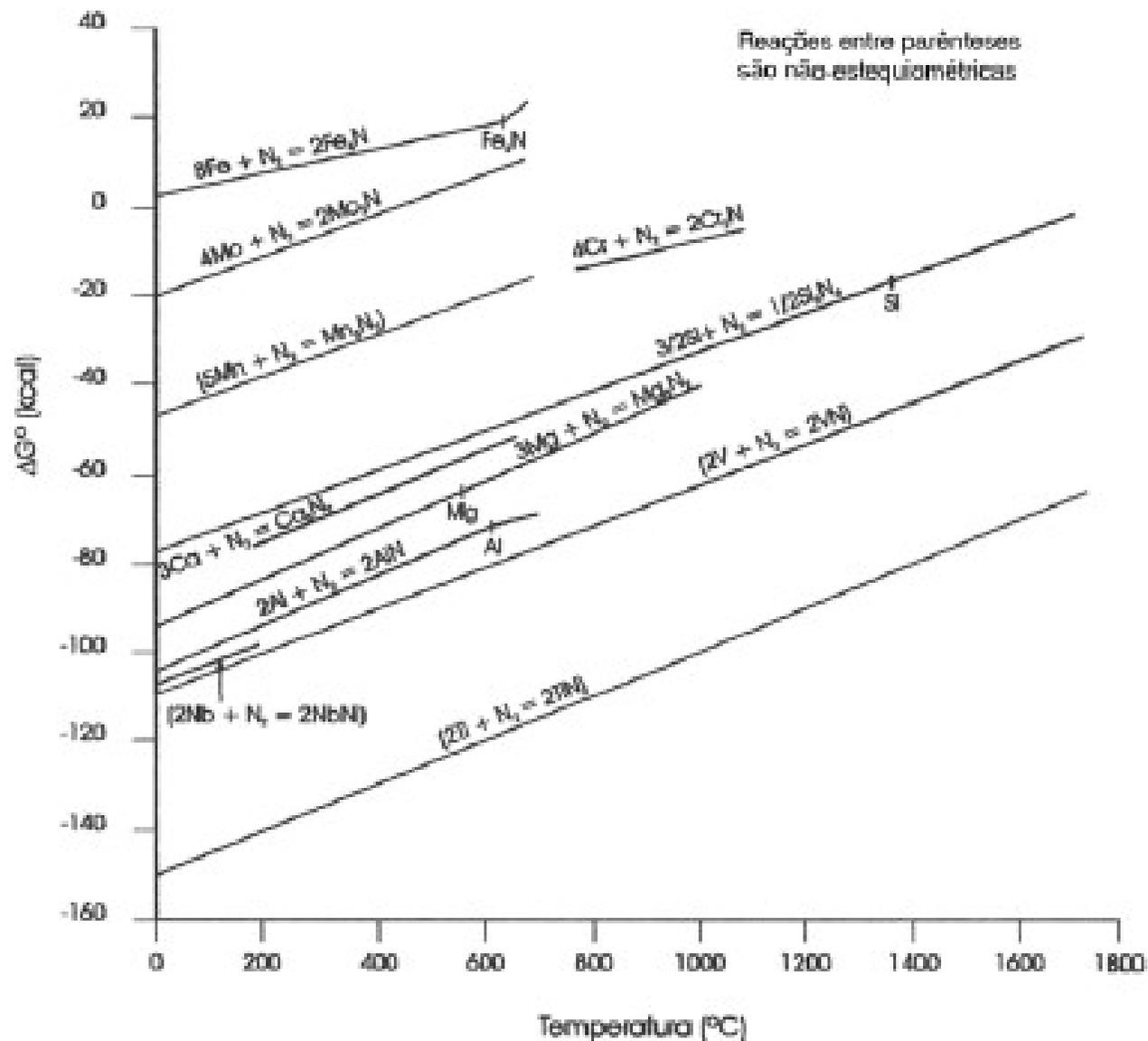
Microestrutura do aço AISI 1015  
Nitreção gasosa

## Nitreção Líquida

- O aço é colocado em meio líquido de cianeto fundido em temperaturas entre 550 a 570 °C.
- Meio similar ao usado na cementação líquida, variando apenas as proporções das misturas dos sais de sódio e potássio. Nesta temperatura tem-se menor dissociação do C.
- É a técnica mais usada para aços carbono.
- Camada composta formada pela fase  $\epsilon$  e mais espessa que na nitreção gasosa. Presença de poros.
- Maior rendimento que na nitreção gasosa. Tempos mais curtos. Segundo ASM 1-4 h. Thelning em torno de 24 h.
- Não aplicada na MP – corrossão e exsudação.
- Sais muito poluentes e tóxicos.



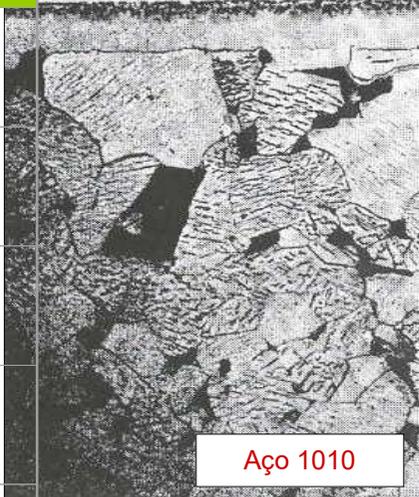
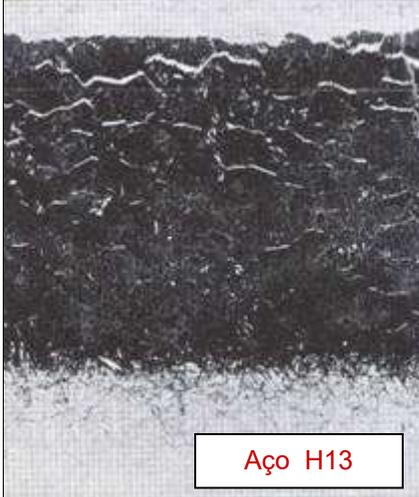
Microestrutura do aço carbono  
Nitreção líquida



## Energia livre de formação dos nitretos

Estabilidade:  $\text{Ti} > \text{Nb} > \text{Al} > \text{Si} > \text{Mn} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Fe}$

Dureza superficial está relacionada com os elementos de liga do aço, isto é, quanto mais ligado o aço maior será a sua dureza superficial

TIPO DE AÇO	DUREZA (HV02)	
AISI 1010	> 350	 <p>Aço 1010</p>
AISI 1060	> 450	
20MnCr5	> 600	
AISI 4140	> 650	
Série AISI – D	> 800	
Série AISI – H	> 900	 <p>Aço H13</p>

# NITRETAÇÃO LÍQUIDA

## □ Mistura de Sais de Sódio:

**96.5% NaCN**

**2.5% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>**

**0.5% NaCNO (Cianáto de Sódio)**

## □ Mistura de Sais de Potássio:

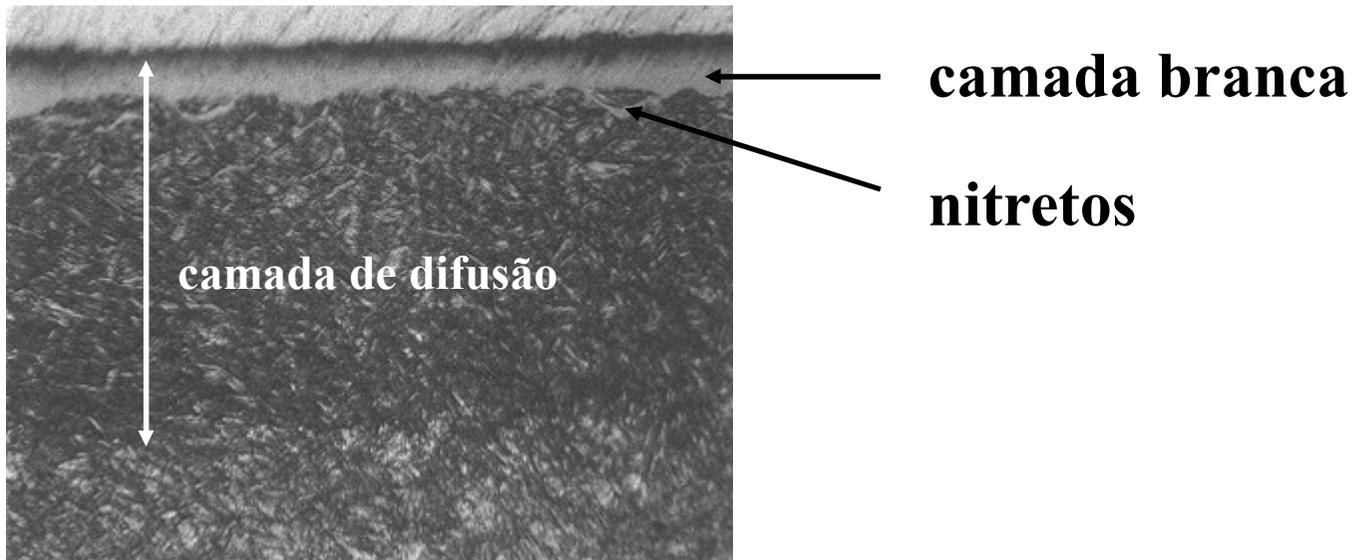
**96.0% KCN**

**0.6% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>**

**0.75% KCNO**

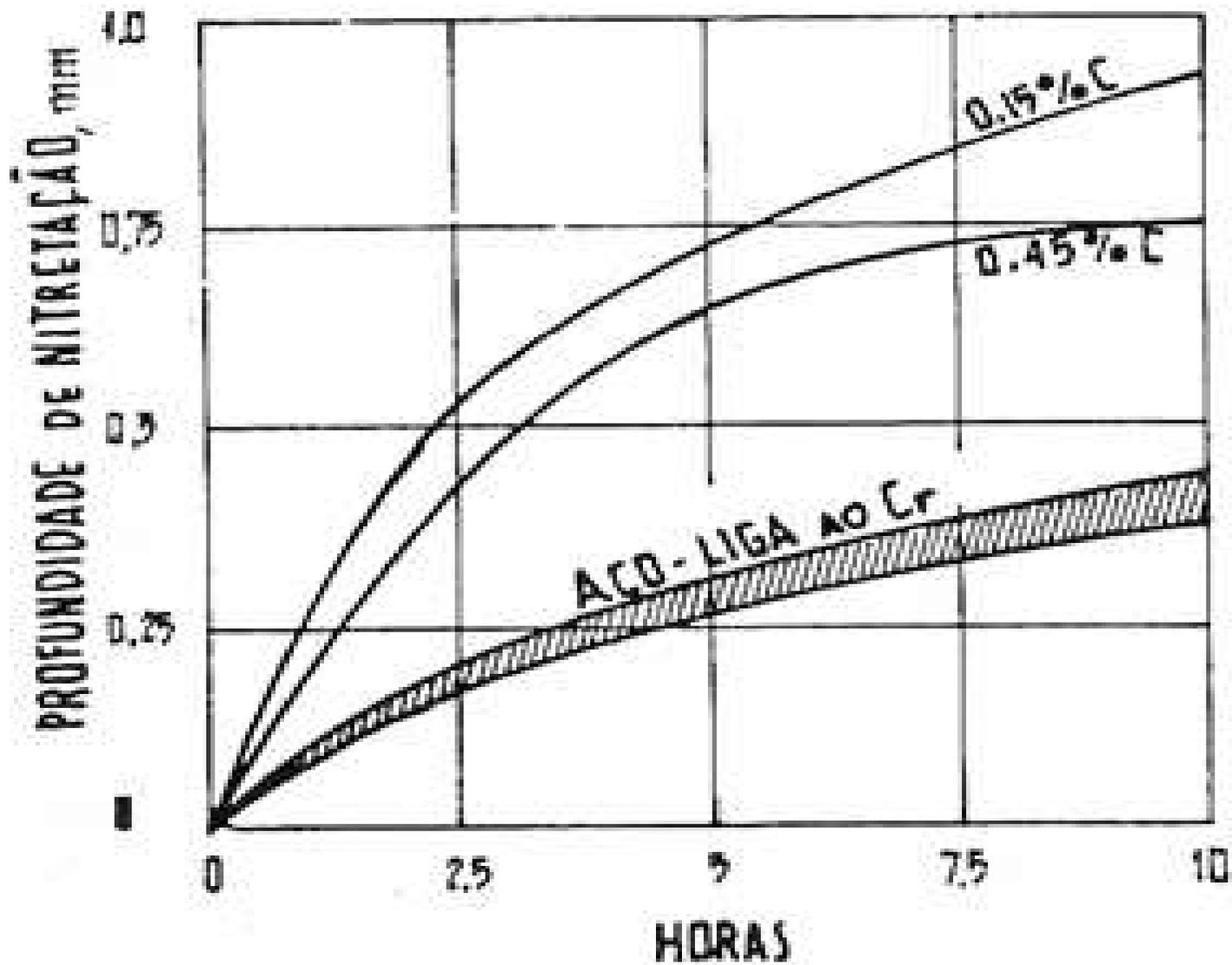
**0.5% KCL**

# NITRETAÇÃO LÍQUIDA

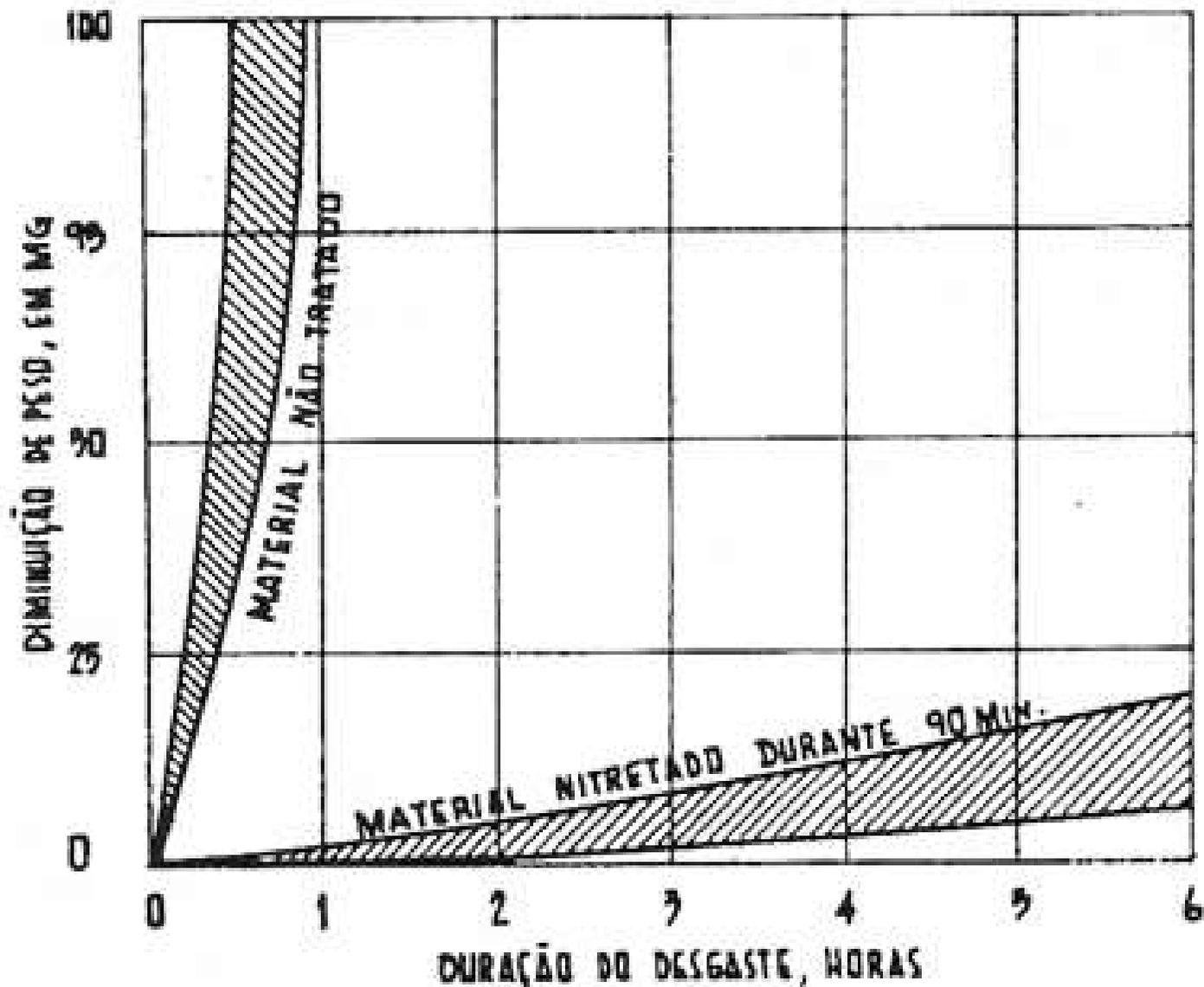


- Processo: banho de sal 2~3 hs.
- Camada fina

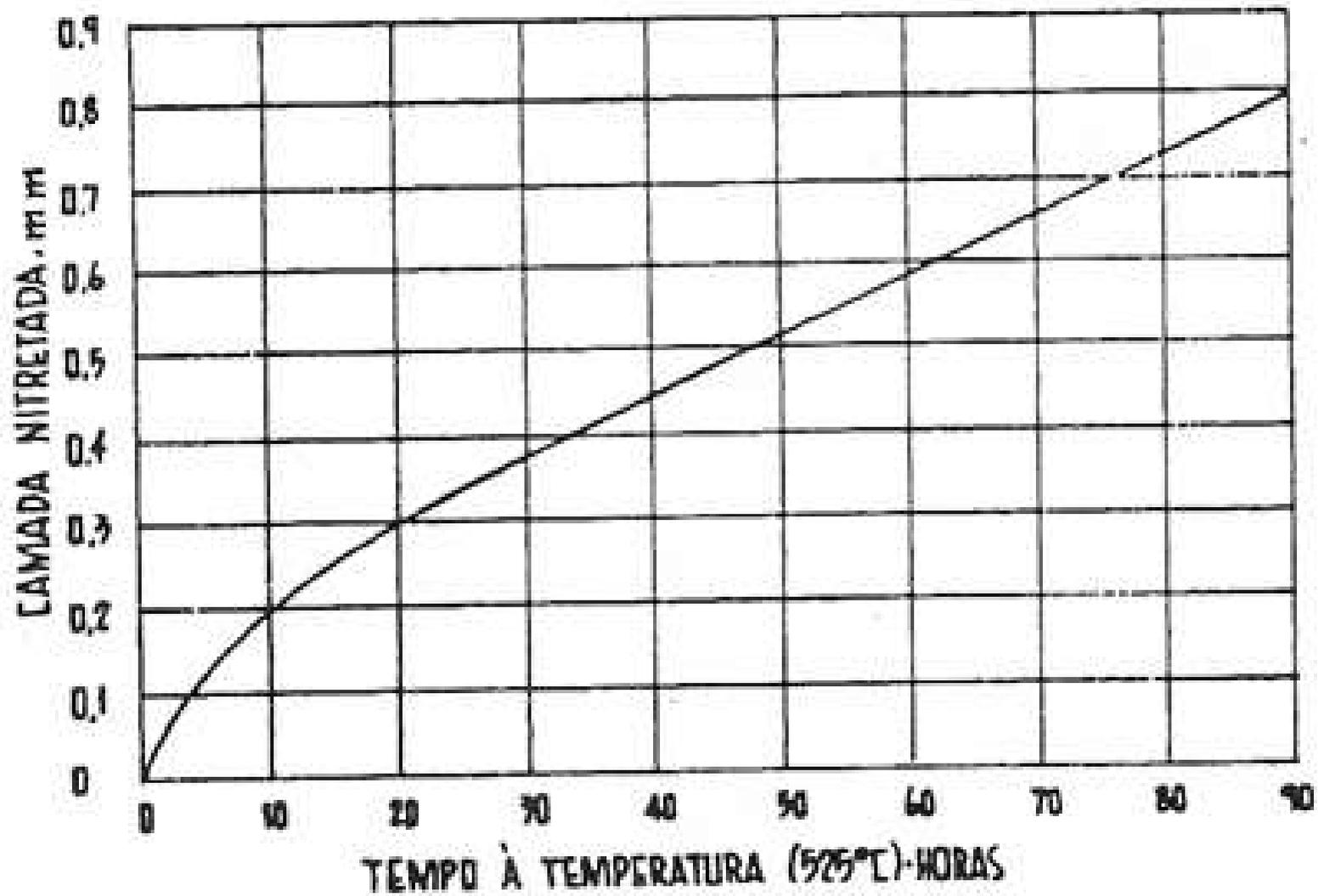
## INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DA CAMADA EM RELAÇÃO A COMPOSIÇÃO QUÍMICA



## COMPARATIVO NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE

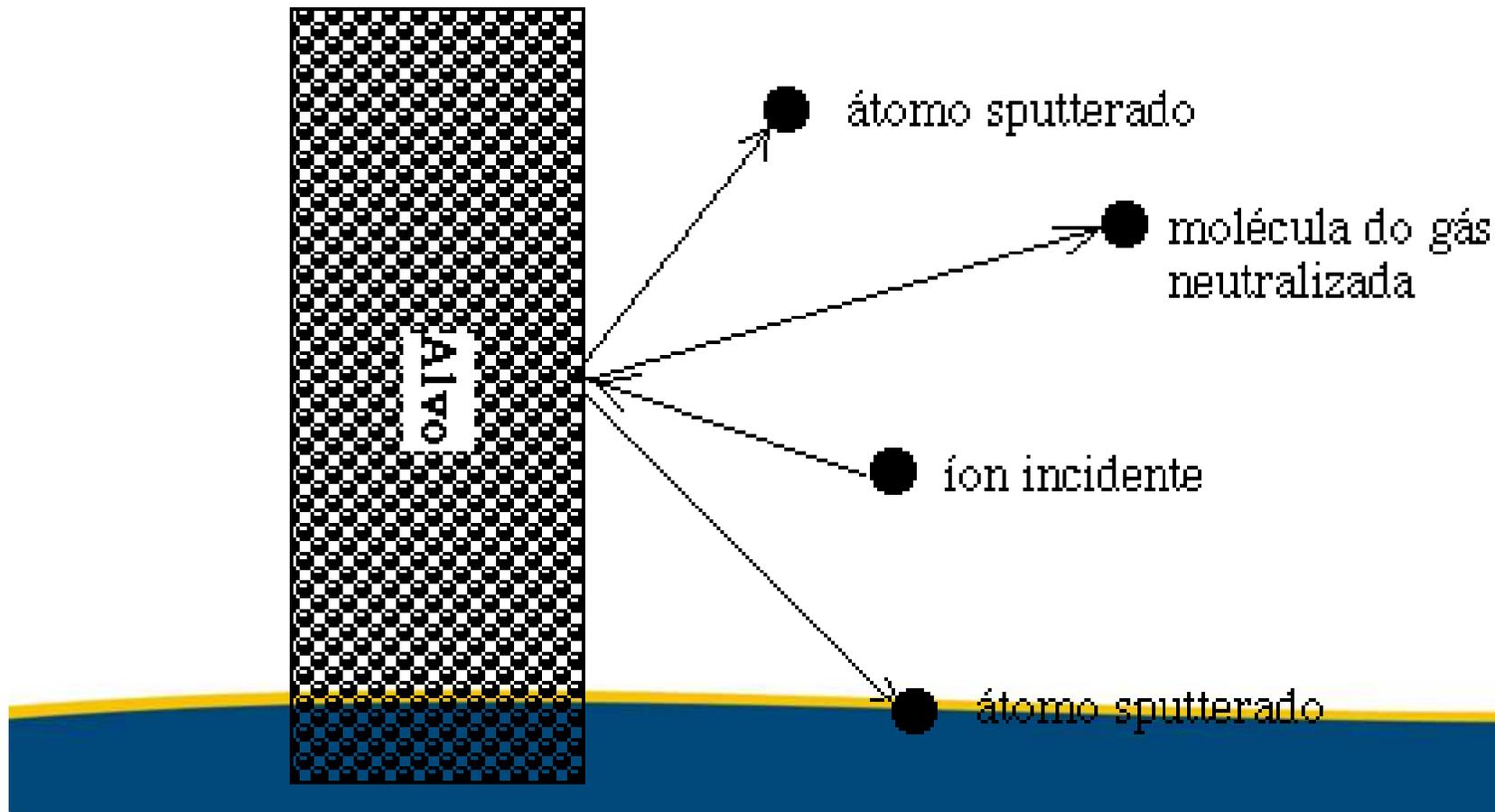


## PROFUNDIDADE DE CAMADA x TEMPO



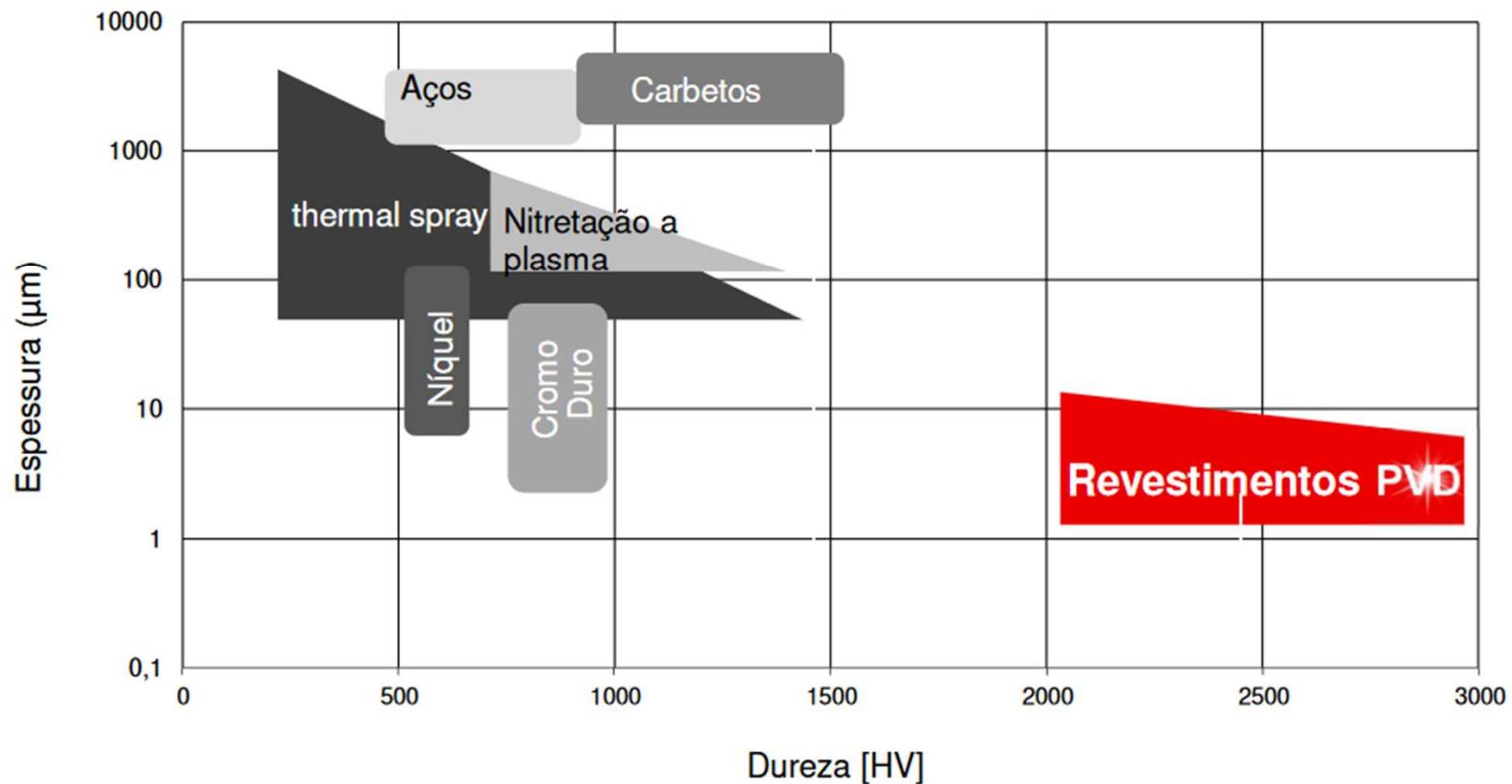
# NITRETAÇÃO À PLASMA

- Nitretação é possível pelo processo SPUTTERING



# Revestimentos PVD – Comparação de Dureza e Espessura de Camada

**oerlikon**



# Propriedades dos revestimentos PVD BALINIT®

Segmento *Cutting Tools*

Segmento *Forming Tools*

BALINIT	A	FUTURA NANO	ALCRONA PRO	PERTURA	ALNOVA	DURANA	HARD CARBON	TRITON	CROMA PLUS	LUMENA	FORMERA	BALITHERM PRIMEFORM
Material do Revestimento	TiN	TiAlN	AlCrN	Base em AlTiN	Base em CrAlN	AlTiN/TiSiXN	Ta-C	a-C:H	CrN + Ox	TiAlN	Base em CrAlN	-
Microdureza (HV 0,05)	2.300	3.300	3.200	3.500	3.800	3.700	5.000	2.500	2.500	3.400	2.800	até 1400
Coefficiente de atrito contra o aço (a seco)	0.4	0.3 – 0.35	0.35	0.25	0.3	0.6	0.1 – 0.2	0.1 – 0.2	0.3 – 0.5	0.3 – 0.35	0.35	-
Tipica Espessura da camada (µm)	1 - 6	1 - 6	1 - 6	1 - 6	1 - 6	1 - 6	0.5 – 1.2	1 - 6	6 - 12	6 - 12	6 - 12	40 - 100
Tensão residual (GPa)	-2.5	- 1.1	- 3.0	- 4.0	- 3.0	- 3.5	-	- 1.0	-1.5/-2.0	- 1.1	-2.0	-
Max. Temperatura (°C)	600	900	1100	1.000	1.100	1.100	300	300	700	900	900+	-
Temperatura de Deposição (°C)	450	200/450	480	<600	<500	<600	150	250-300	250/350/450	450	480	450
Cor	Dourado	Cinza violeta	Cinza brilhante	Cinza Violeta	Cinza Brilhante	Bronze	Preto	Antracite	Arco iris	Cinza violeta	Prata-cinza claro	-
Estrutura	Mono camada	Mono camada	Mono camada	Nano camada	Multi camada	Multi camada	Lamelar	Lamelar	Multi camada	Mono camada	Nano camada	Difusão

- Principais revestimentos produzidos no Brasil

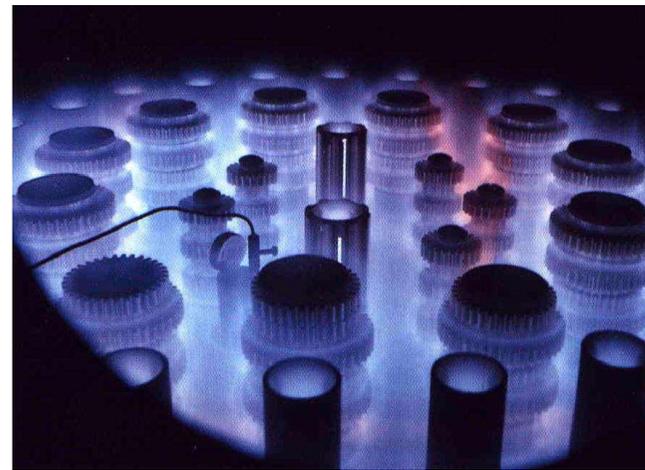
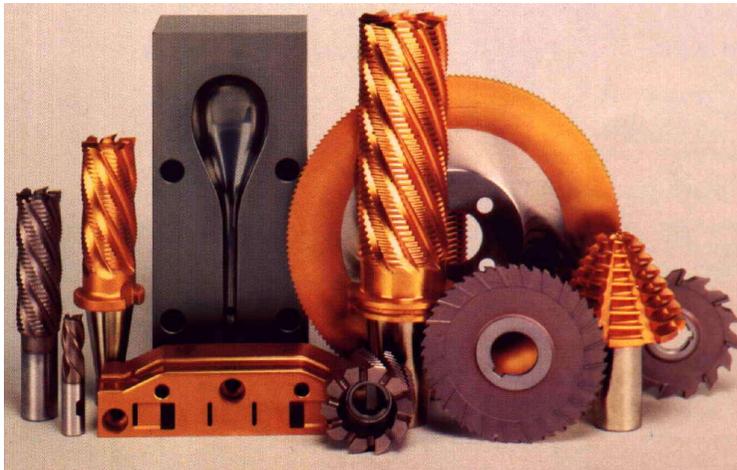
**PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS PVD DUROTIN**


	ARQUITETURA DA CAMADA	DUREZA (HV 0,025)	ESPESSURA DA CAMADA (µm)	COEFICIENTE DE ATRITO (contra aço 52100)	TEMPERATURA DE REVESTIMENTO (°C)	MAXIMA TEMPERATURA DE UTILIZAÇÃO (°C)	COLORAÇÃO
<b>DUROTIN</b>	TiN	2500	1 - 6	0,4	200 / 500	550	Dourado
<b>DUROTIN C Multi</b>	TiCN / TiN multicamada	3000	1 - 5	0,4	500	400	Violeta
<b>DUROTIN Cromo</b>	CrN	2000	1 - 10	0,4	200 / 500	700	Cinza Metálico
<b>DUROTIN Cromo +</b>	CrN+WC:H camada composta	2000 - 1200	1 - 10	0,2	200 / 500	700	Grafite
<b>DUROTIN Performa</b>	AlTiN	3300	1 - 5	0,4	500	800	Preto/Púrpura
<b>DUROTIN Performa +</b>	AlTiN+WC:H camada composta	3300 - 1200	1 - 6	0,2	500	800	Grafite
<b>DUROTIN Exxtral Plus</b>	AlTiCrN multicamada	3300	1 - 5	0,4	500	800	Preto/Púrpura
<b>DUROTIN Nano Variantic</b>	AlTiCN nano estruturada	3500	1 - 5	0,2	500	600	Violeta
<b>DUROTIN Diamante</b>	WC:H	1200	1 - 4	0,2	200 / 500	300	Grafite

## TRATAMENTO SUPERFICIAL ADEQUADO

considerar

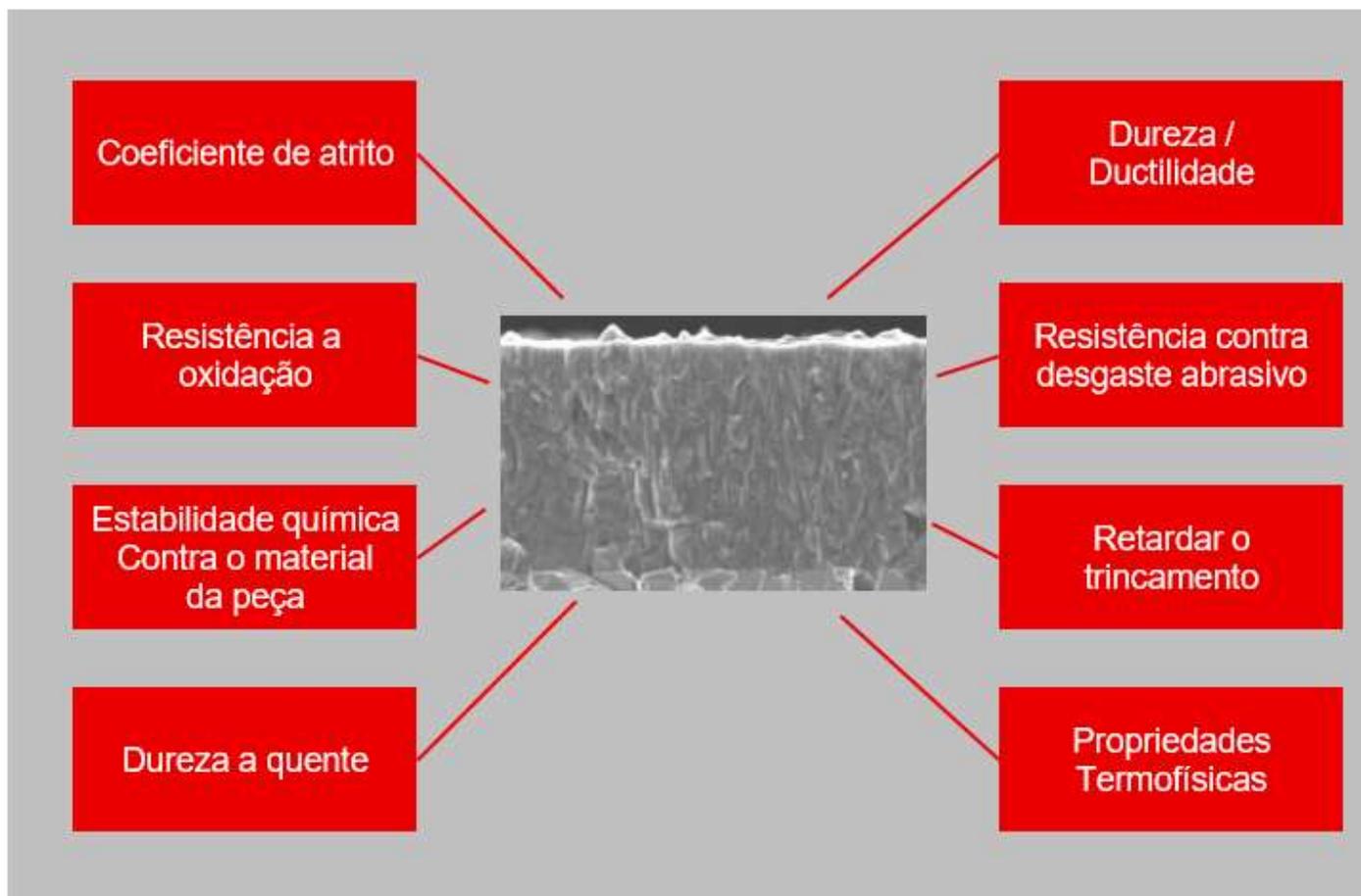
- *Condições de trabalho da ferramenta*
- *Aço utilizado*
- *Tratamento térmico anterior*
- *Eventual trabalho posterior*
- *Condições da superfície*

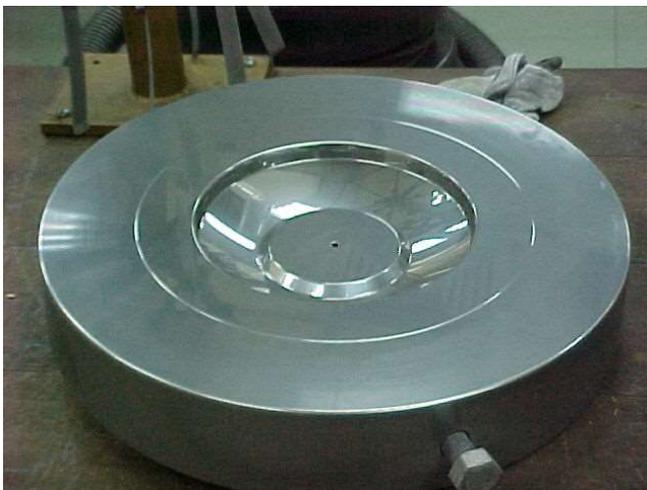


EFEITOS DO TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE - RESISTÊNCIA AO DESGASTE

# Propriedades dos revestimentos PVD

**oerlikon**

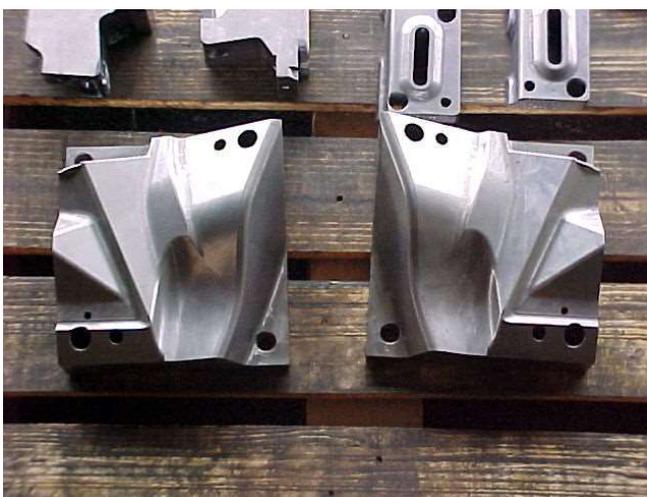




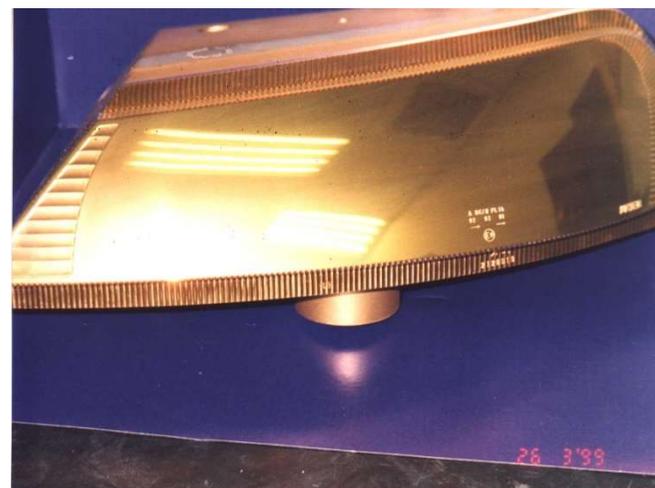
Ferramenta para estamparia de aço  
inoxidável  
Aço: Villares Sinter 23  
Revest.: Processo Duplex



Ferramenta de injeção de plástico  
Aço: Inox 420  
Revest.: Nitreto de titânio



Ferramentas de conformação  
Aço: AISI D2  
Revest.: Nitreto de Cromo



Ferramenta para injeção de lanterna de  
automóvel em policarbonato.  
Aço: AISI 420  
Revest: Nitreto de Titânio

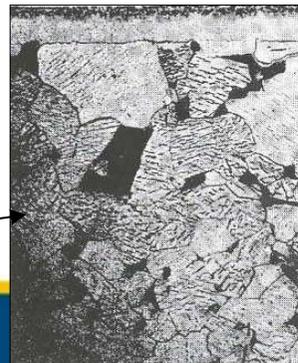
# APLICAÇÕES



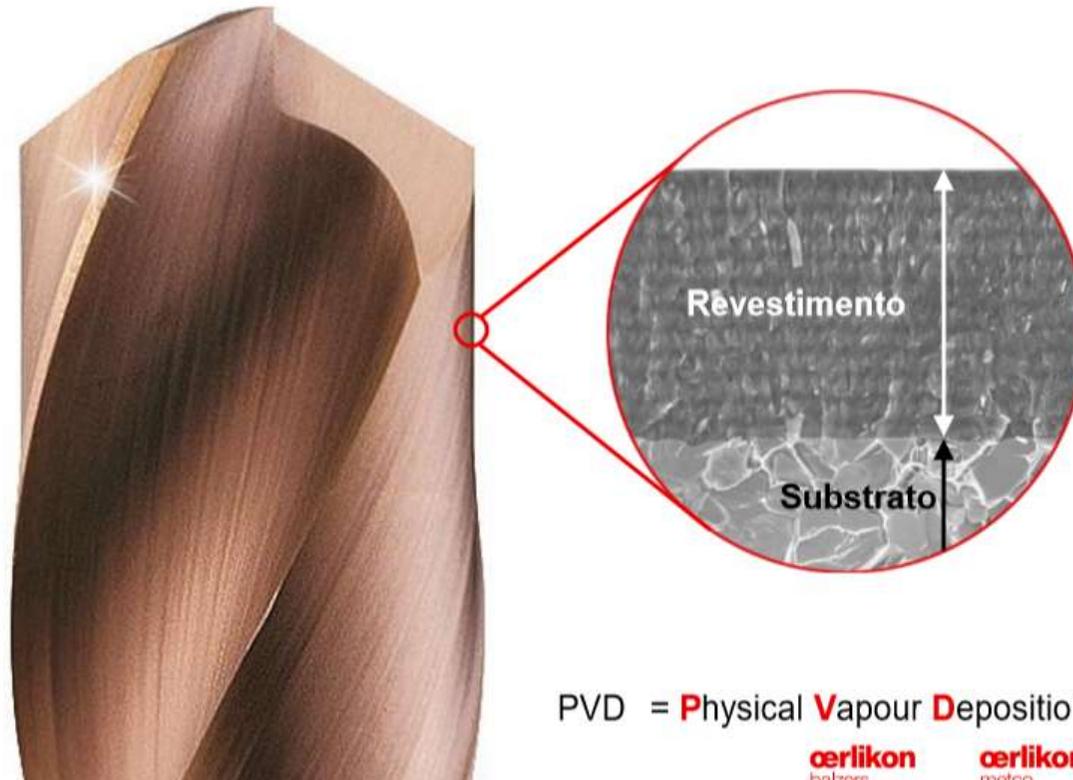
Ferramentas para  
injeção de plástico



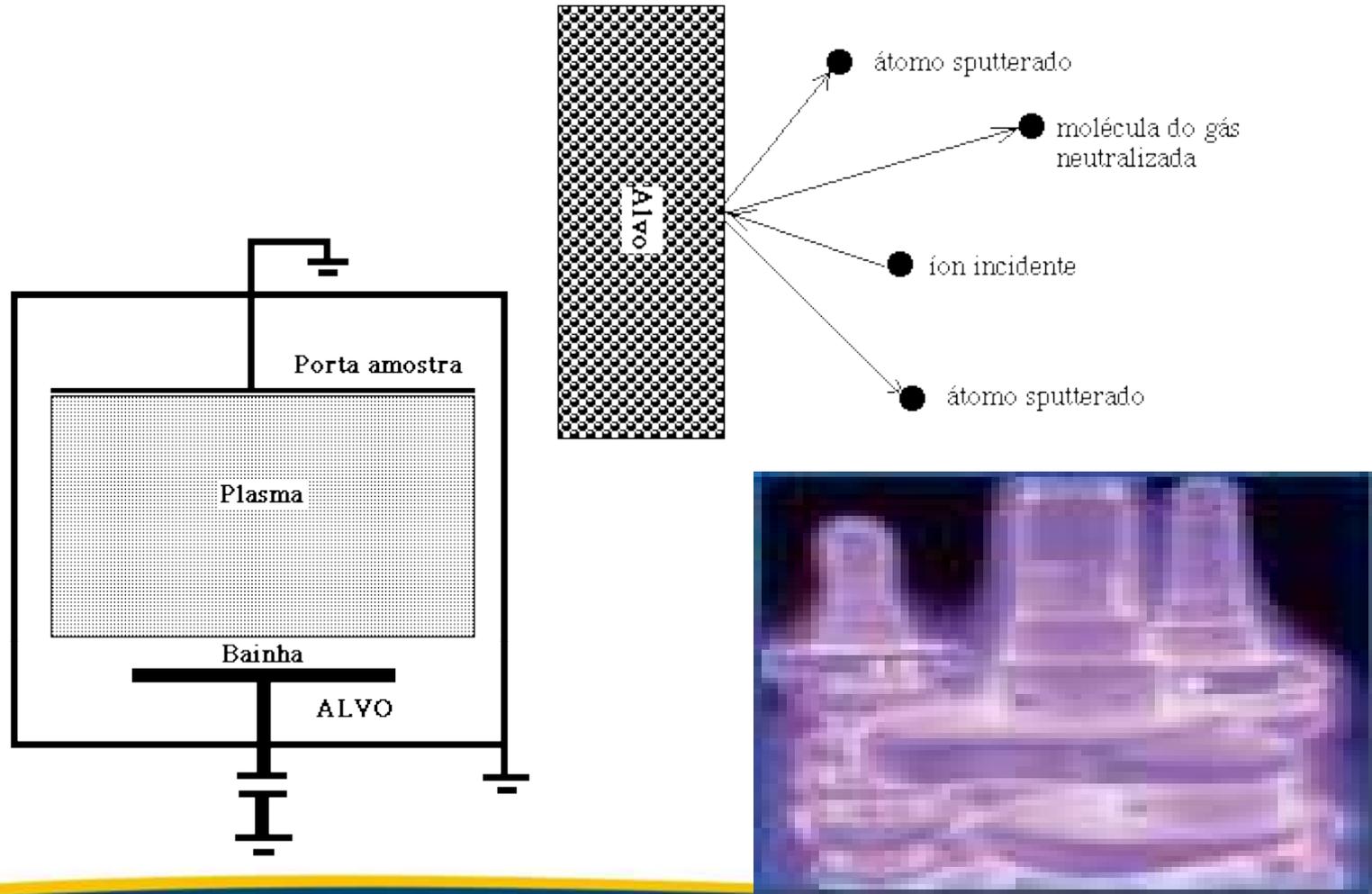
- PLASMA 👍
- GÁS 👍
- LÍQUIDA 👎



Revestimentos PVD - somente alguns milésimos de milímetro, porém mais duro do que o aço **cerlikon**

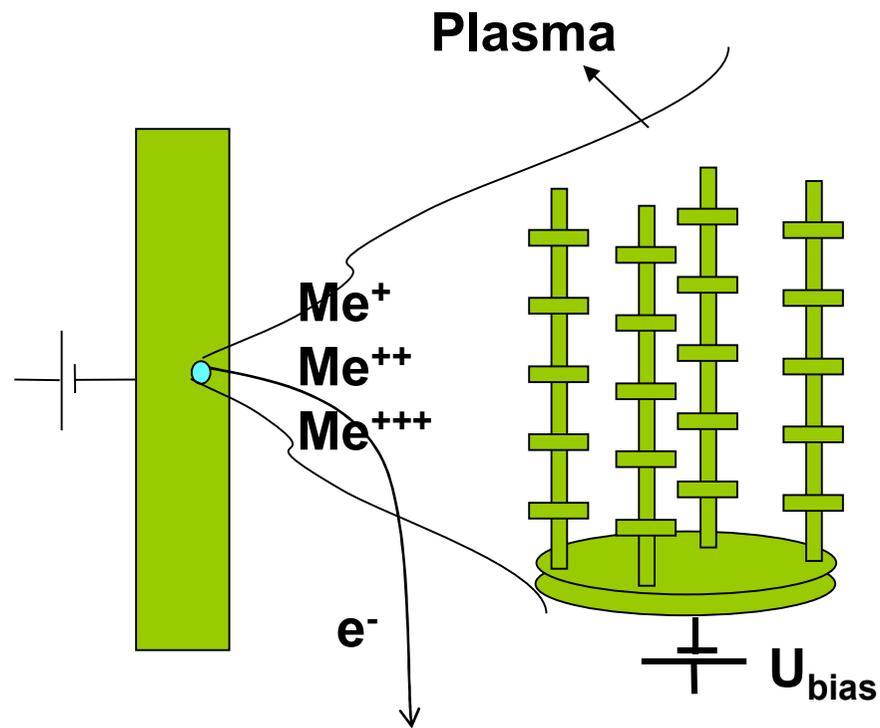


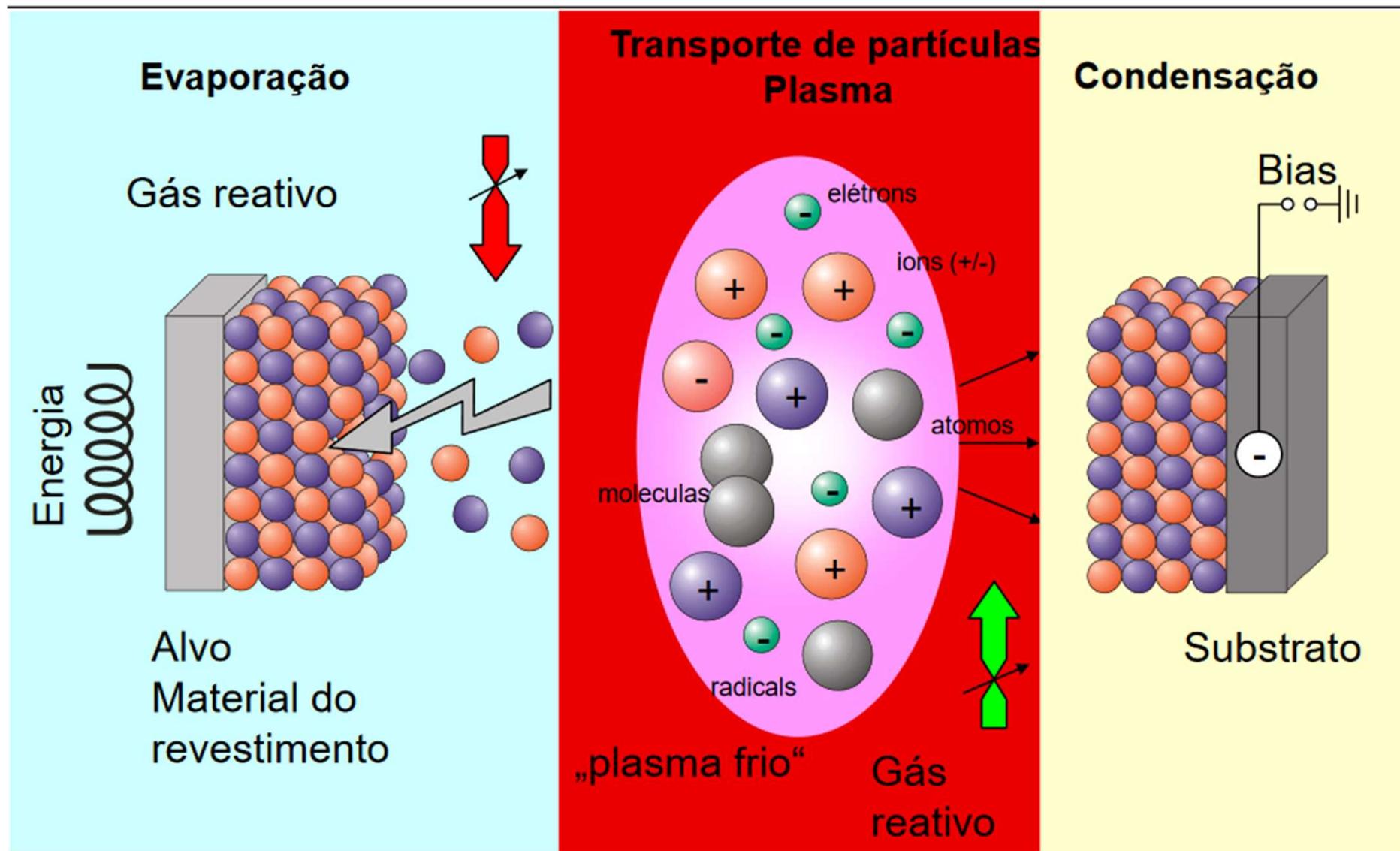
# MECANISMOS DO PROCESSO DE SPUTTERING



## Como o filme de PVD é depositado?

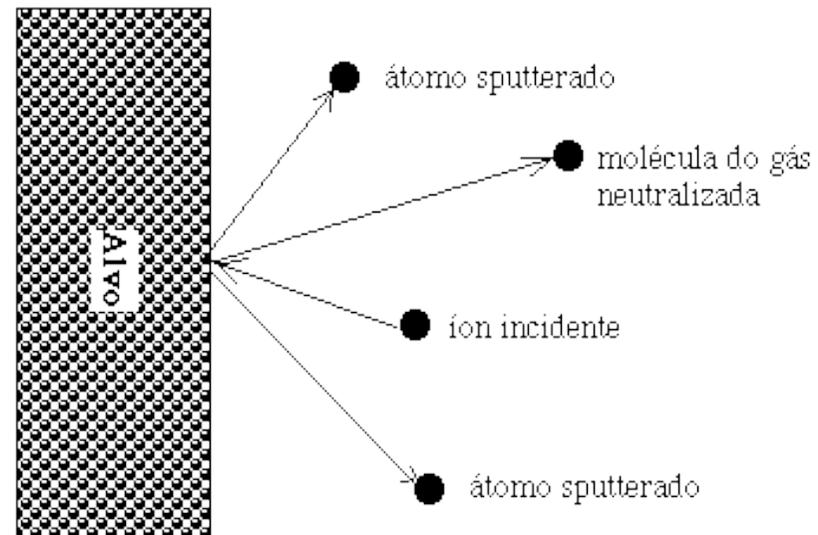
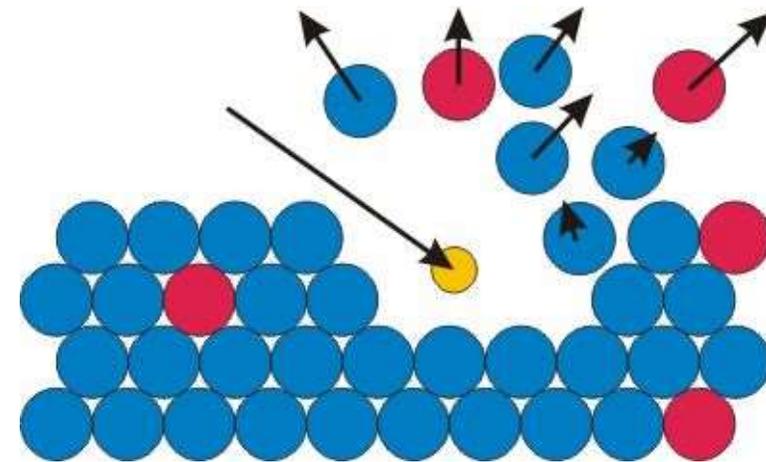
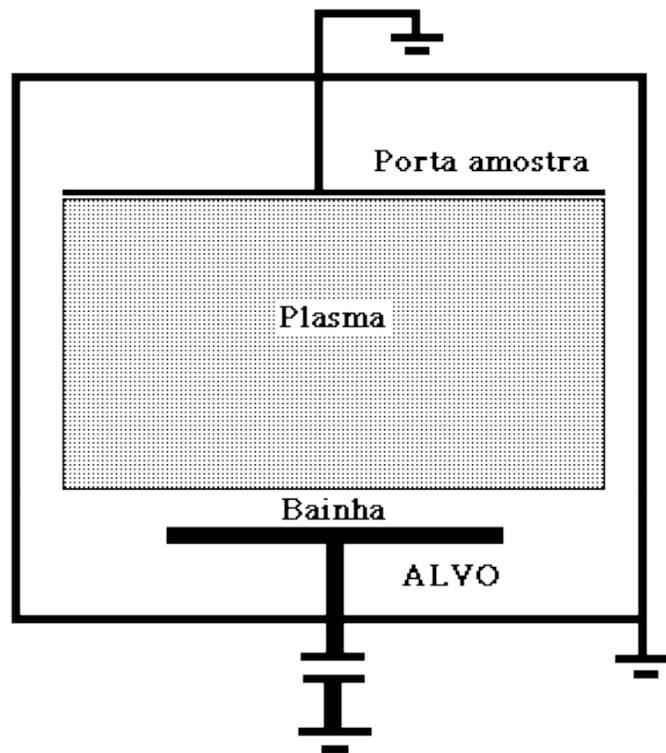
- ARCO  
CATÓDICO





## Como o filme de PVD é depositado?

- SPUTTERING



# Vantagens na utilização dos tratamentos superficiais em Estamparia e Conformação

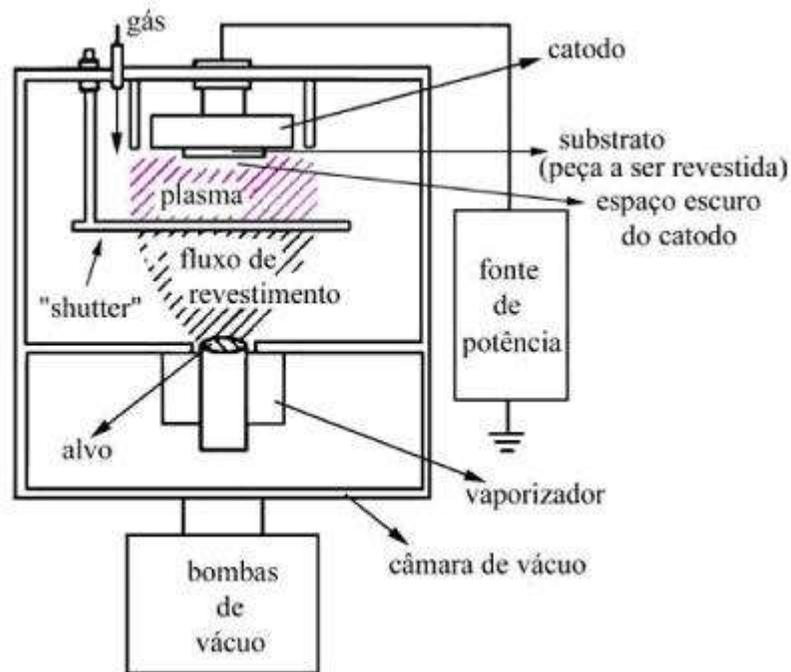
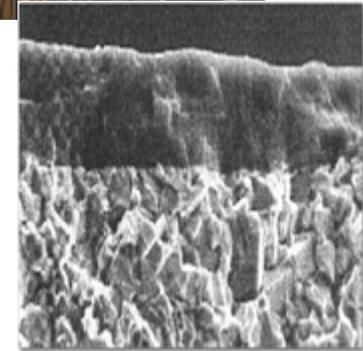
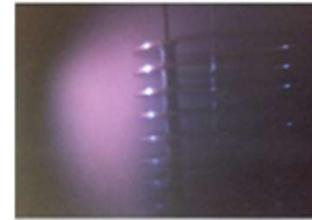


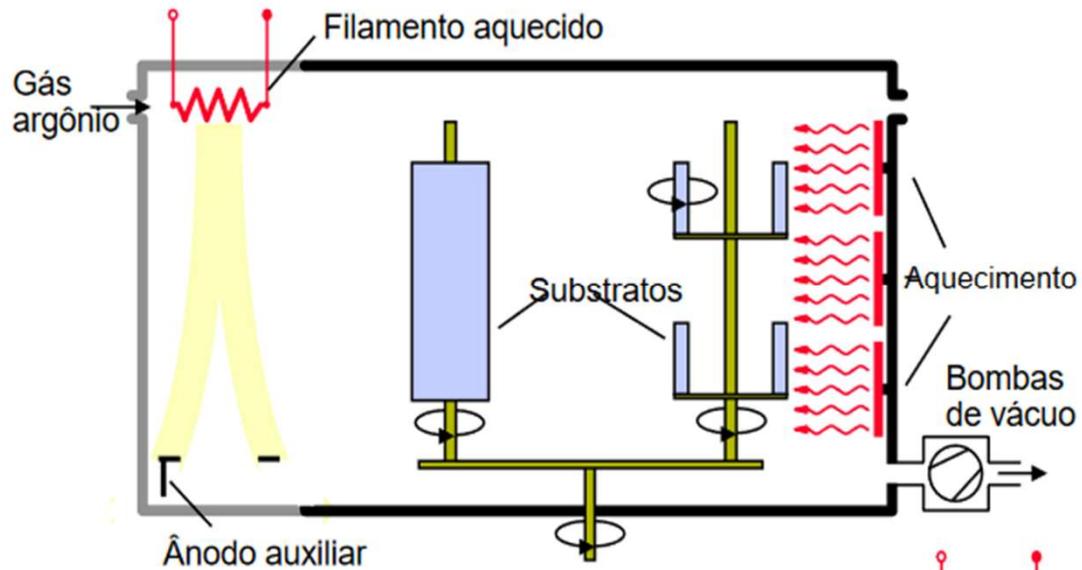
## NITRETAÇÃO À PLASMA

- Camada de natureza cerâmica
- Dureza acima de 2500 HV
- Espessura de 0.002 a 0.010 mm
- Baixo coeficiente de atrito
- Baixa temperatura de processo

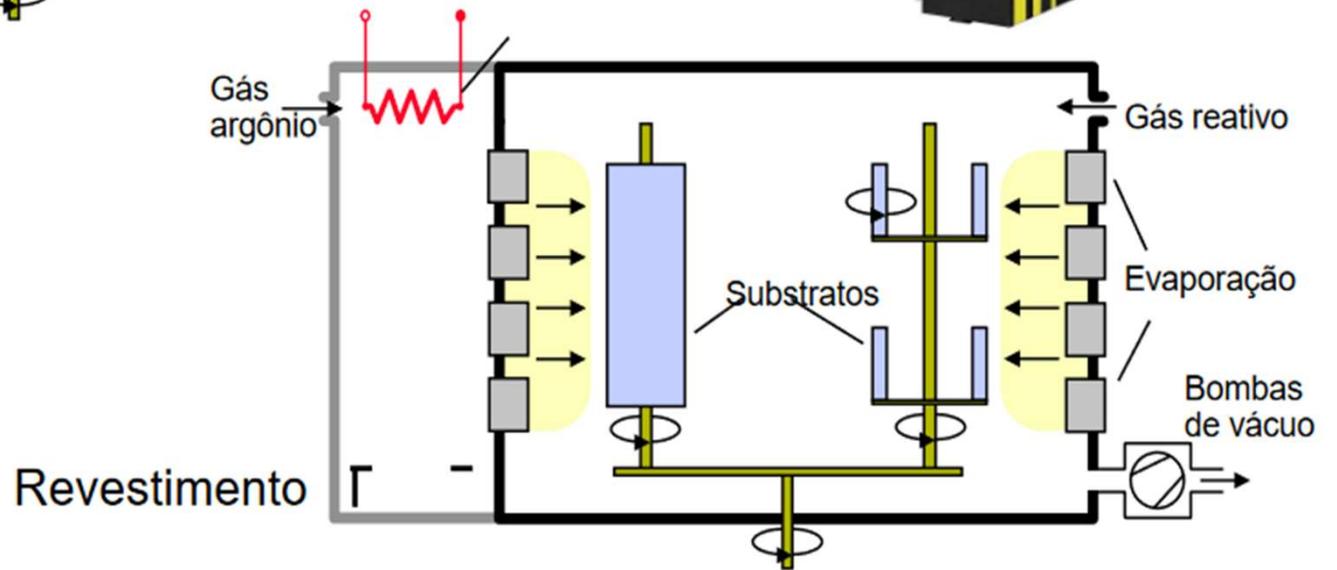


# EQUIPAMENTOS





Aquecimento e Etching

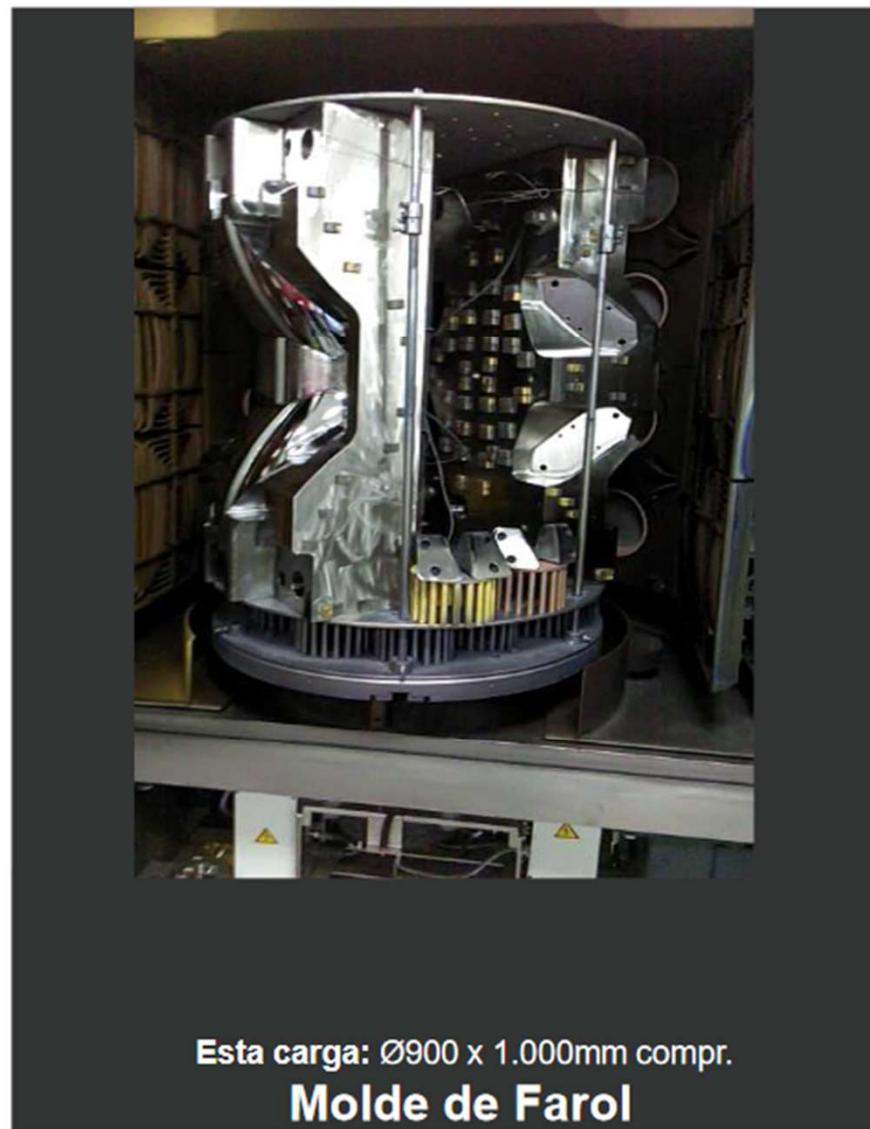


Revestimento

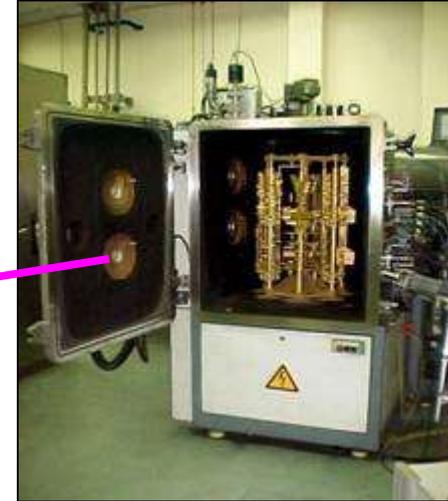
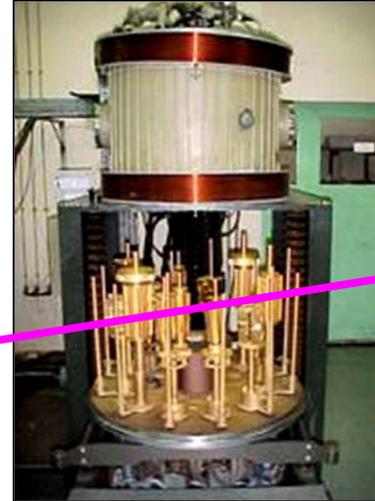
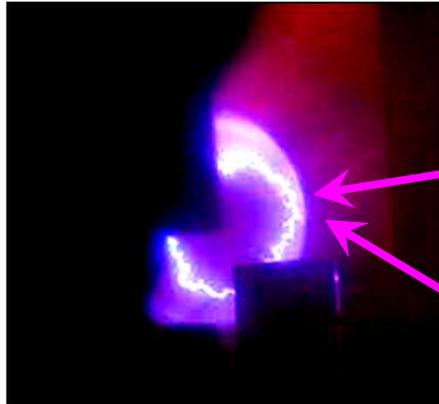


**Capacidade máxima:** Ø900 x 1.500mm compr  
3 Toneladas.

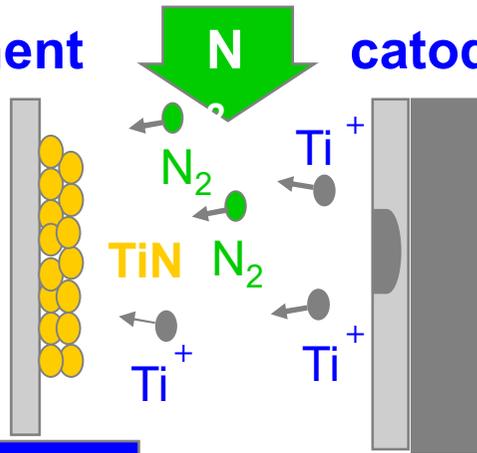
**Forno de revestimento PVD**



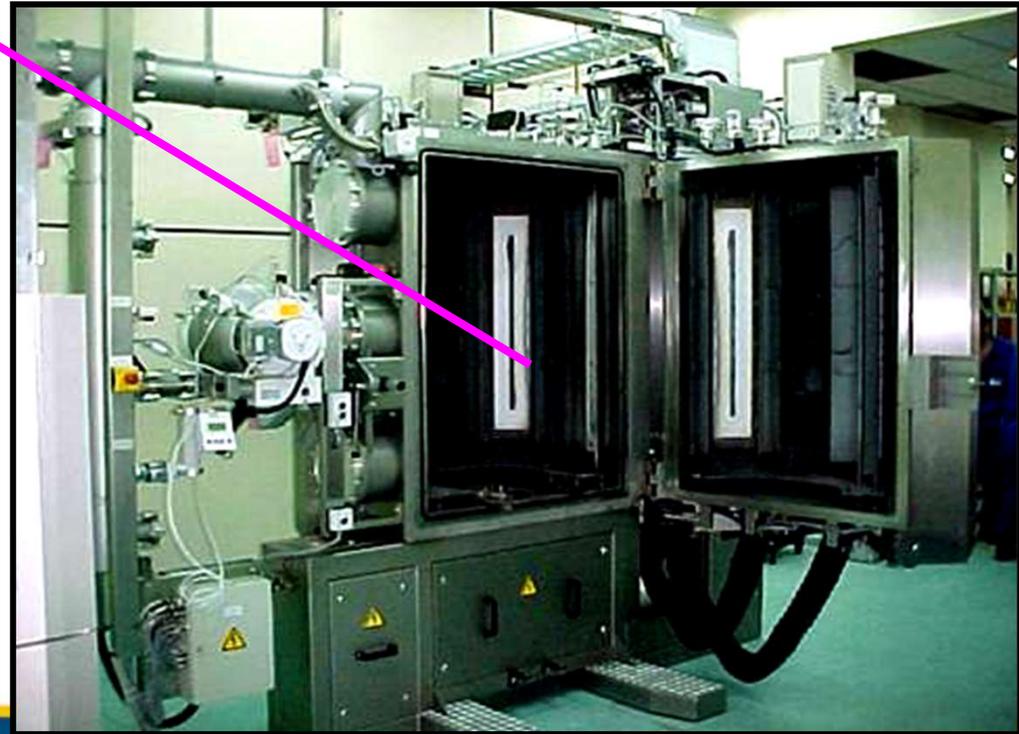
**Esta carga:** Ø900 x 1.000mm compr.  
**Molde de Farol**



Ferramenta  
a



0 - 1000 V Tensão Bias



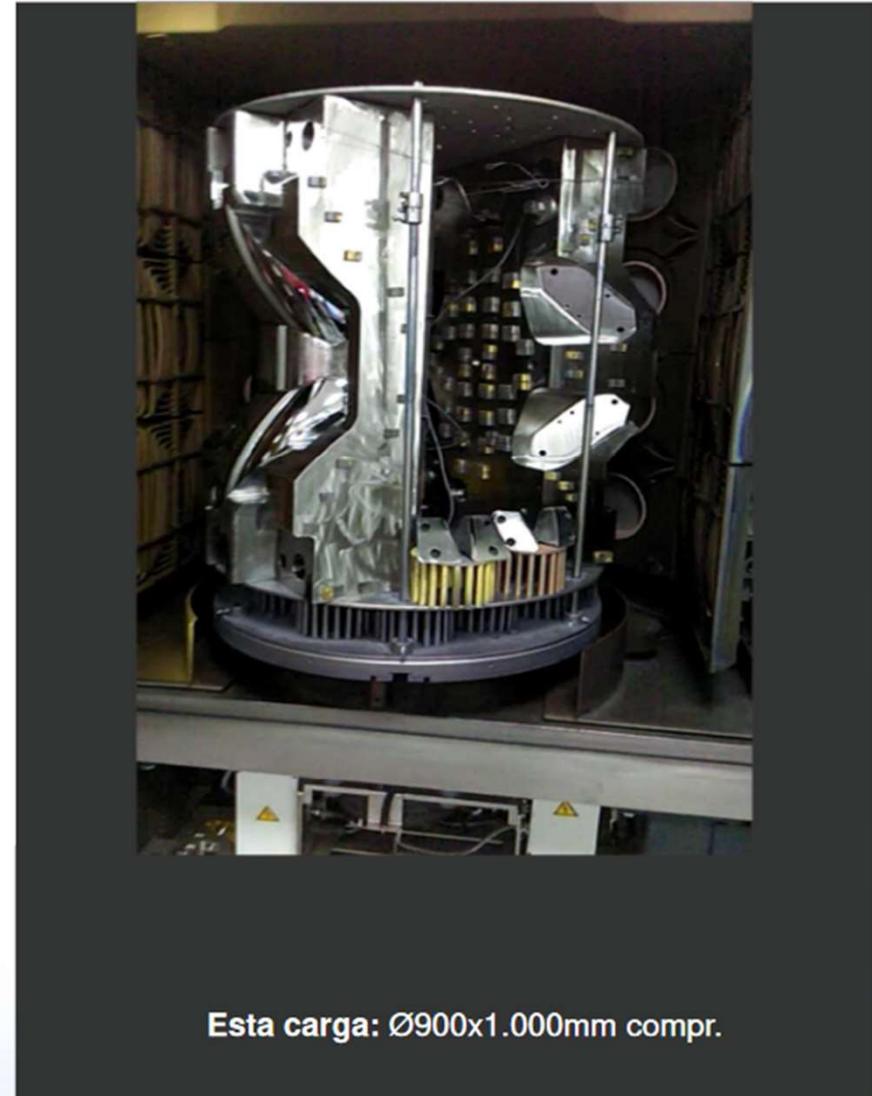
# Tecnologia PVD BALINIT

**œerlikon**



Capacidade máxima: Ø900x1.500mm  
3 Toneladas.

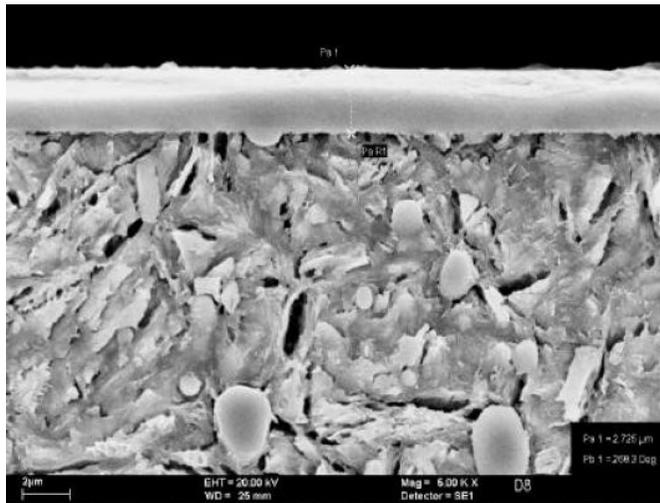
**Forno de revestimento PVD**



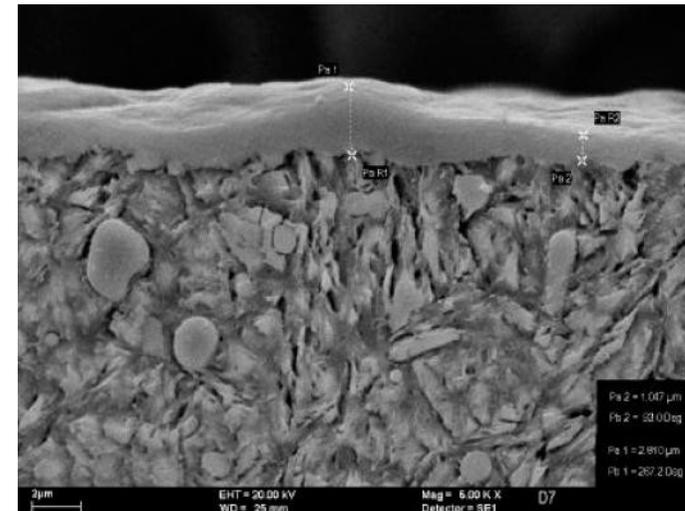
Esta carga: Ø900x1.000mm compr.



# Preparação do substrato



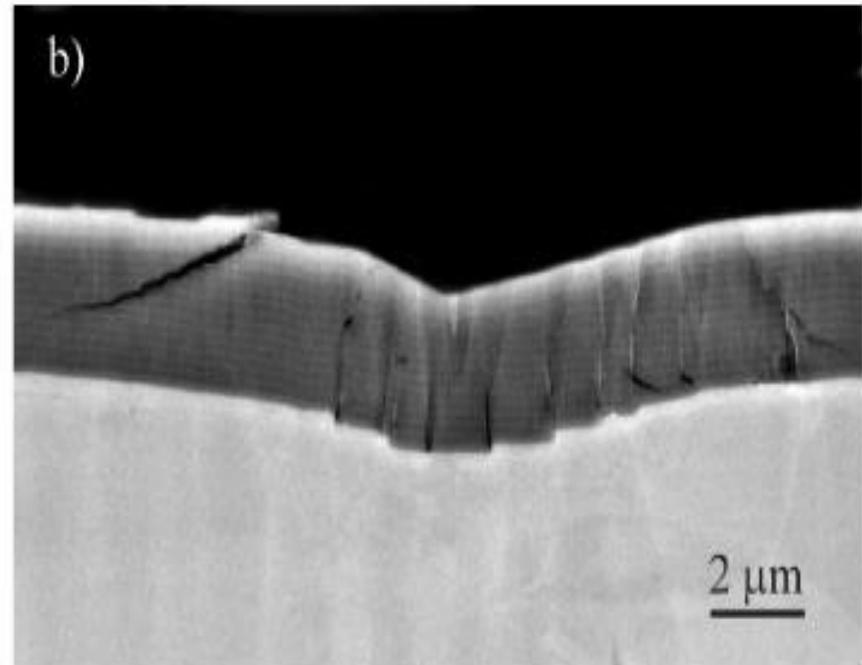
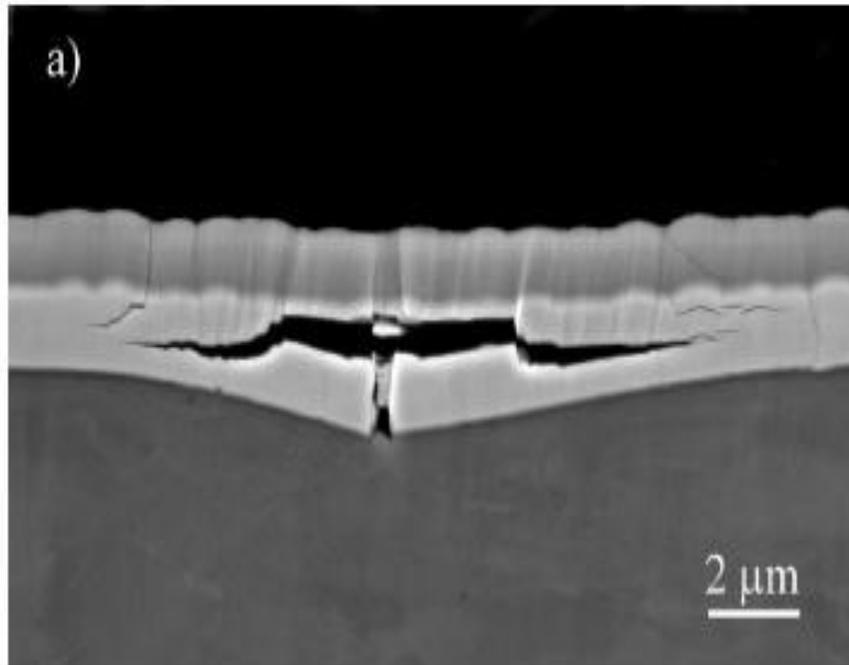
Revestimento PVD (nitreto de titânio) sobre a superfície de um aço D2 polido ( $R_a=0,03\mu\text{m}$ ). A carga crítica de aderência foi de 90 N



Revestimento PVD (nitreto de titânio) sobre a superfície de um aço D2 polido e jateado com  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (500 mesh),  $R_a=0,27\mu\text{m}$ . A carga crítica de aderência foi maior que 100 N

## Propriedades mecânicas

Avaliadas sem considerar a influência do substrato



# DUPLEX – O Processo



(\*) O tipo de PVD depende da aplicação

# BALINIT® DUPLEX

## Vantagens

### Nitretação

- Aumenta dureza superficial
- Melhora o perfil de dureza
- Tensões compressivas
- Melhora dureza a quente

### Revestimento PVD

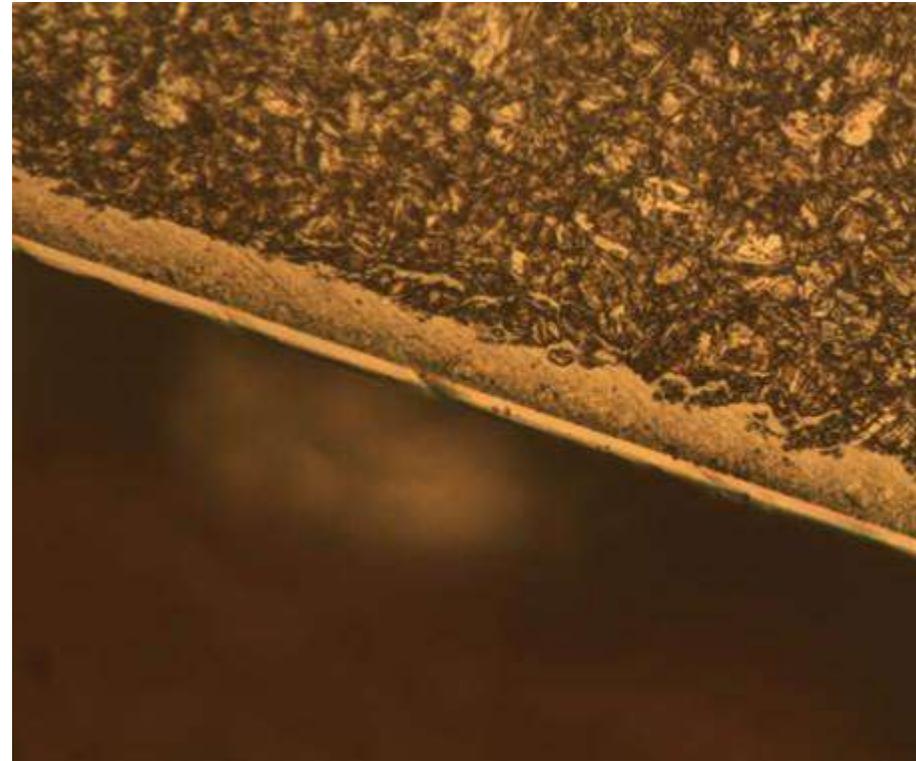
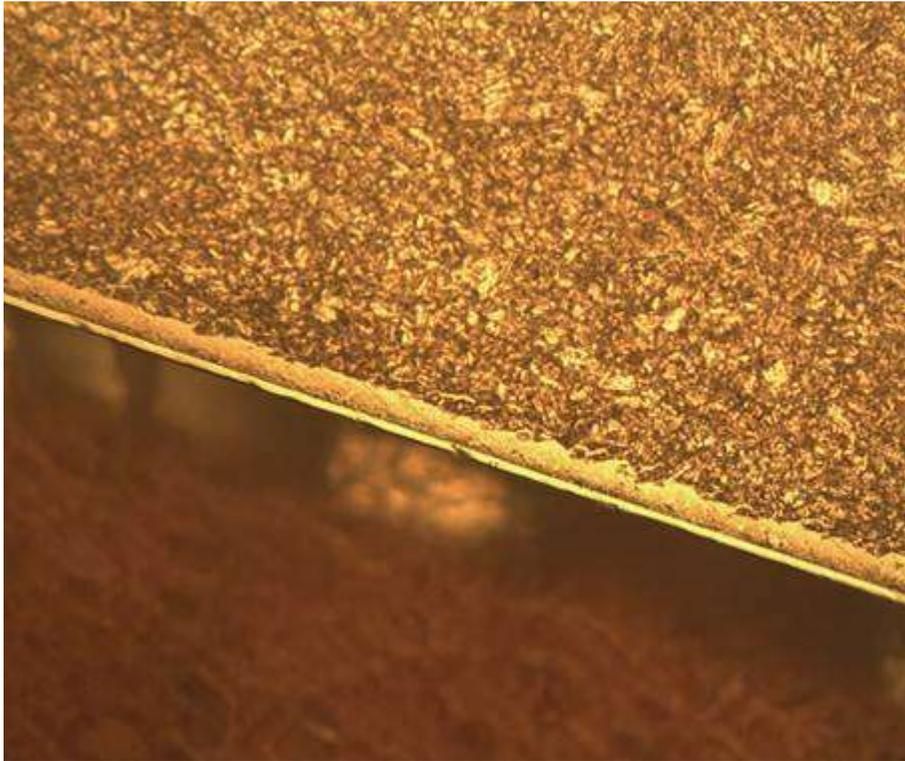
- Alta dureza
- Alta estabilidade térmica
- Alta resistência ao desgaste abrasivo
- Quimicamente inerte



**Material com alta dureza superficial, superfície resistente a deformação e núcleo dúctil**



**AÇO P20 COM PROCESSO  
DUPLEX DE NITRETAÇÃO +  
PVD**



# ESTUDO DE CASO

