

# **SMM 0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I**

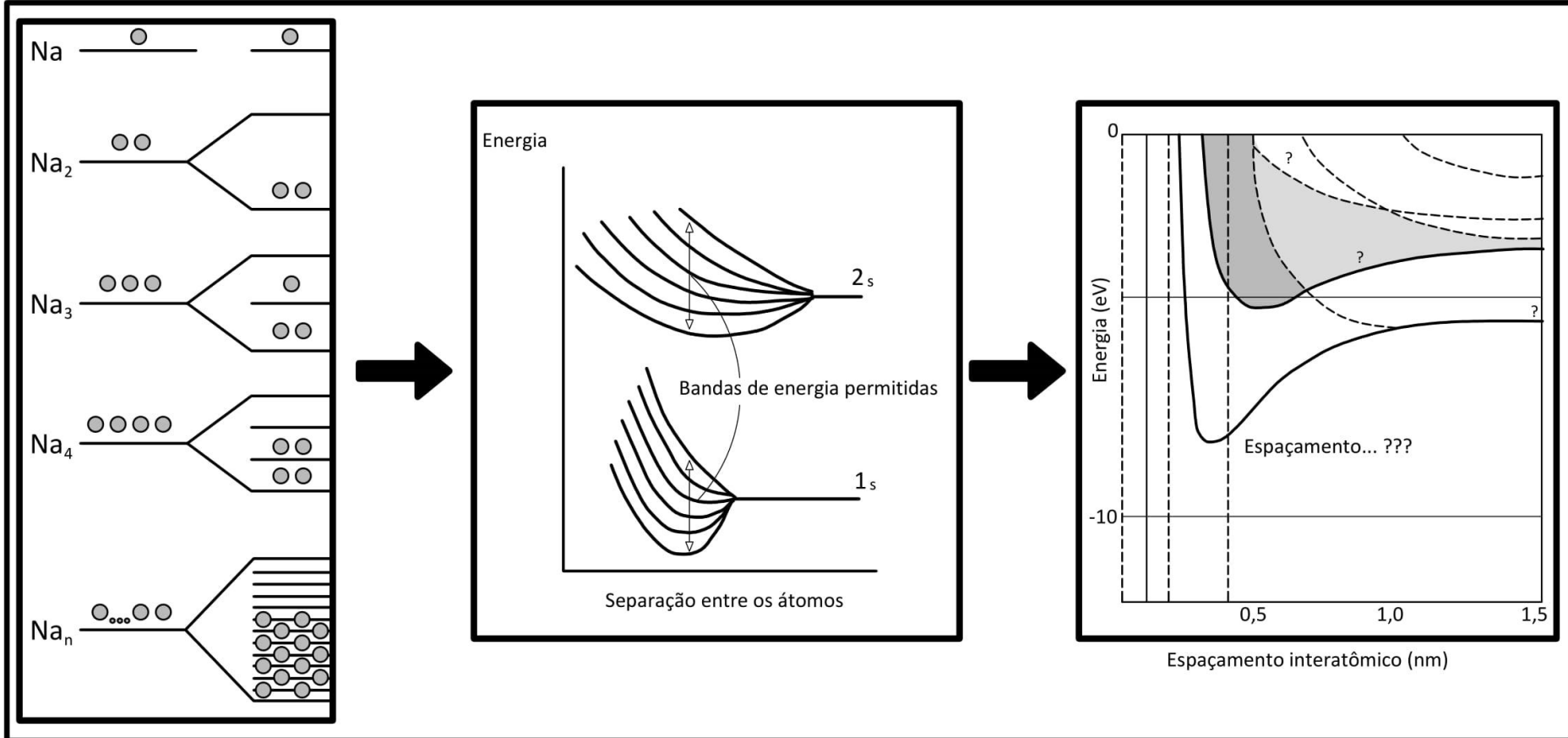


**ESTRUTURA DOS MATERIAIS**  
**MATERIAIS AMORFOS**  
**MATERIAIS CRISTALINOS**  
**CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS**

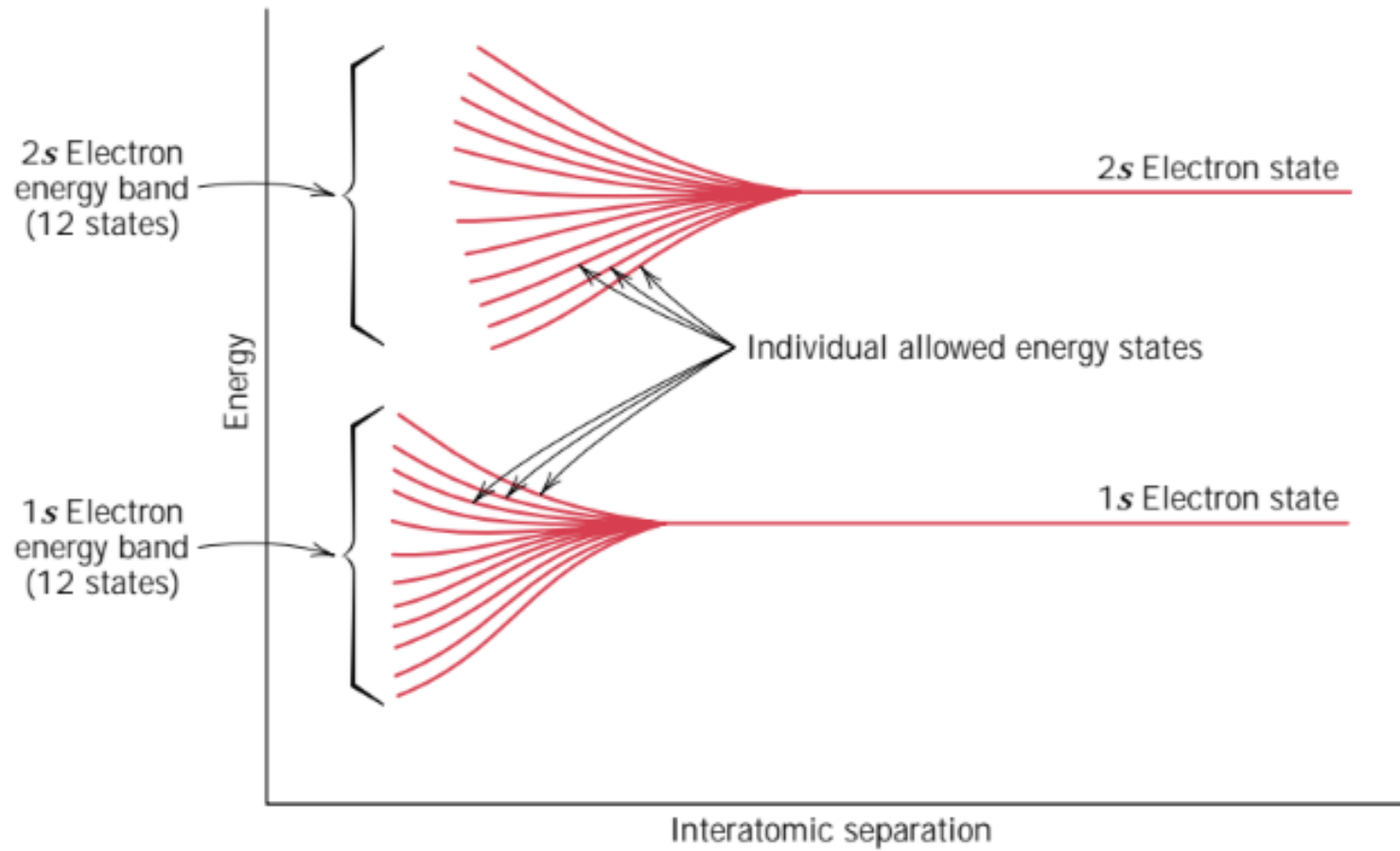
# **MODELO DE BANDAS DE ENERGIA**

$$E_{OM} < E_{OA}$$

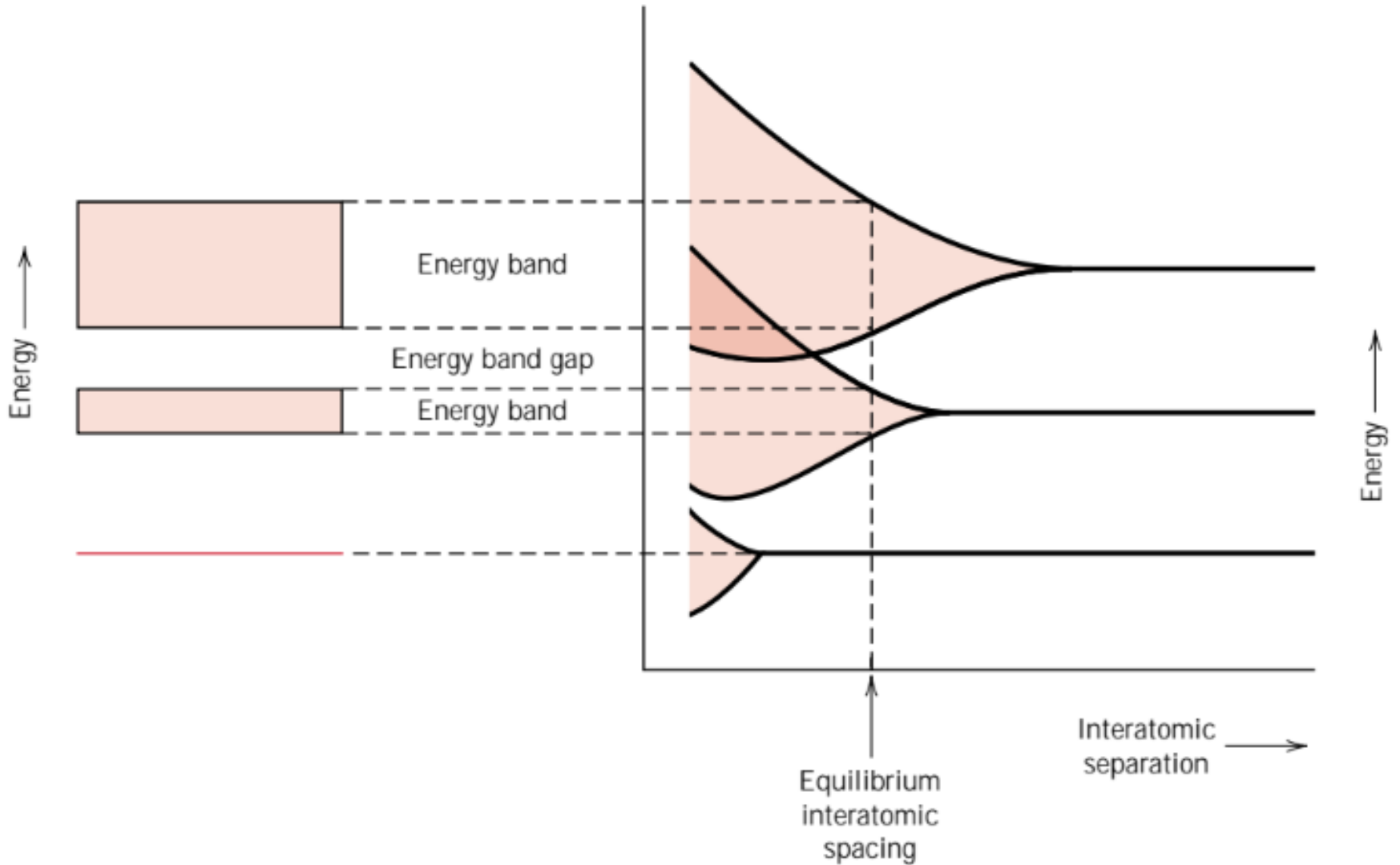
A **energia** total dos **elétrons** do orbital **molecular** tem que ser **menor** que a dos elétrons no **orbital atômico**



# MODELO DE BANDAS



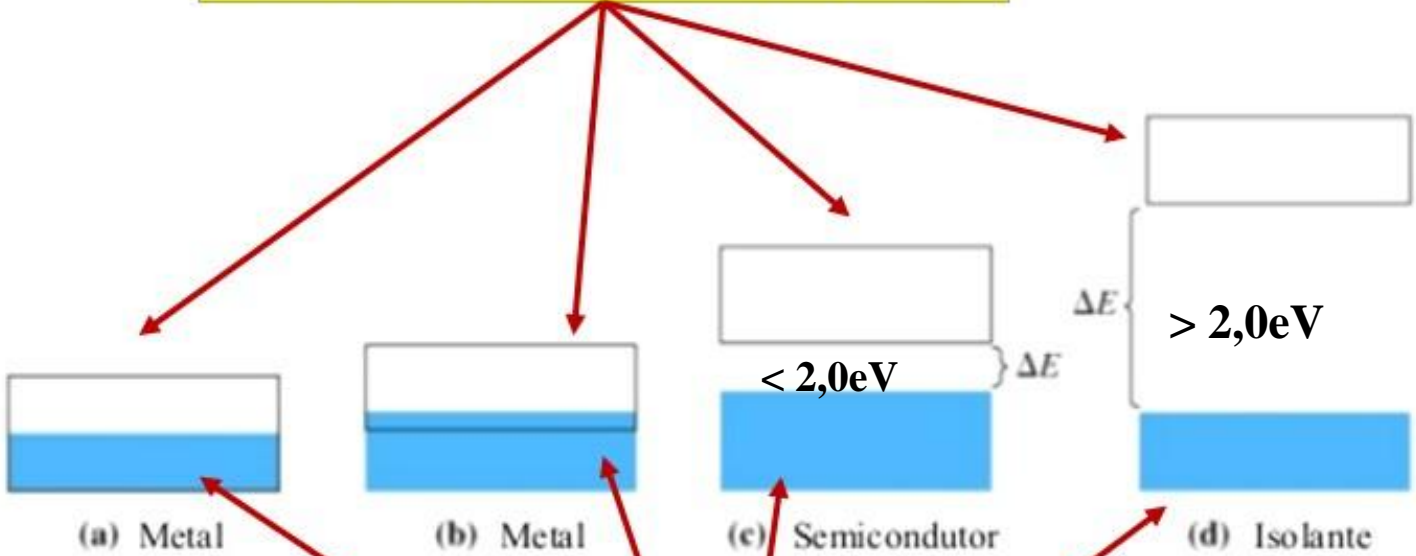
# MODELO DE BANDAS



# MODELO DE BANDAS

## Teoria de Bandas

**BANDA DE CONDUÇÃO**



(a) Metal

(b) Metal

(c) Semicondutor

(d) Isolante

**Dopagem: extrínsecos**

**BANDA DE VALÊNCIA**

# MATERIAIS AMORFOS E CRISTALINOS

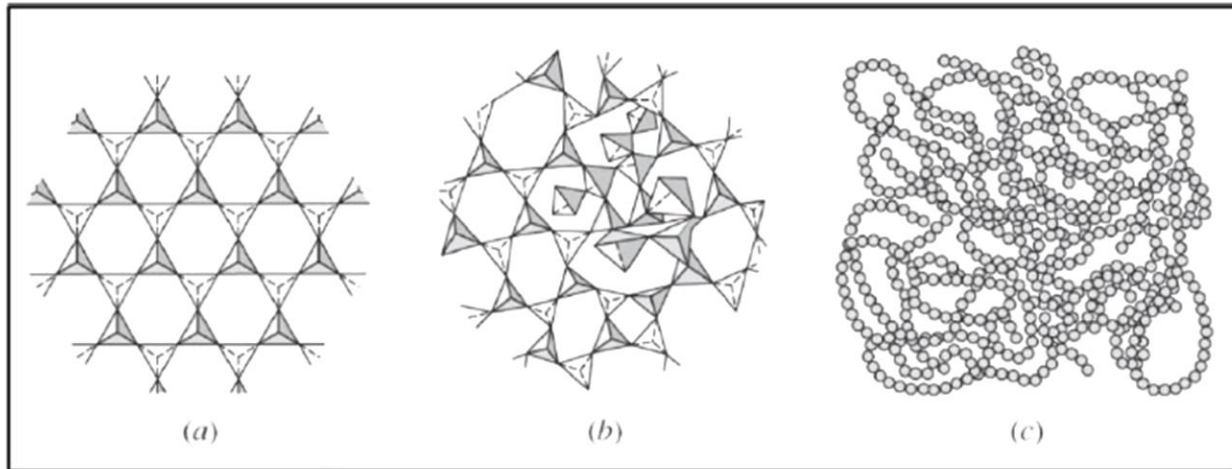
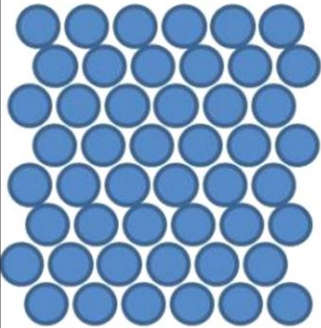
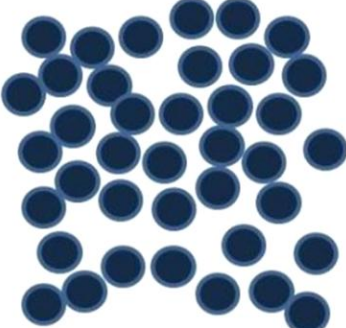
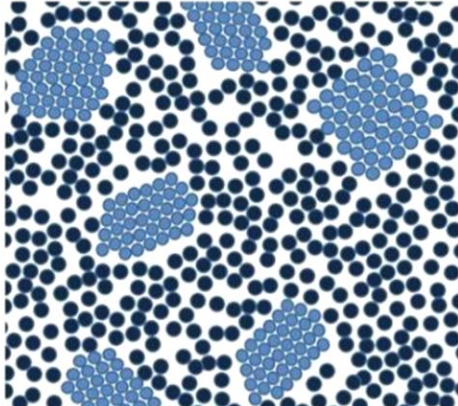


Figura 15X- Esquemas de estruturas: a) Sílica cristalina b) Vidro de sílica amorfo c) Polímero amorfo.

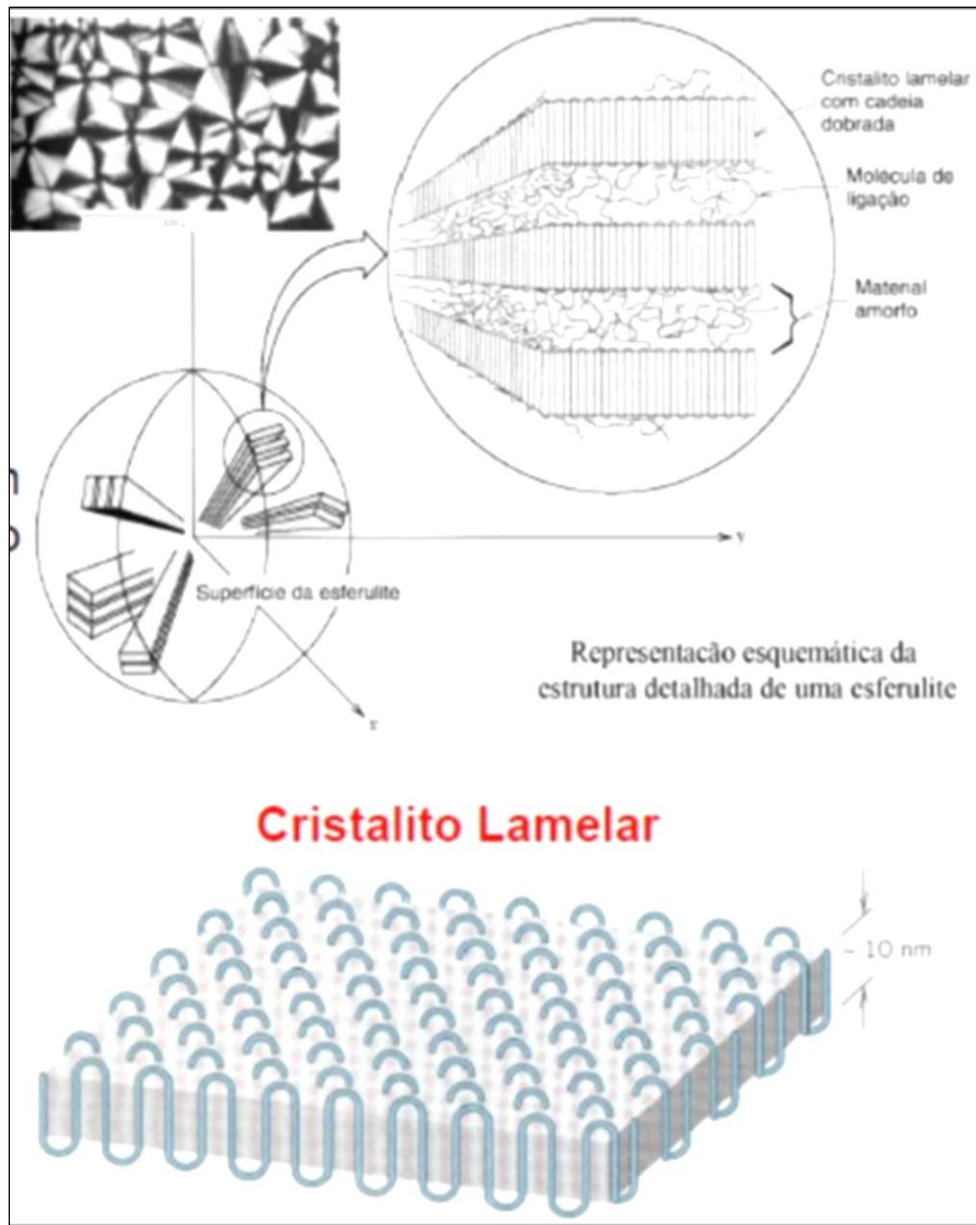
<b>CRISTALINO</b> Estrutura ordenada	<b>AMORFO</b> Estrutura desordenada	<b>NANOCRISTALINO</b> Estruturas ordenadas em escala nanométrica
		

# VIDROS METÁLICOS E METAIS AMORFOS

Resfriamento extremamente rápido ( $10^{14} \text{ K.s}^{-1}$ )



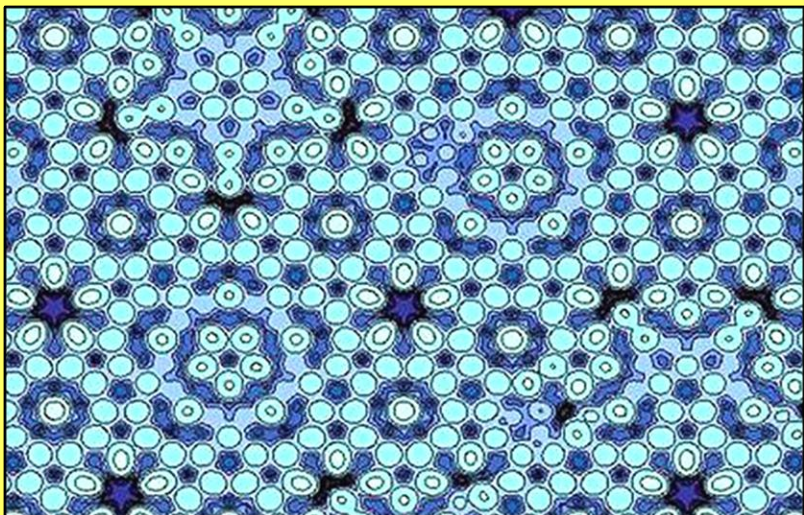
# POLÍMEROS SEMICRISTALINOS



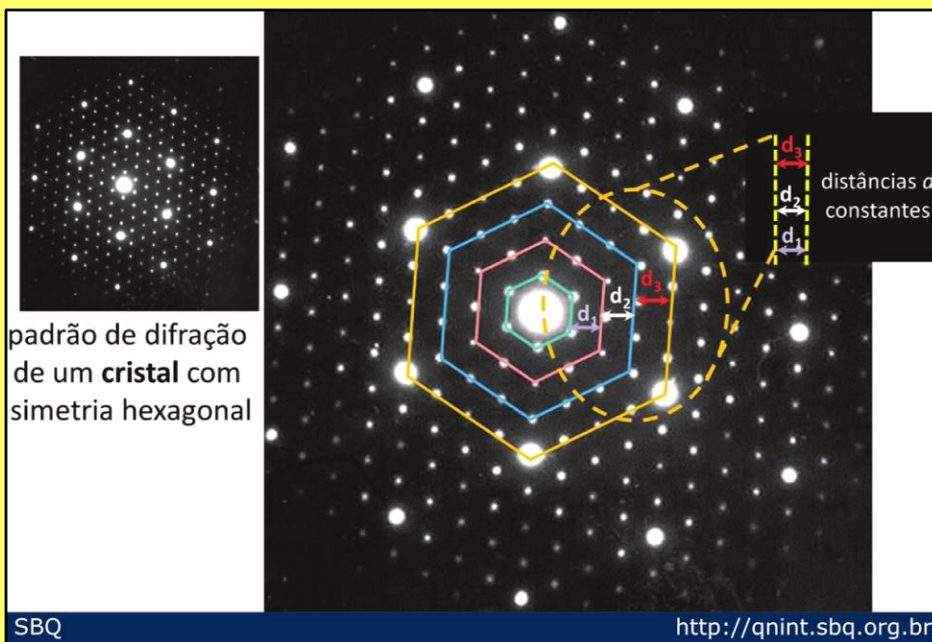
# QUASE CRISTAIS

- Sólido cujo espectro de difração de raios X é similar ao das redes cristalinas, mas sua estrutura é não periódica;
- Relativamente comuns em ligas metálicas;
- Maus condutores de eletricidade;
- Extremamente duros e resistentes;
- Aplicação: revestimentos antiaderentes;
- Descobertos por Dan Shechtman (1941-) em 1982 (Shechtman et al., 1984). PNQ-2011;
- Matematicamente: orientação cristalográfica relacionada à sequência de Fibonacci ou relação áurea, estão associados aos chamados ladrilhos ou mosaicos de Penrose: Roger Penrose (1931-), apresentou este tipo de estrutura em 1974. PNF-2020.

# QUASE CRISTAIS



## Imagem de MET- Padrão de difração de elétrons





## ESTRUTURA CRISTALINA DOS MATERIAIS

- **Gases e líquidos não** apresentam estrutura **cristalina**;
- Os **metais, cerâmicas e os polímeros** podem ou não ser cristalinos;
- Os **metais são normalmente cristalinos**, mas se resfriados em uma taxa muito alta eles podem ter uma estrutura amorfa, (metais amorfos);
- **Cerâmica pode ser amorfa  $\text{SiO}_2$  (silica fundida) ou cristalina (cristobalita)**;
- **Polímeros** consistem de uma cadeia molecular e podem possuir **diferentes graus de cristalinidade**.



# ESTRUTURA DOS SÓLIDOS CRISTALINOS

## ARRANJOS ATÔMICOS (MOLECULARES)

### ORDENAMENTOS DE CURTO E LONGO ALCANCE

**1 - GASES(Ar) = NENHUM ARRANJO ESPACIAL DEFINIDO (REENCHEM TOTALMENTE O ESPAÇO DE CONFINAMENTO)**

**2 - VAPORES, LÍQUIDOS E SÓLIDOS AMORFOS (VIDRO) = ARRANJO ORDENADO DE CURTO ALCANCE (DA ORDEM DE ÁTOMOS E MOLÉCULAS VIZINHAS)**

**3 - OS METAIS, CERÂMICOS E POLÍMEROS = ARRANJO ORDENADO DE LONGO ALCANCE = ESTRUTURA CRISTALINA**

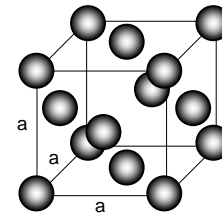
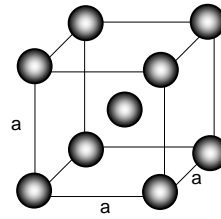
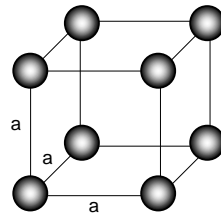


Uma **célula unitária** é definida como a **menor porção do cristal que ainda conserva as propriedades** originais do mesmo. Existem células unitárias de diversos tipos.

A partir das redes de Bravais, podem ocorrer estruturas cúbica de corpo centrado (**CCC**), cúbica de face centrada (**CFC**) e hexagonal compacta (**HC**) que permitem **maior grau de empacotamento atômico**.

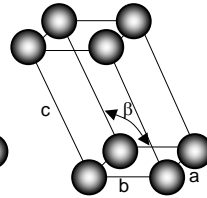
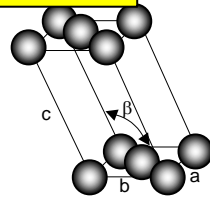


Em **1842**, M. L. **Frankenheim** estimou que havia **15 possibilidades** de alocar **pontos** em uma rede periódica tridimensional, considerando a **simetria espacial**. O físico e mineralogista francês Auguste **Bravais** corrigiu esta estimativa para **14**. Bravais publicou em **1850** o trabalho *Systemes formés par des points distribués régulièrement sur un plan ou dans l'espace*. Os **pontos das redes de Bravais** são **sítios possíveis** para **átomos e moléculas** na formação dos materiais **cristalinos**.

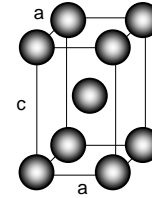
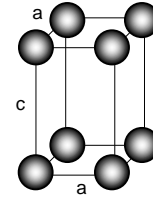


CÚBICO

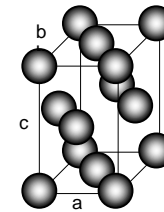
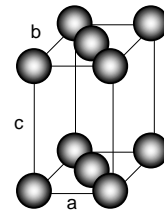
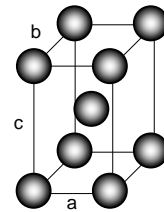
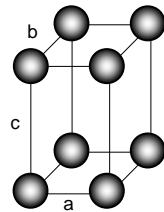
# 14 redes de Bravais



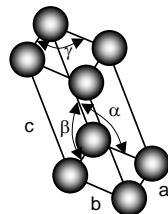
MONOCLÍNICO



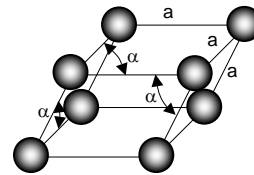
TETRAGONAL



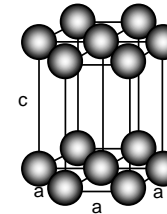
ORTORRÔMBICO



TRICLÍNICO

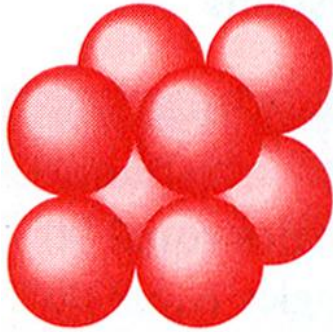


ROMBOÉDRICO

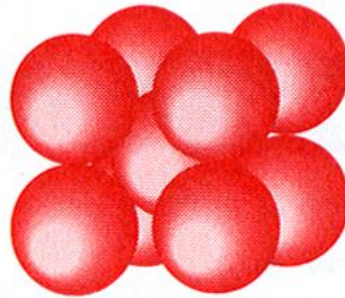


HEXAGONAL

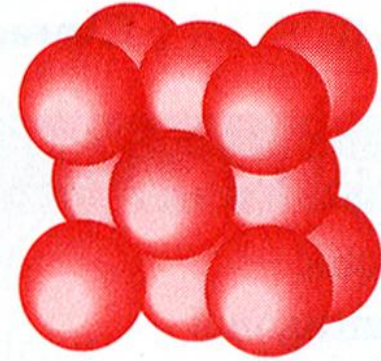
# RETICULADOS CÚBICOS-MODELO DE ESFERAS RÍGIDAS



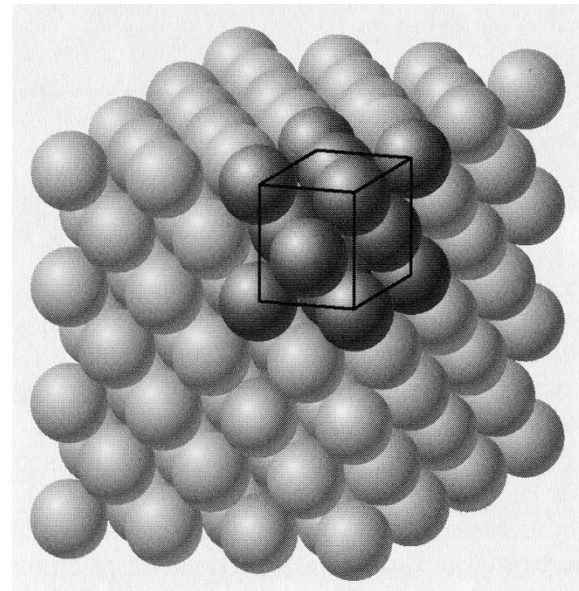
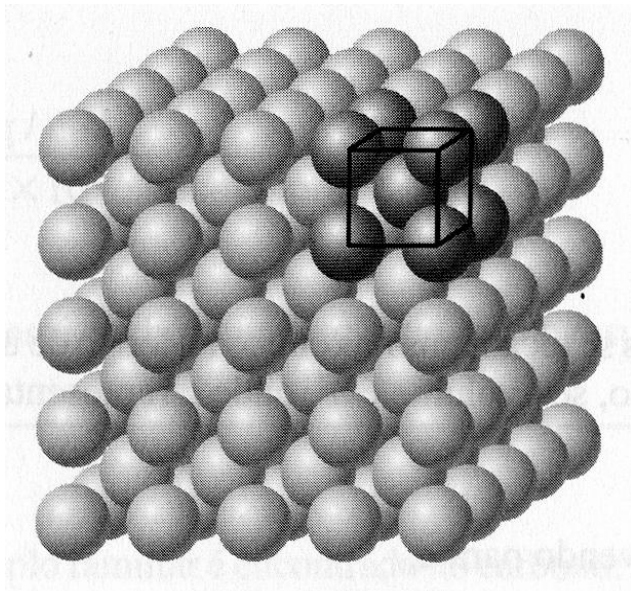
**CÚBICO  
SIMPLES**



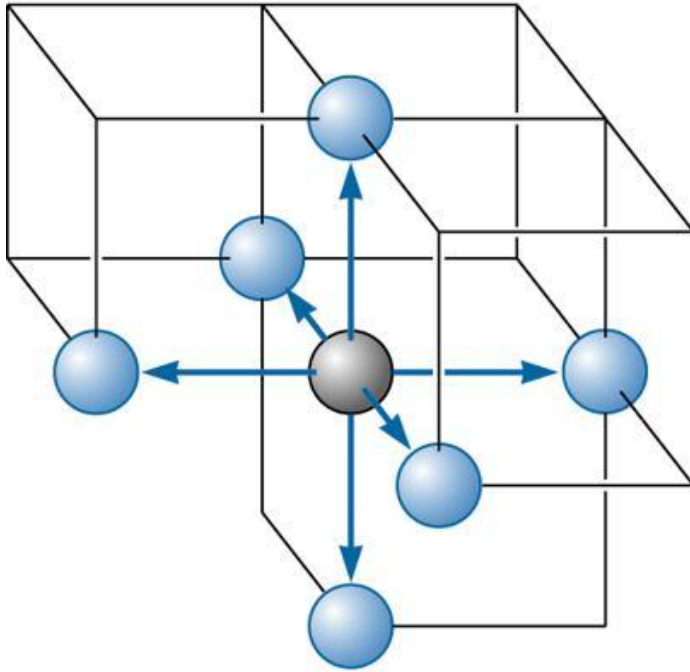
**CÚBICO DE CORPO  
CENTRADO(Fe)**



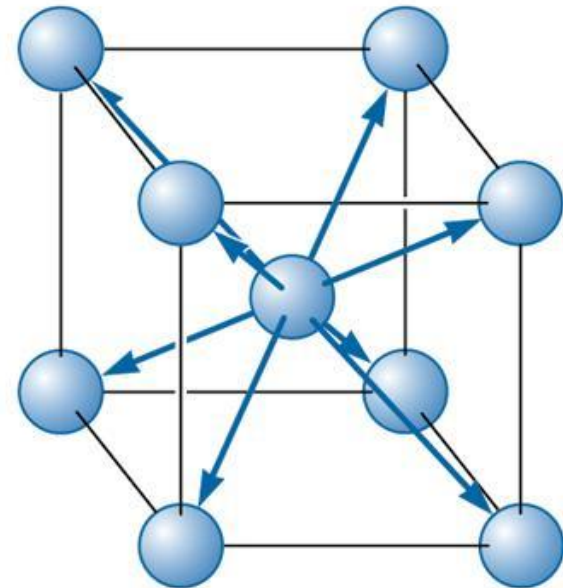
**CÚBICO DE FACE  
CENTRADAS (Fe e Al)**



# Número de Coordenação



(a)



(b)

(c) 2003 Brooks/Cole Publishing / Thomson Learning™

**Número de coordenação em (a) SC e (b) CCC. 6 átomos tocam cada átomo no SC, enquanto que no CCC 8 átomos tocam cada átomo..**

## Dois fatores importantes

**Fator de empacotamento atômico** = volume total dos átomos associados a célula unitária, CU /volume da CU.

**Densidade verdadeira** = (nº de átomos associados a CU x peso atômico)/(Volume da CU x  $6,023 \cdot 10^{23}$ )

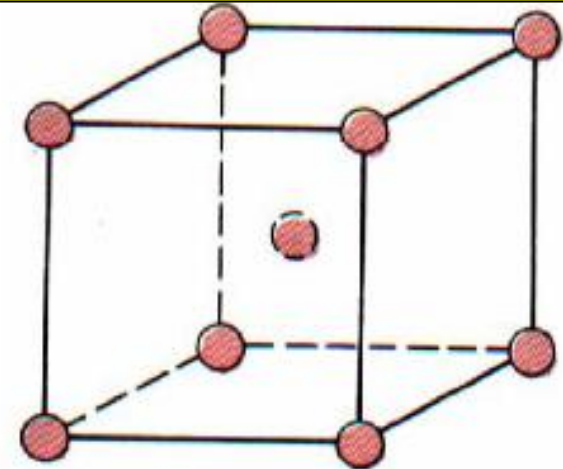
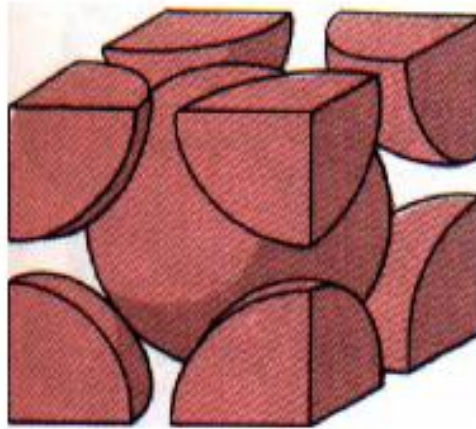
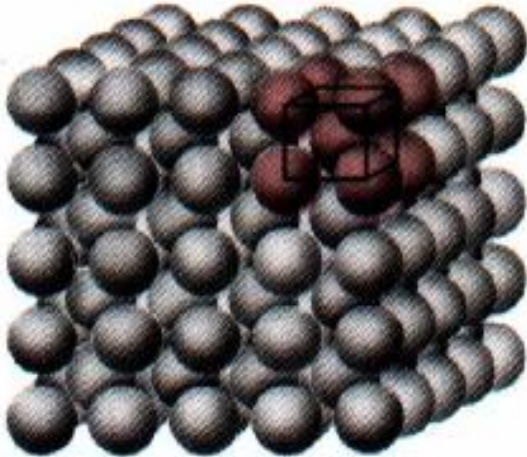


$$\text{Fator de Empacotamento, FE} = \frac{(4 \text{ atoms/cel.})\left(\frac{4}{3} \pi r^3\right)}{a_0^3}$$

$$\text{Para a CU (CFC), } a_0 = 4r/\sqrt{2}$$

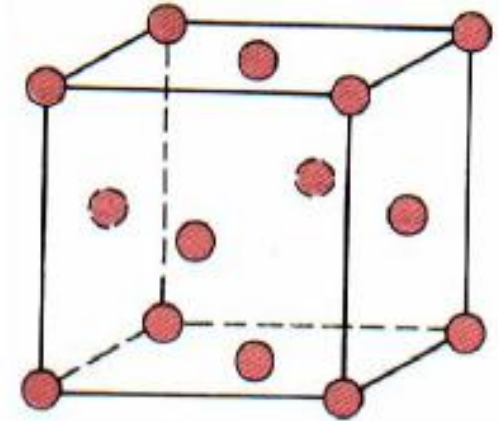
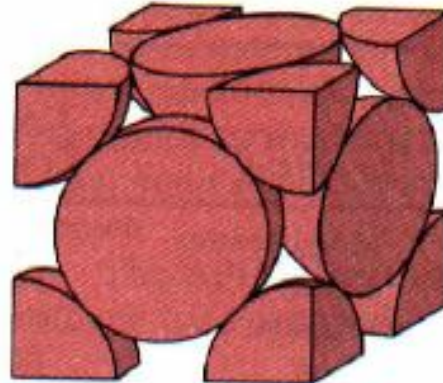
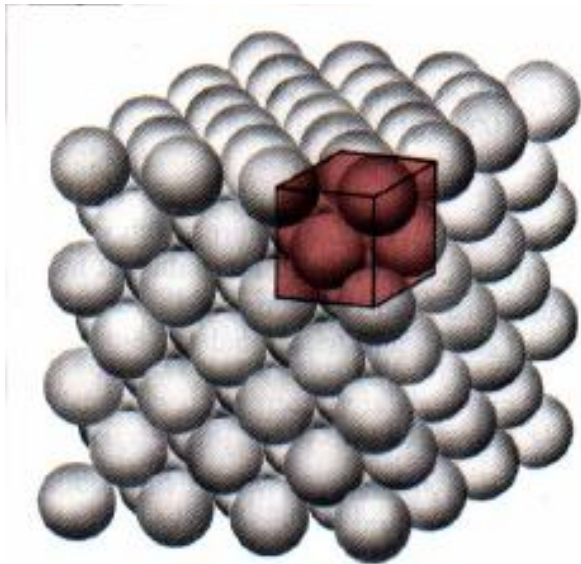
$$\text{Fator de Empacotamento} = \frac{(4)\left(\frac{4}{3} \pi r^3\right)}{(4r/\sqrt{2})^3} = \frac{\pi}{\sqrt{18}} \cong 0.74$$

## ESTRUTURA CCC: A DENSIDADE ESTÁ RELACIONADA À ESTRUTURA



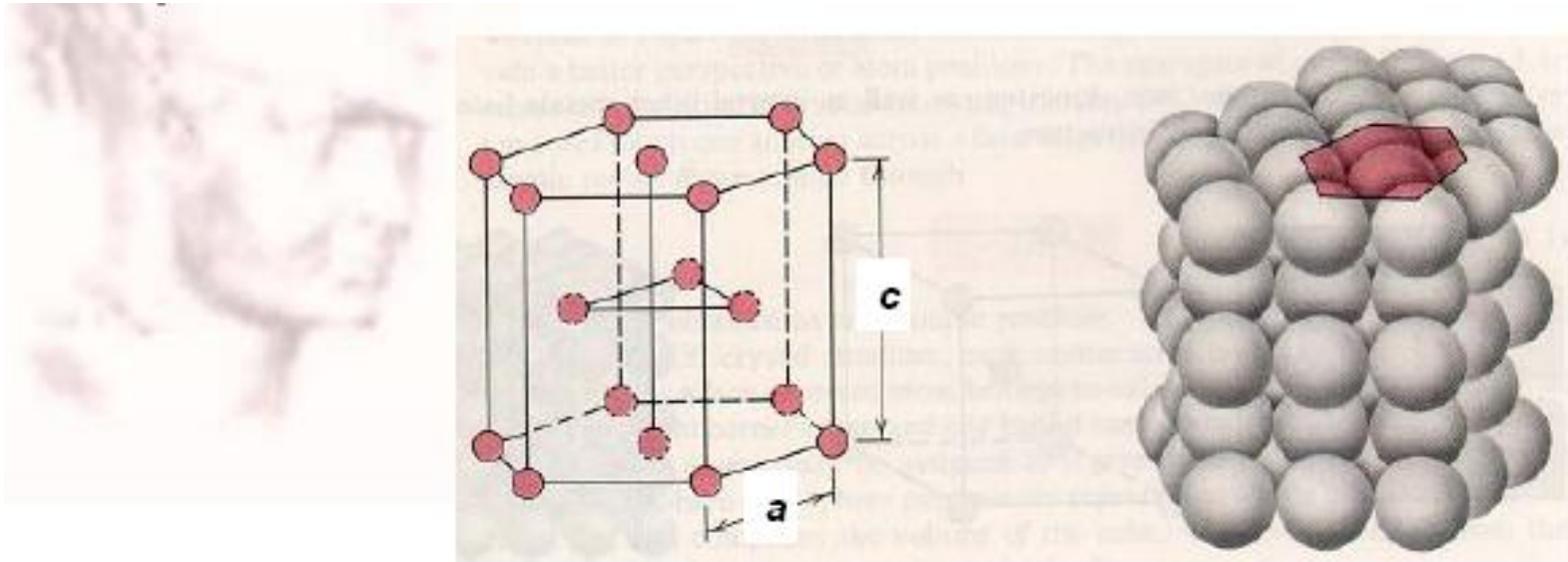
- A relação entre o raio atômico,  $R$ , e a aresta do cubo,  $a$ , é dada por: 
$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$
- O número de átomos por célula unitária é igual a 2.
- O número de coordenação é igual a 8.
- Exemplo de metais CCC: Fe- $\alpha$ , cromo, tungstênio, molibdênio.

## ESTRUTURA CFC: MAIS DENSO QUE O CCC



- A relação entre o raio atômico,  $R$ , e a aresta do cubo,  $a$ , é dada por:  $a = 2R\sqrt{2}$ .
- O número de átomos por célula unitária é igual a 4.
- O **número de coordenação** é igual a 12.
- Exemplo de metais CFC: cobre, alumínio, ouro, chumbo.

## ESTRUTURA HC: MAIS DENSO QUE O CCC



- $c/a = 1,633$  (ideal).
- O número de átomos por célula unitária é igual a 6.
- O número de coordenação é igual a 12.
- Exemplo de metais HC: cádmio, cobalto, zinco.

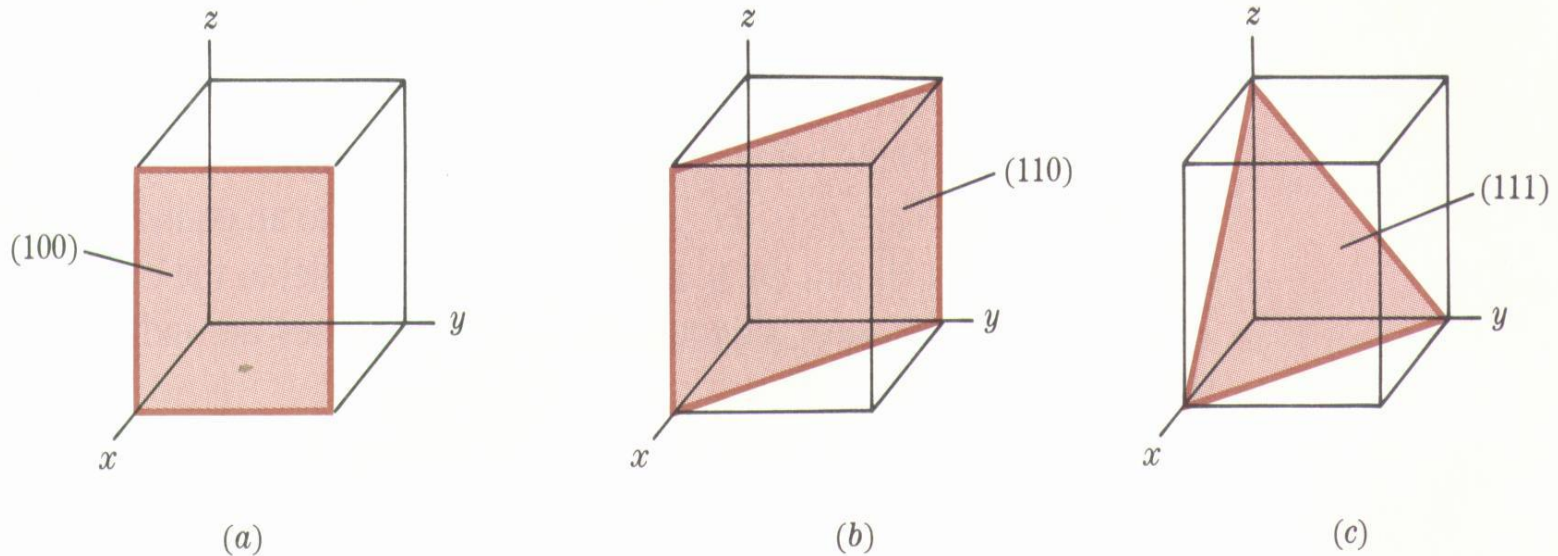
**TABLE 3-2 ■ Crystal structure characteristics of some metals**

Structure	$a_0$ versus $r$	Atoms per Cell	Coordination Number	Packing Factor	Examples
Simple cubic (SC)	$a_0 = 2r$	1	6	0.52	Polonium (Po), $\alpha$ -Mn
Body-centered cubic	$a_0 = 4r/\sqrt{3}$	2	8	0.68	Fe, Ti, W, Mo, Nb, Ta, K, Na, V, Zr, Cr
Face-centered cubic	$a_0 = 4r/\sqrt{2}$	4	12	0.74	Fe, Cu, Au, Pt, Ag, Pb, Ni
Hexagonal close-packed	$a_0 = 2r$ $c_0 \approx 1.633a_0$	2	12	0.74	Ti, Mg, Zn, Be, Co, Zr, Cd

## PLANOS E DIREÇÕES CRISTALOGRÁFICAS

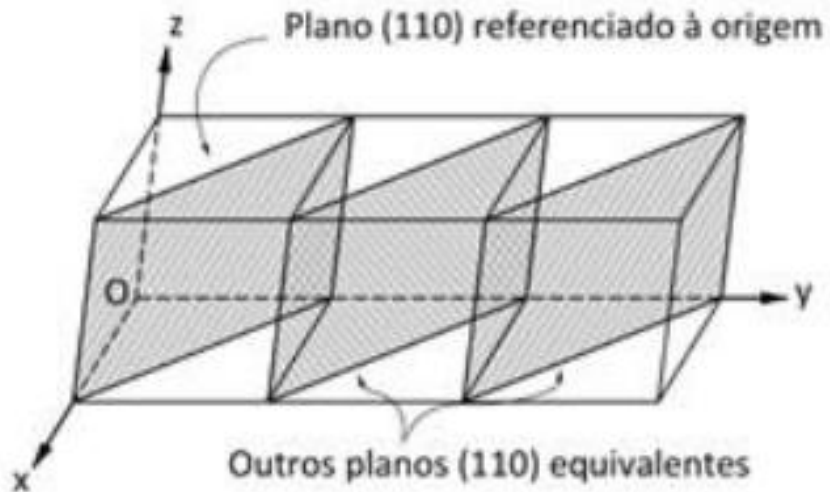
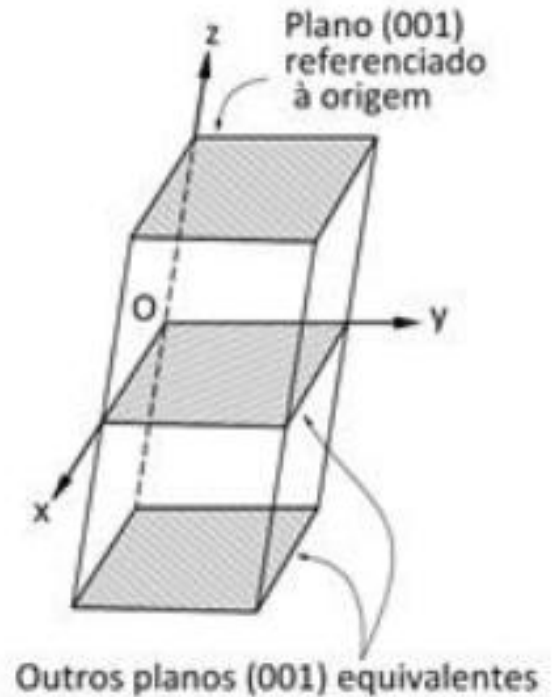
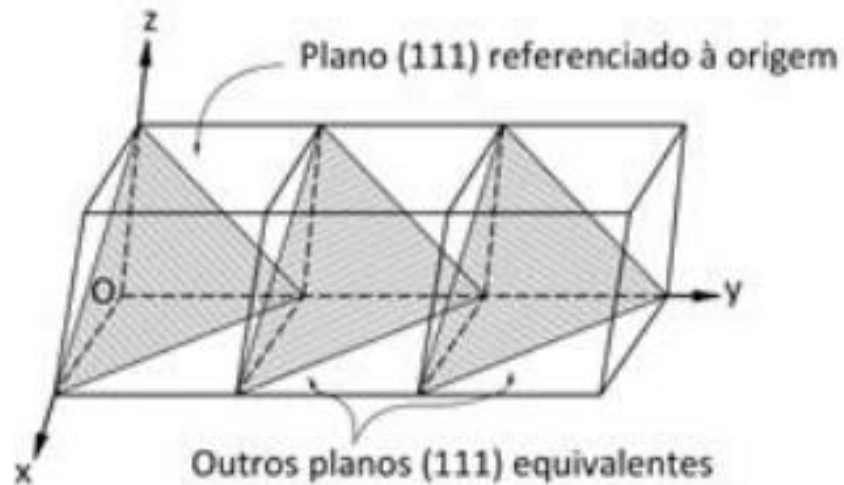
- Os materiais **crystalinos** são formados por **planos atômicos** e são caracterizados como em **geometria**, por coordenadas;
- São utilizados os **índices de Miller** (1839) propostos pelo mineralogista William Hallowes Miller: **inverso das coordenadas do vetor direção, ou o inverso dos interceptos do plano cristalográfico**;
- Os planos atômicos são representados com os índices de Miller entre **parênteses**;
- Planos **equivalentes** são agrupados em **famílias** e são representados pelos índices de Miller entre **chaves**. Ex: família do plano (111) é {111};
- **Direções cristalográficas** são representadas por **colchetes** e as **famílias** por **colchetes angulados**. Exemplo: a **direção** [111], **família** <111>. A **direção é perpendicular ao plano** ao qual está associada.

# PLANOS CRISTALÓGRAFICOS-ÍNDICES DE MILLER



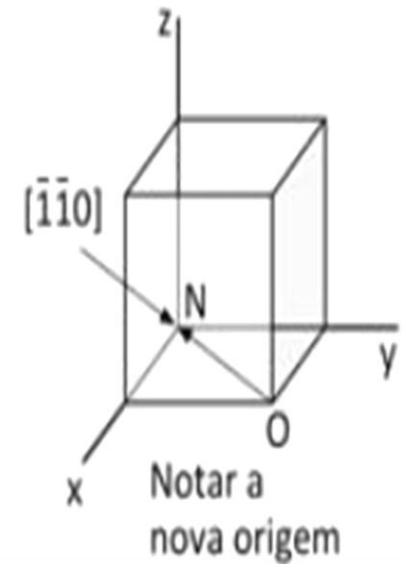
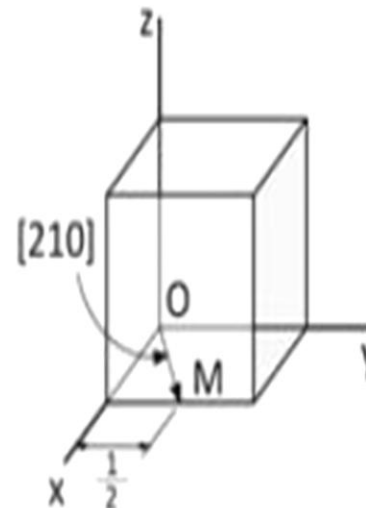
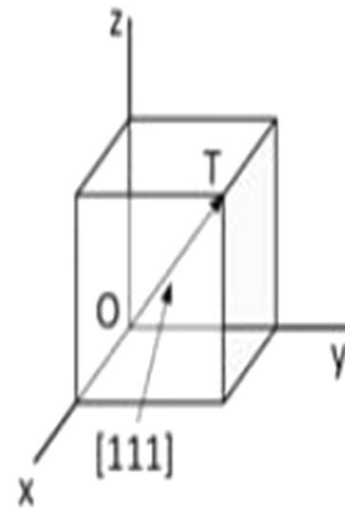
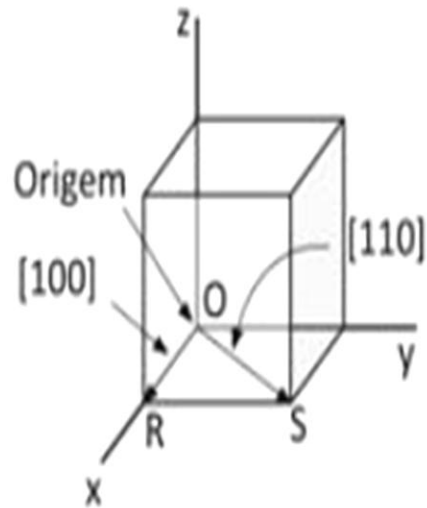
**FIGURE 3.13** Miller indices of some important cubic crystal planes: (a)  $(100)$ , (b)  $(110)$ , and (c)  $(111)$ .

# FAMÍLIA DE PLANOS CRISTALOGRÁFICOS

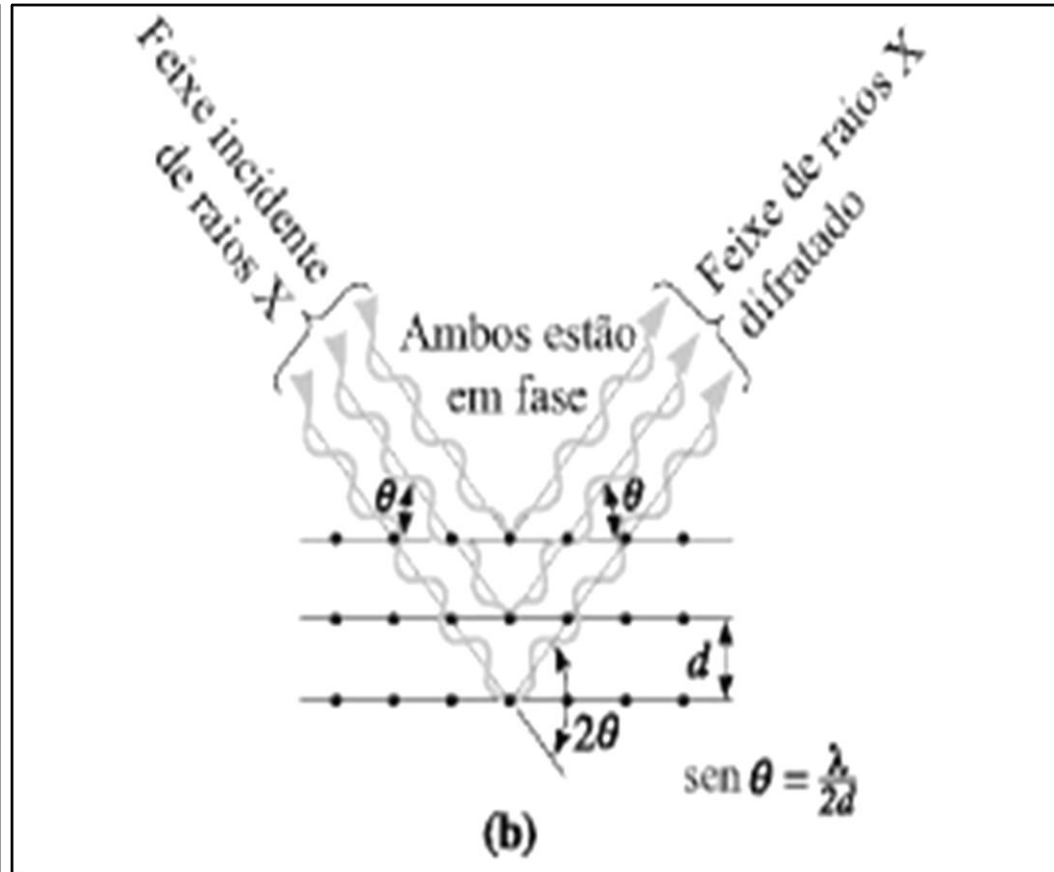
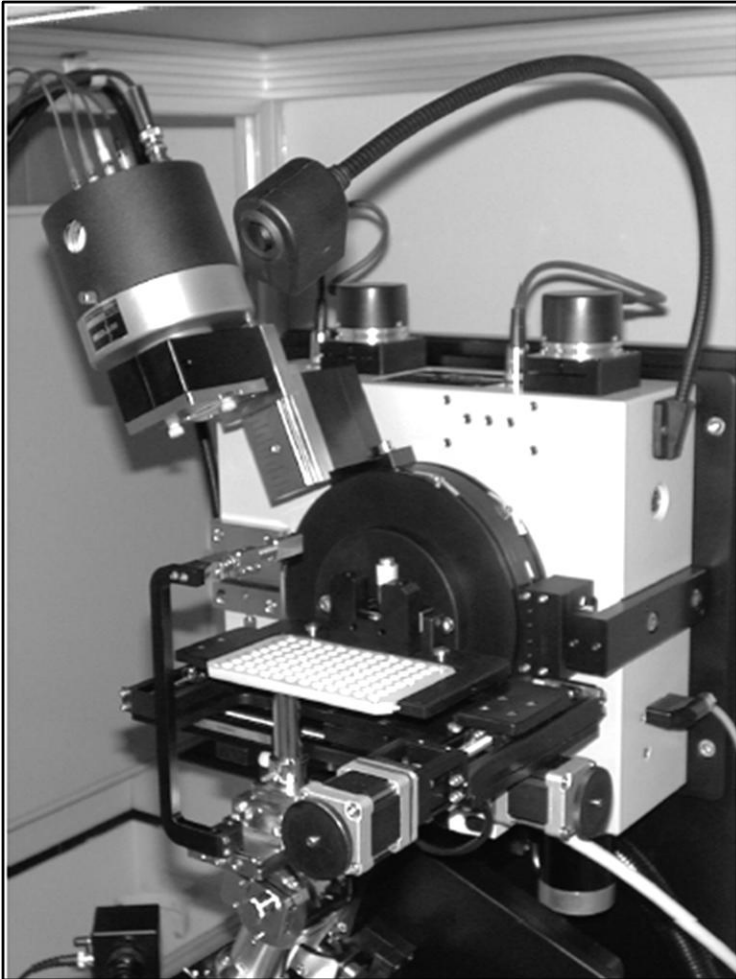


Nota: uma família de planos, como por exemplo  $(\bar{1}11)$ ,  $(1\bar{1}1)$ ,  $(11\bar{1})$ ,  $(\bar{1}\bar{1}1)$ ,  $(1\bar{1}\bar{1})$ ,  $(\bar{1}1\bar{1})$ ,  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$  e  $(111)$  é representada por  $\{111\}$ .

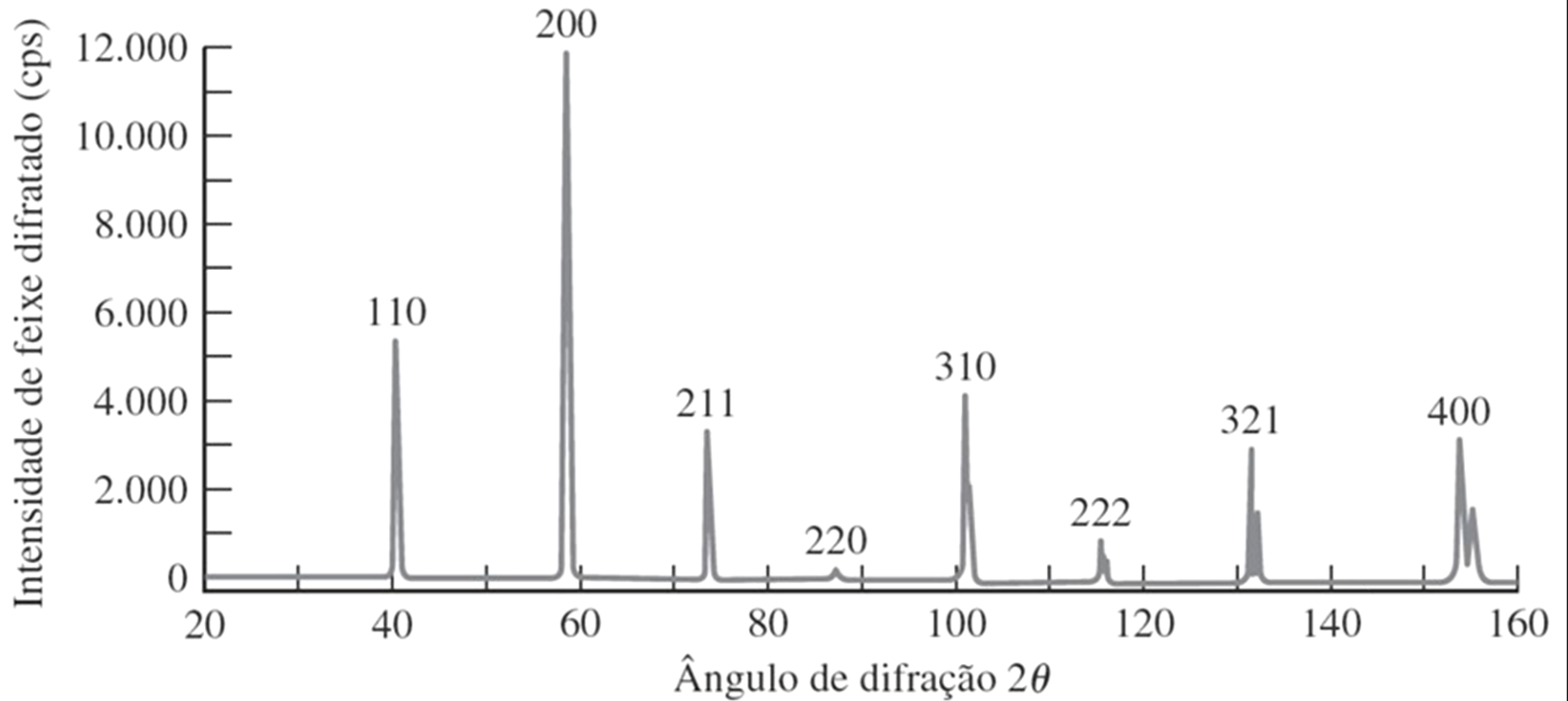
# DIREÇÕES CRISTALOGRÁFICAS-ÍNDICES DE MILLER



# Difratômetro de Raios X-Lei de Bragg



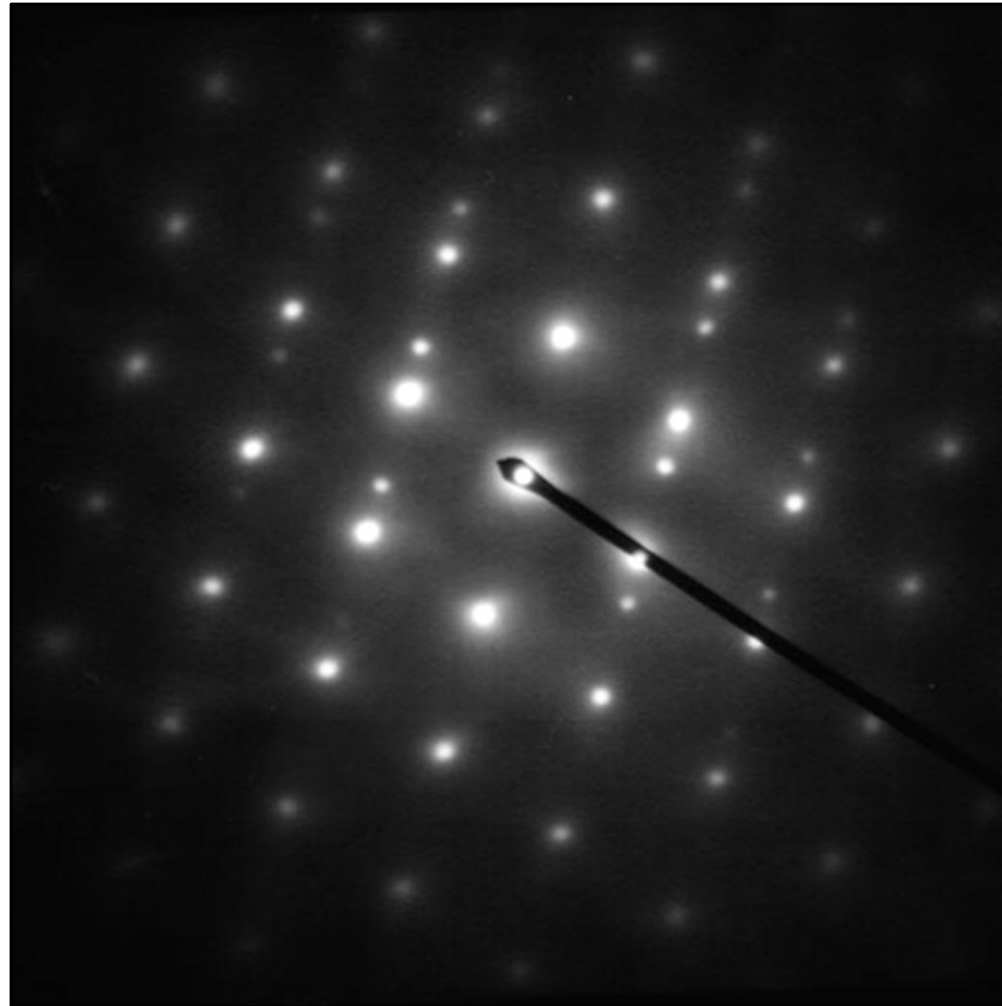
# Difratograma



(A.G. Guy and J.J. Hren, "Elements of Physical Metallurgy" 3. ed., Addison-Wesley, 1974.)

# Imagem de Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET)

Padrão de difração de elétrons para uma rede CFC-Austenita-Aço

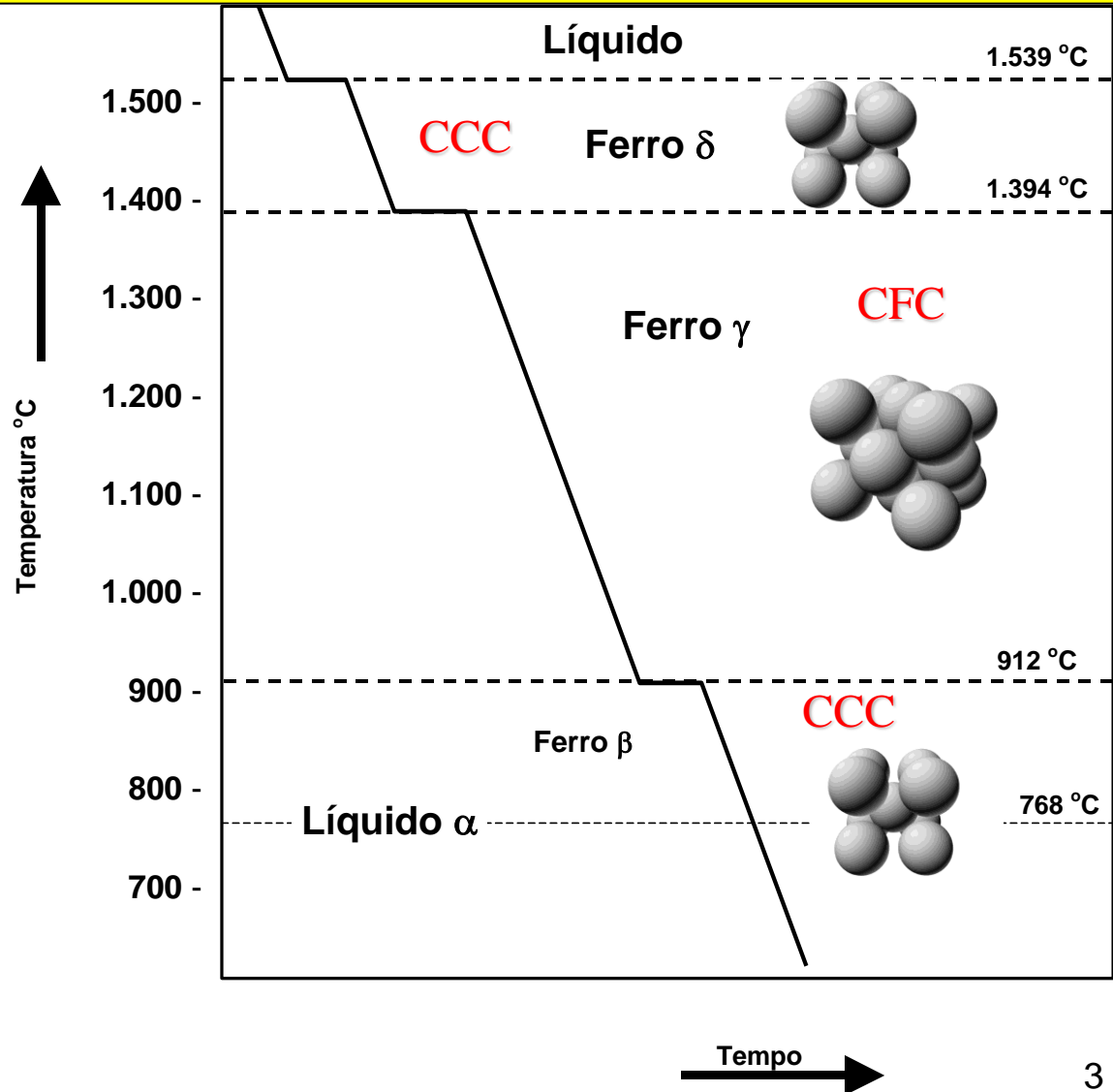


# ALOTROPIA OU POLIMORFISMO

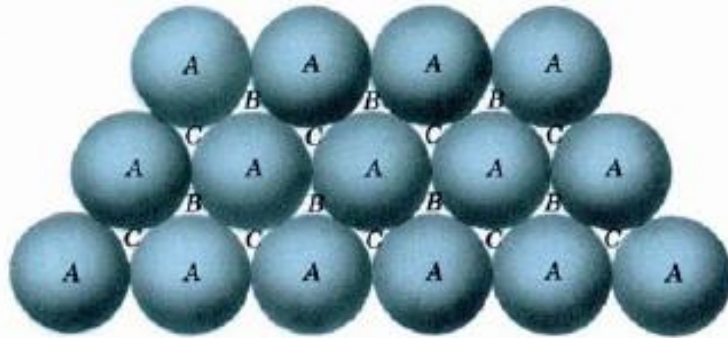
Alguns metais e não metais podem ter mais de uma estrutura cristalina.

Depende da temperatura e pressão

Nas mudanças polimórficas há normalmente uma alteração da densidade e de outras propriedades físicas



# FORMAÇÃO DA ESTRUTURA COMPACTA-HC



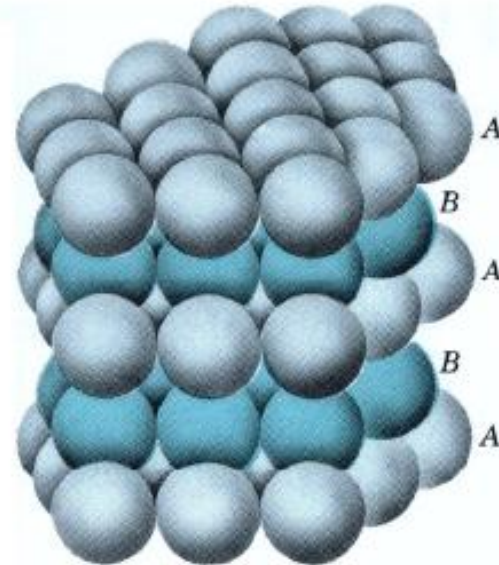
(a)

*Plano compacto formado por esferas rígidas (A). Observam-se dois tipos de interstícios, que são assinalados como B e C.*



(b)

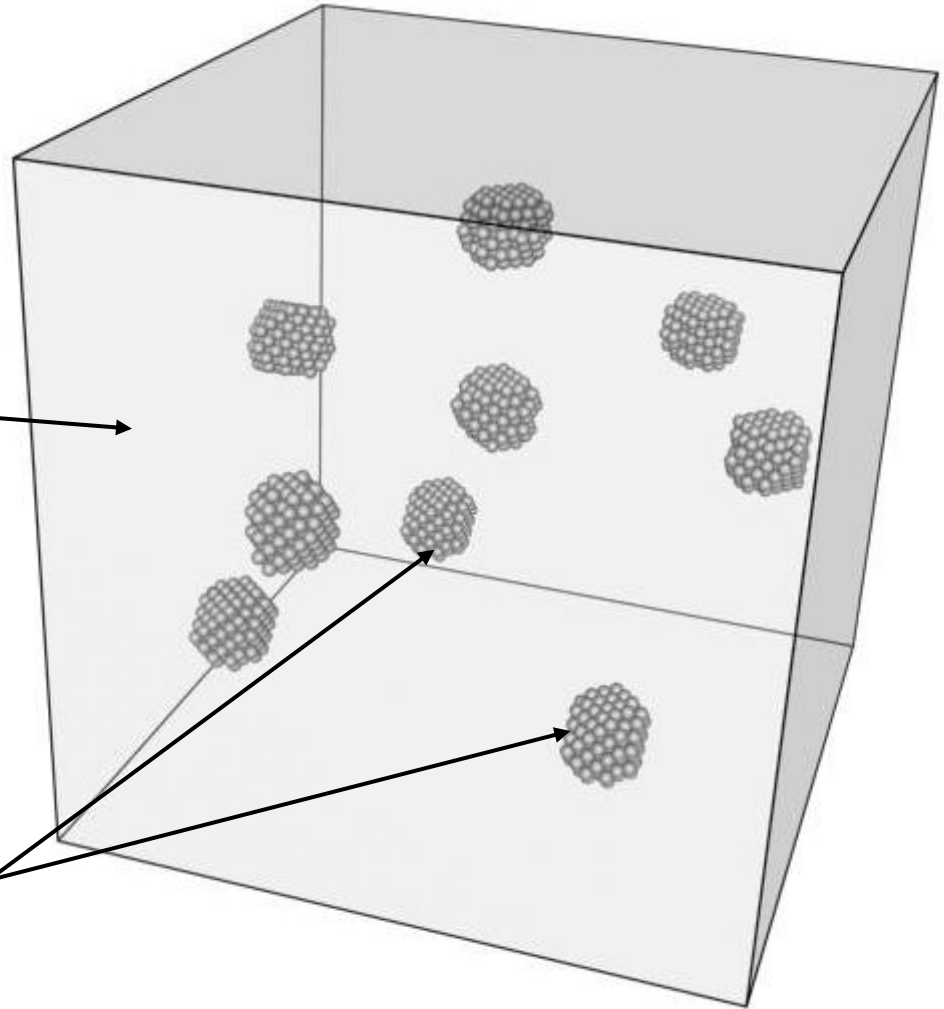
*Empilhamento de dois planos compactos.*



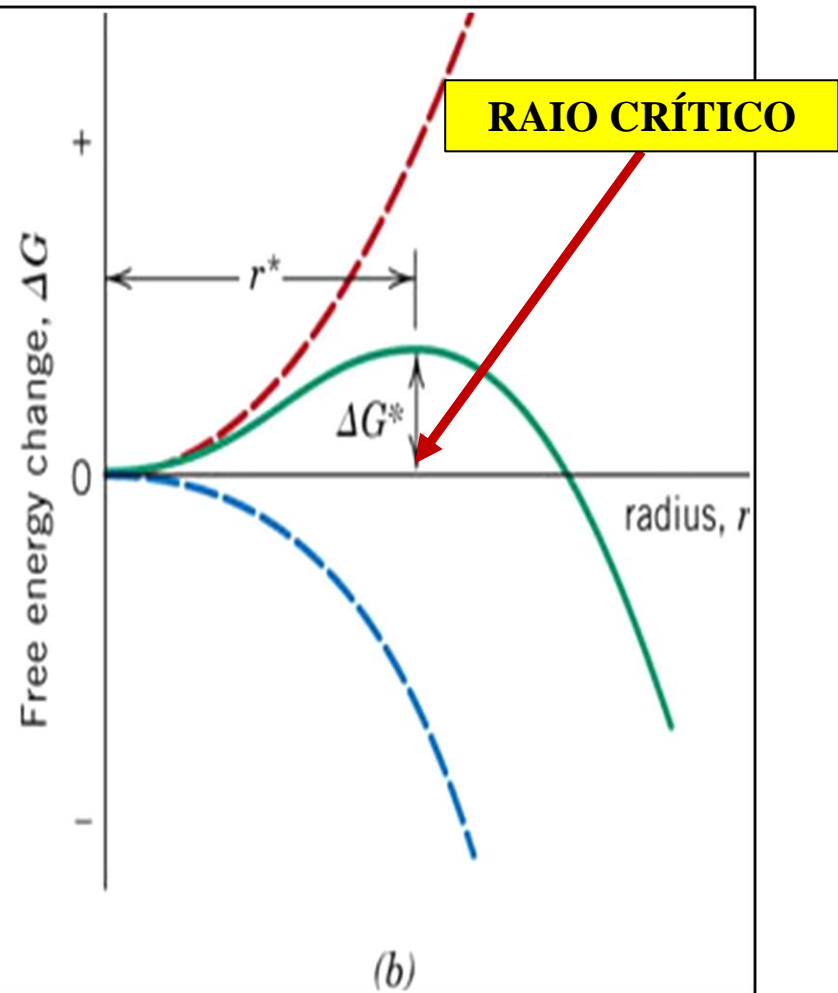
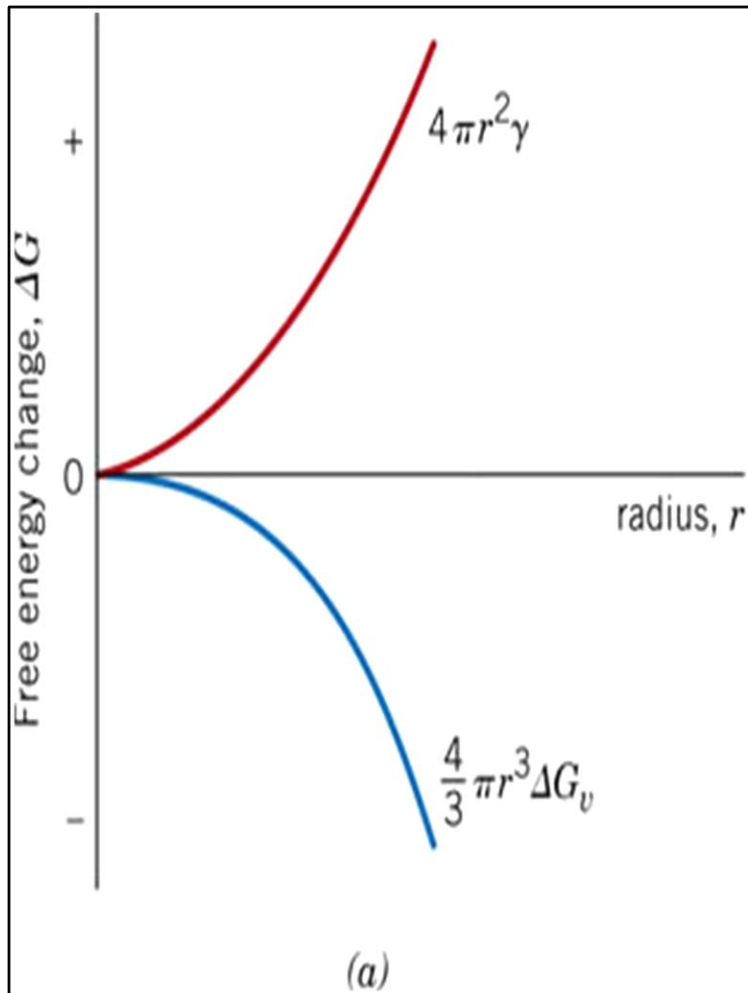
*Empilhamento de planos compactos formando uma estrutura HC.*

# Formação dos grãos cristalinos (Solidificação)

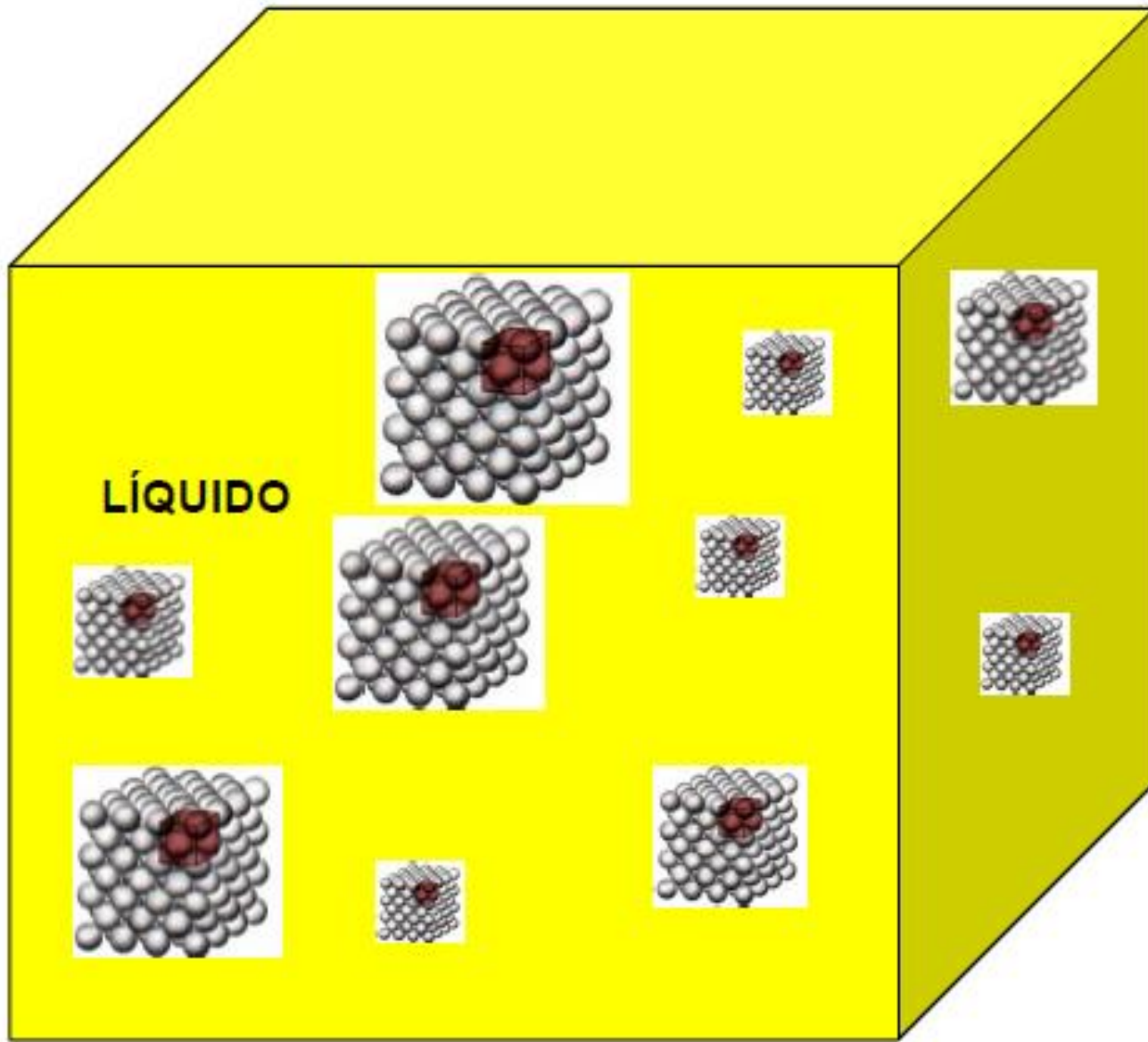
LÍQUIDO



EMBRIÕES DA  
FASE SÓLIDA



$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma$$



**LÍQUIDO**

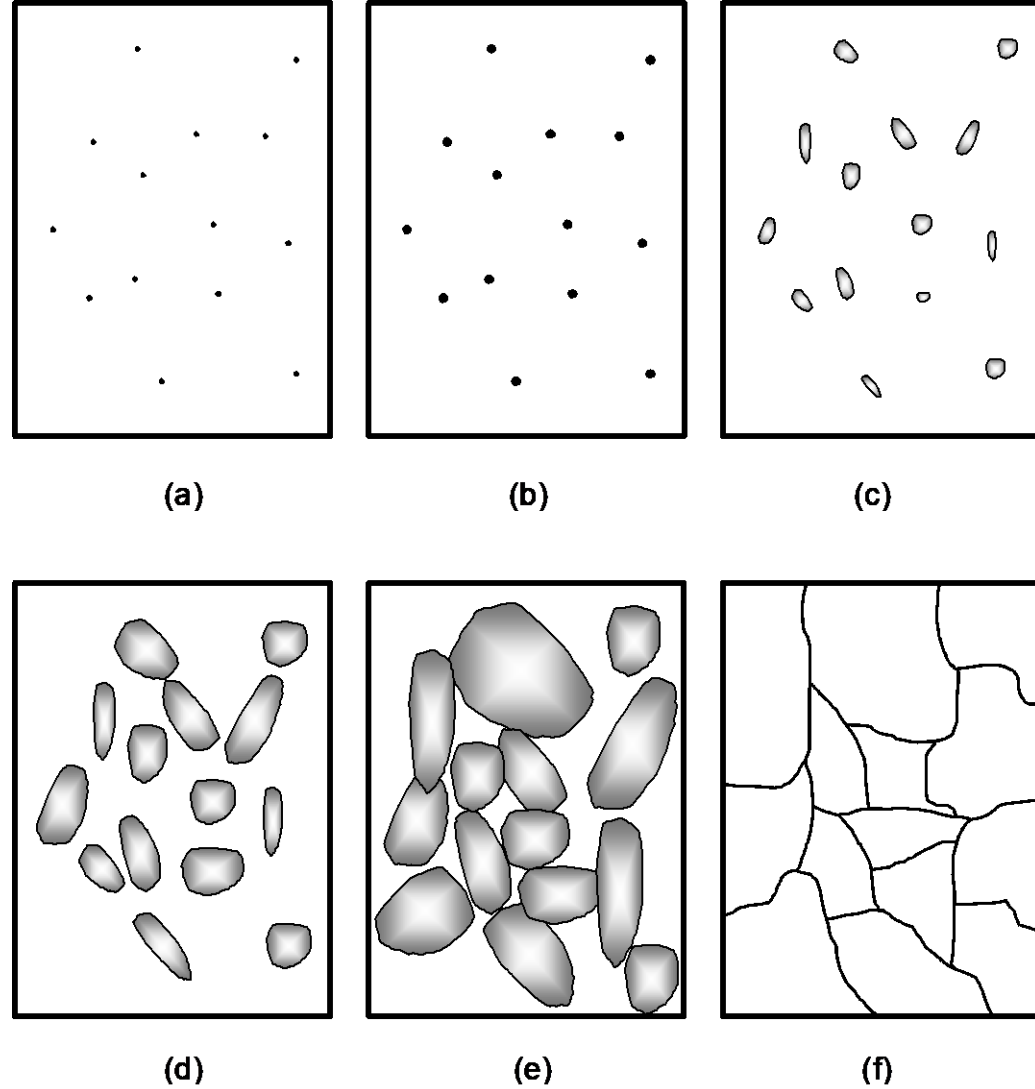


Figura 1) Formação de um material policristalino:

(a) Presença de embriões;

(b) Embriões transformam-se em núcleos;

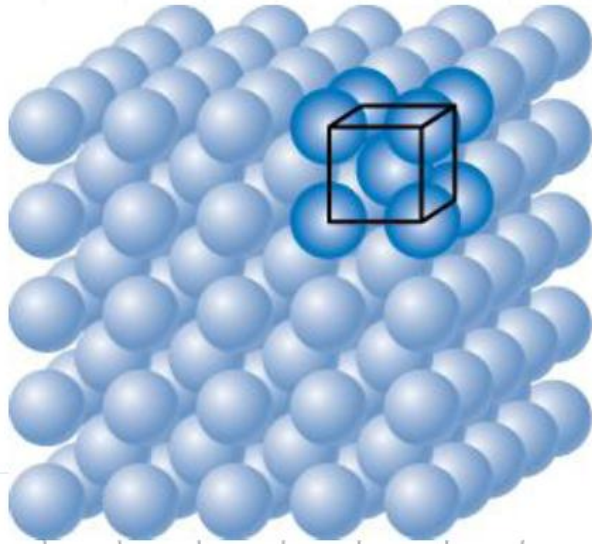
(c) Crescimento dos núcleos;

(d) Núcleos dão origem aos grãos cristalinos;

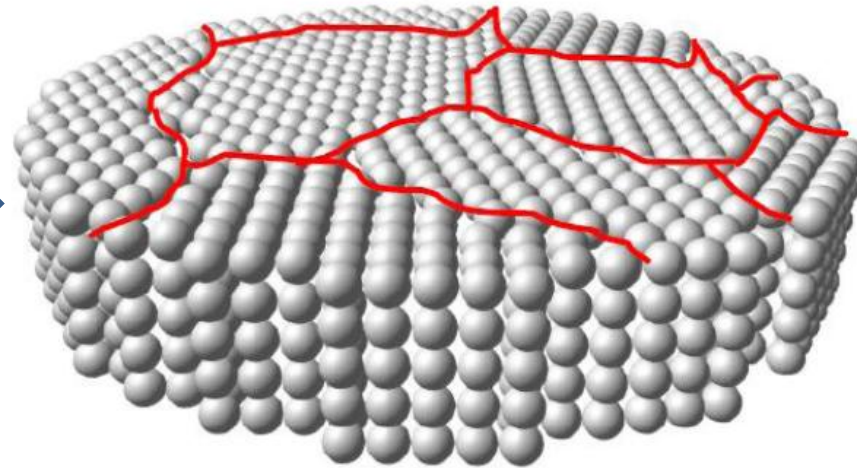
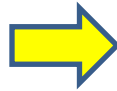
(e) Encontro dos grãos cristalinos com seus vizinhos e

(f) Contornos dos grãos cristalinos.

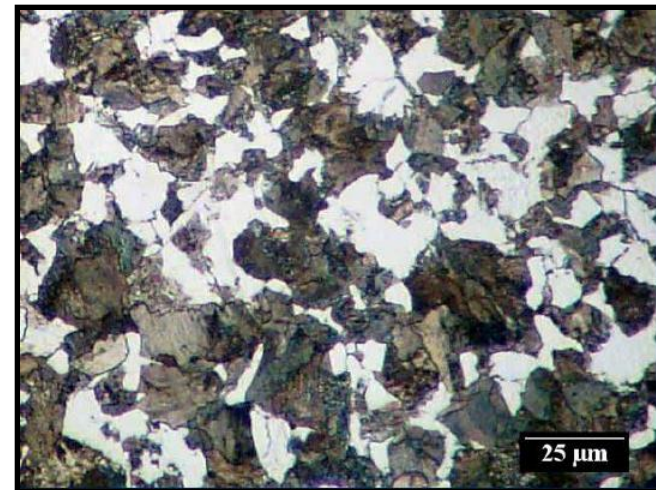
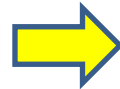
# FORMAÇÃO DOS GRÃOS- TG ESTÁ RELACIONADO ÀS PROPRIEDADES MECÂNICAS



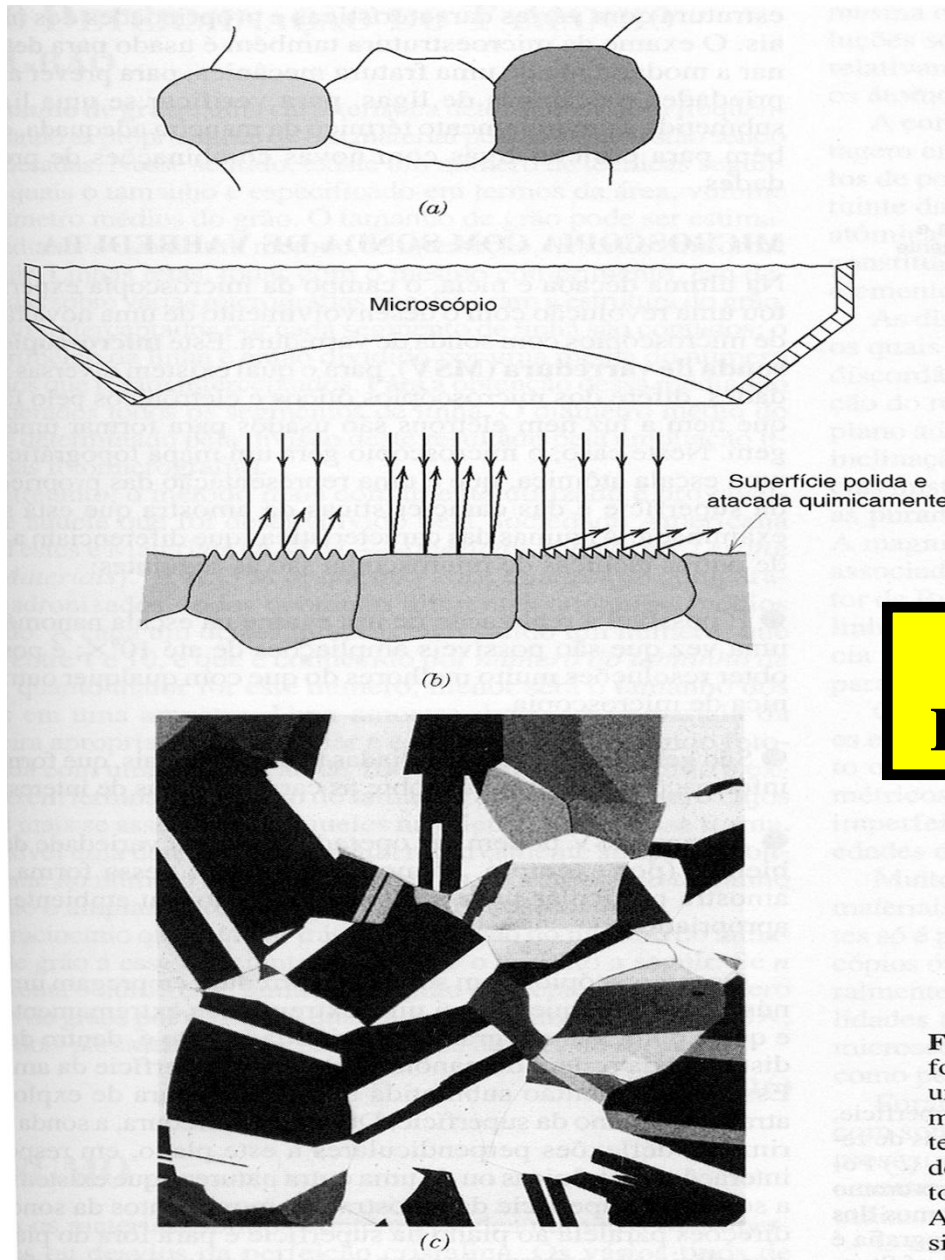
(Callister, cap.3)



(Apostila Prof.Dr. Rubens Caram)

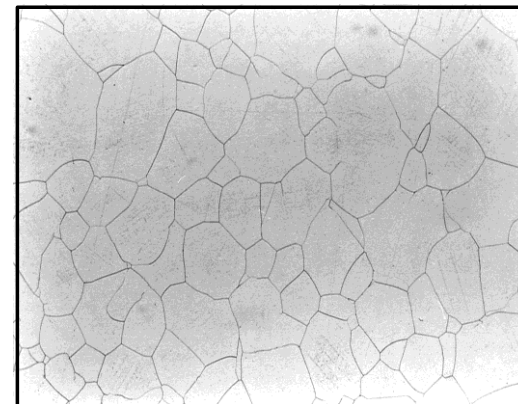
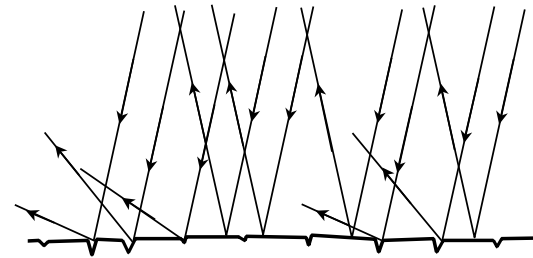
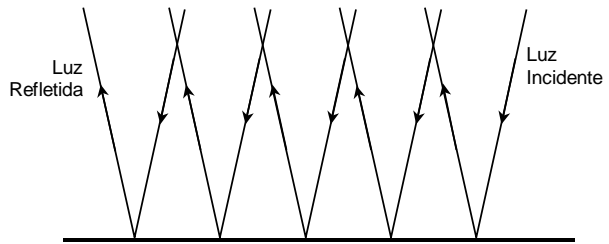
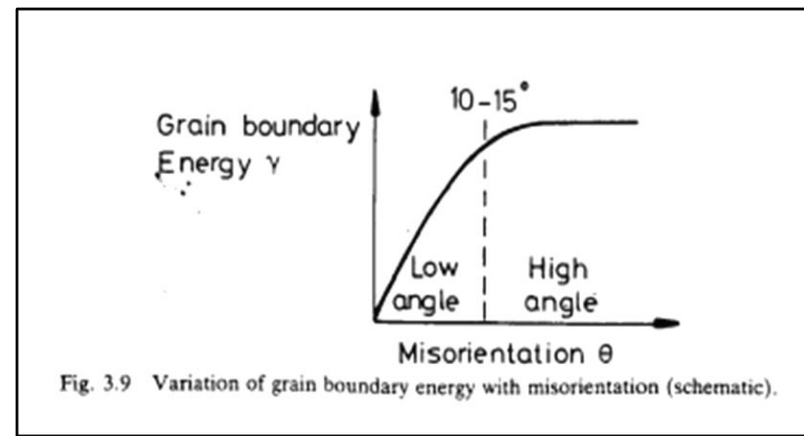
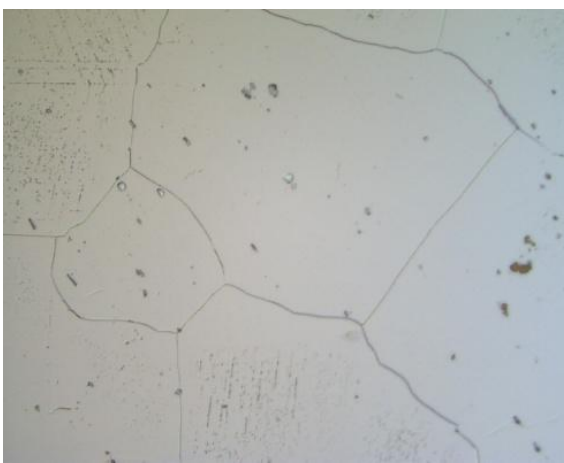
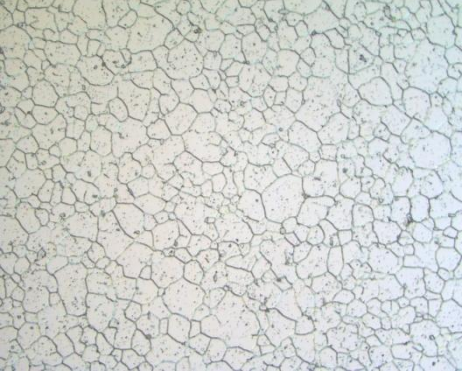


# PREPARAÇÃO METALGRÁFICA

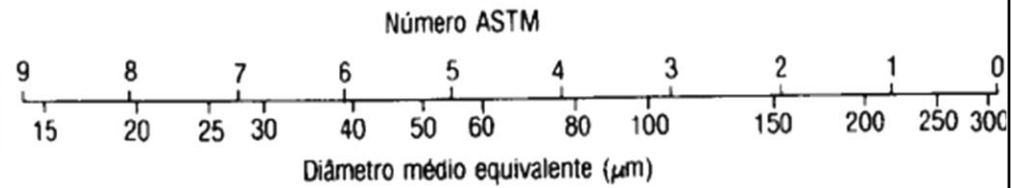
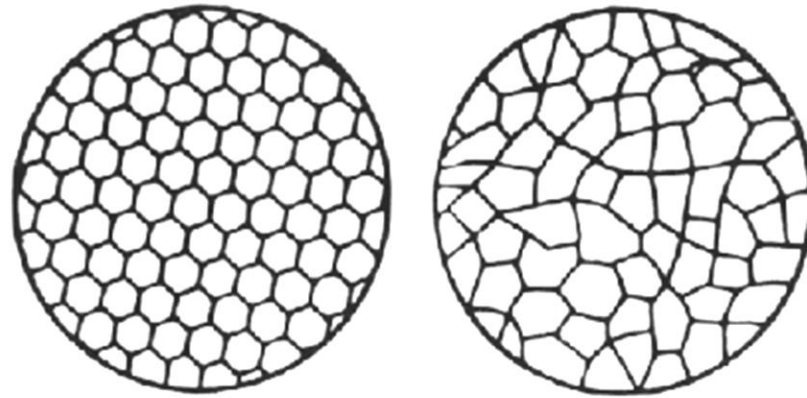
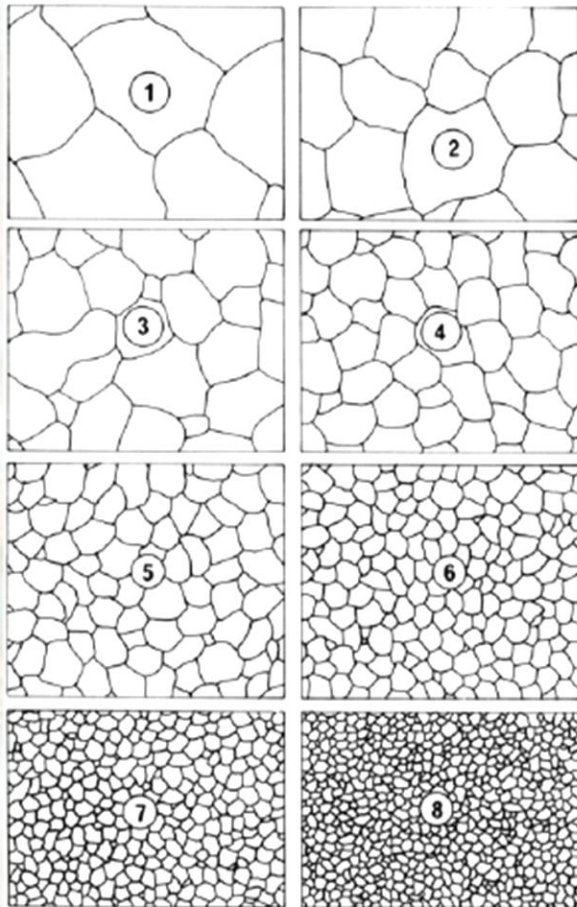


## LIXAMENTO, POLIMENTO, ATAQUE

**Fig. 4.11** (a) Grãos polidos e atacados quimicamente da forma como eles aparecem quando são vistos através de um microscópio ótico. (b) Seção feita através desses grãos mostrando como as características do ataque químico e a textura da superfície resultante variam de grão para grão devido a diferenças na orientação cristalográfica. (c) Fotomicrografia de uma amostra de latão policristalino. Ampliação de 60 $\times$ . (Esta fotomicrografia é uma cortesia de J. E. Burke, General Electric Co.)



# TAMANHO DE GRÃO ASTM




(ADAPTADO: PROF. CARAM -UNICAMP)



Designation: E112 – 96 (Reapproved 2004)<sup>ε2</sup>

## Standard Test Methods for Determining Average Grain Size<sup>1</sup>

 E112 – 96 (2004)<sup>ε2</sup>

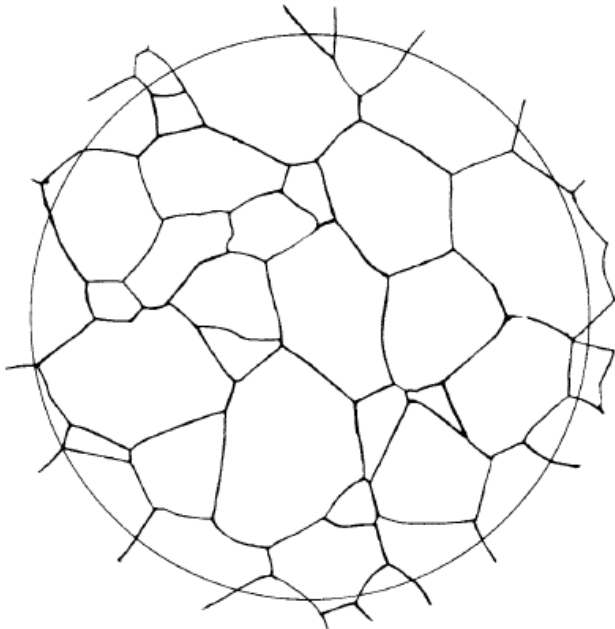


FIG. 1 Example of Untwinned Grains (Flat Etch) from Plate I.  
Grain Size No. 3 at 100X

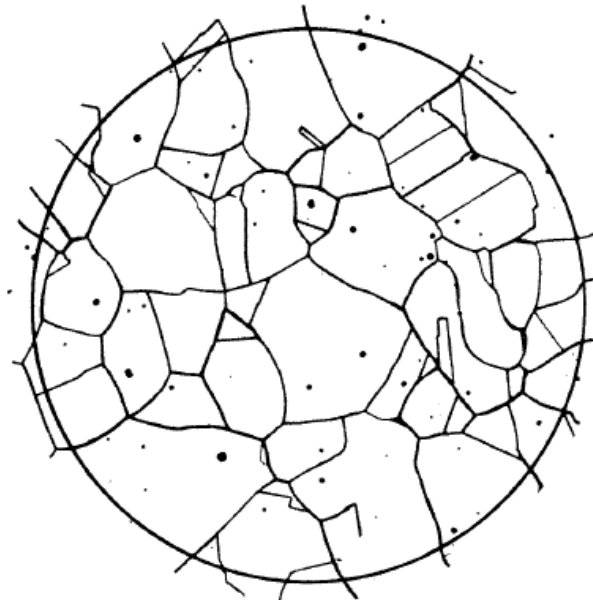
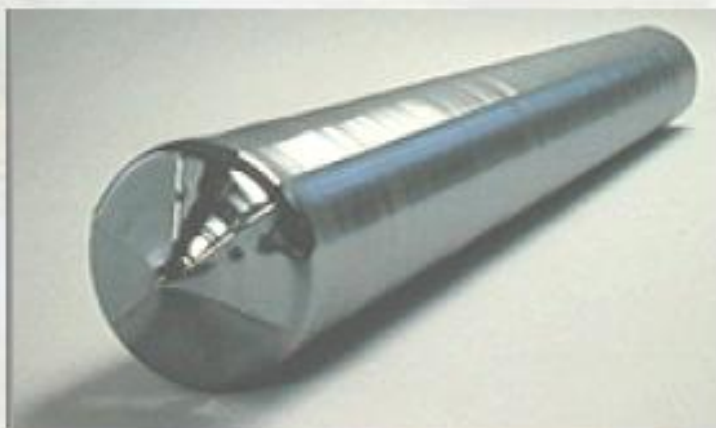
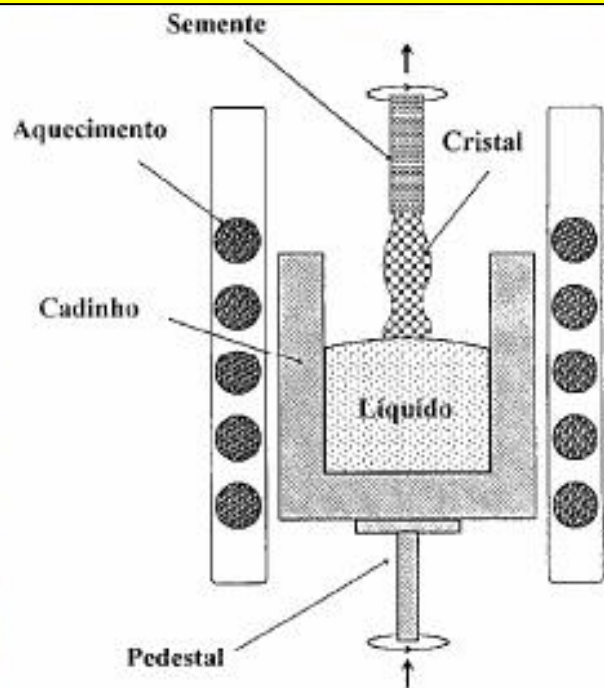
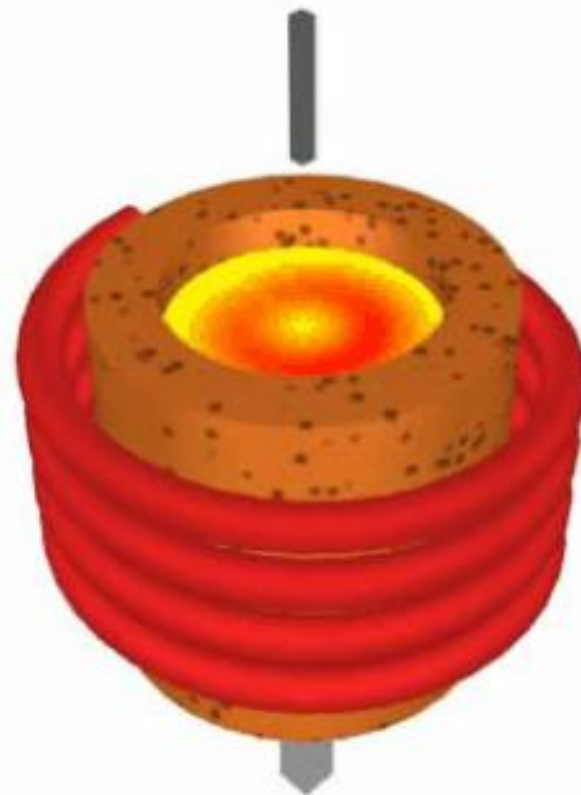


FIG. 2 Example of Twin Grains (Flat Etch) from Plate II. Grain  
Size No. 3 at 100X

# ALGUNS MATERIAIS NÃO SÃO POLICRISTALINOS: MONOCRISTAIS- PROCESSO CZOCHRALSKI

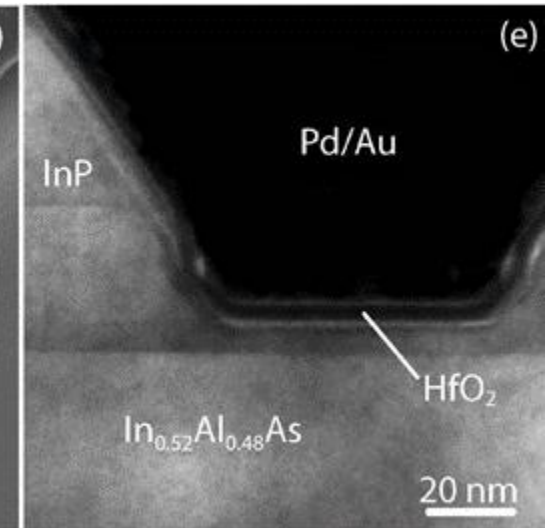
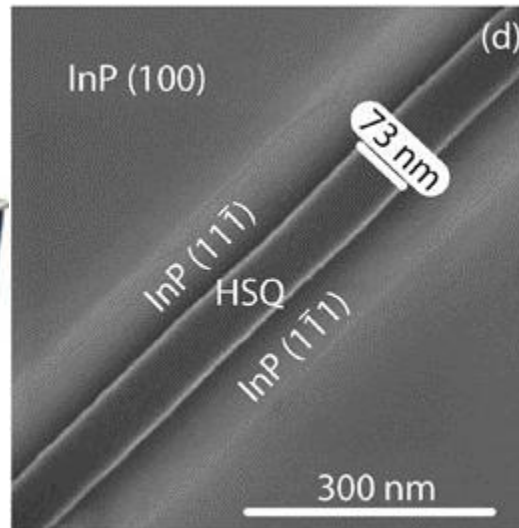
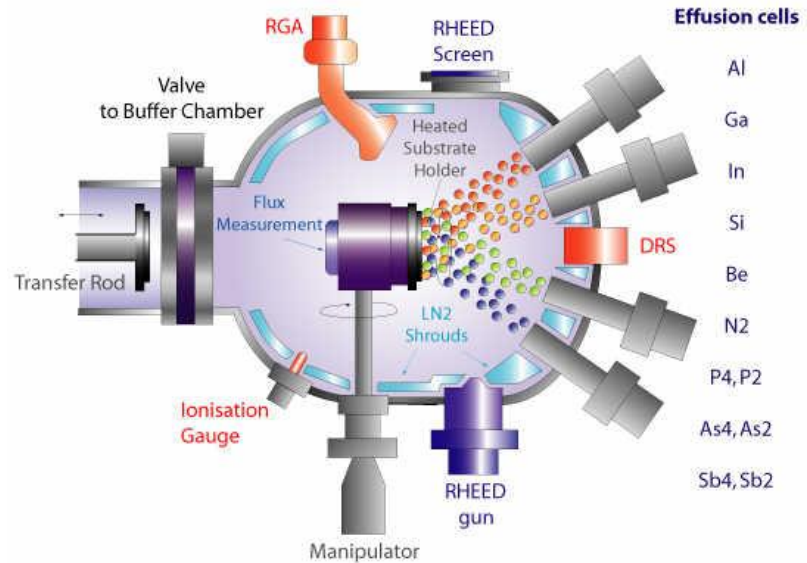
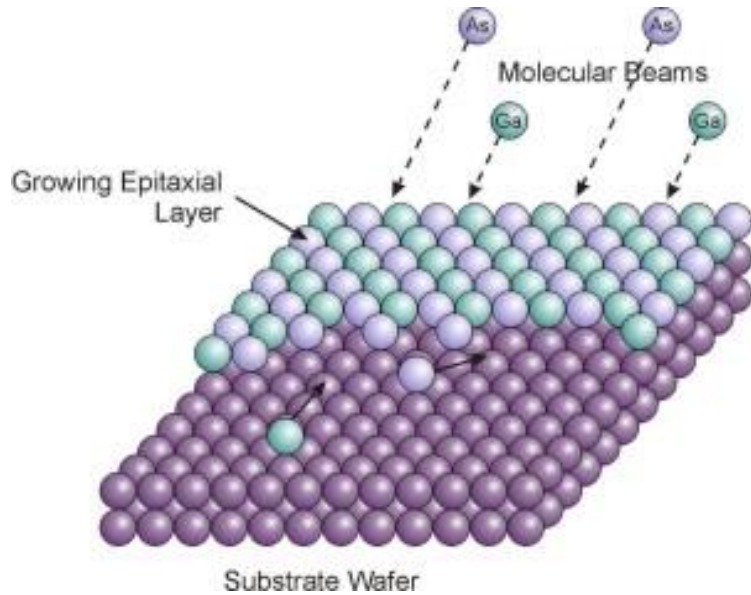


Si Mono-cristalino



PROPRIEDADES ELETRÔNICAS

# MONOCRISTAIS - MOLECULAR BEAM EPITAXY - MBE

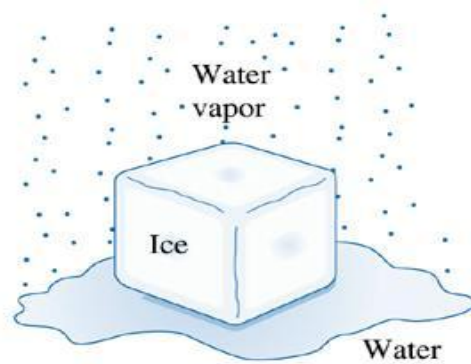


**PROPRIEDADES ELETRÔNICAS**



## FASE

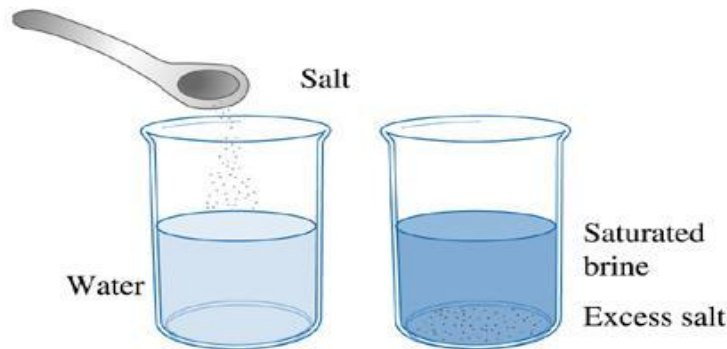
- **Fase** – Qualquer porção do material que é fisicamente **homogênea** e pode ser **mecanicamente separada** de qualquer outra.
- **Diagrama de fases** – Diagrama que **descreve a estabilidade termodinâmica das fases** sob diferentes condições de **pressão e temperatura**.



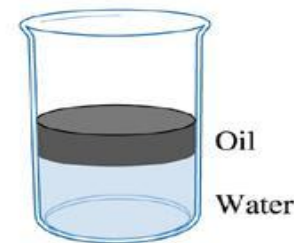
(a)



(b)



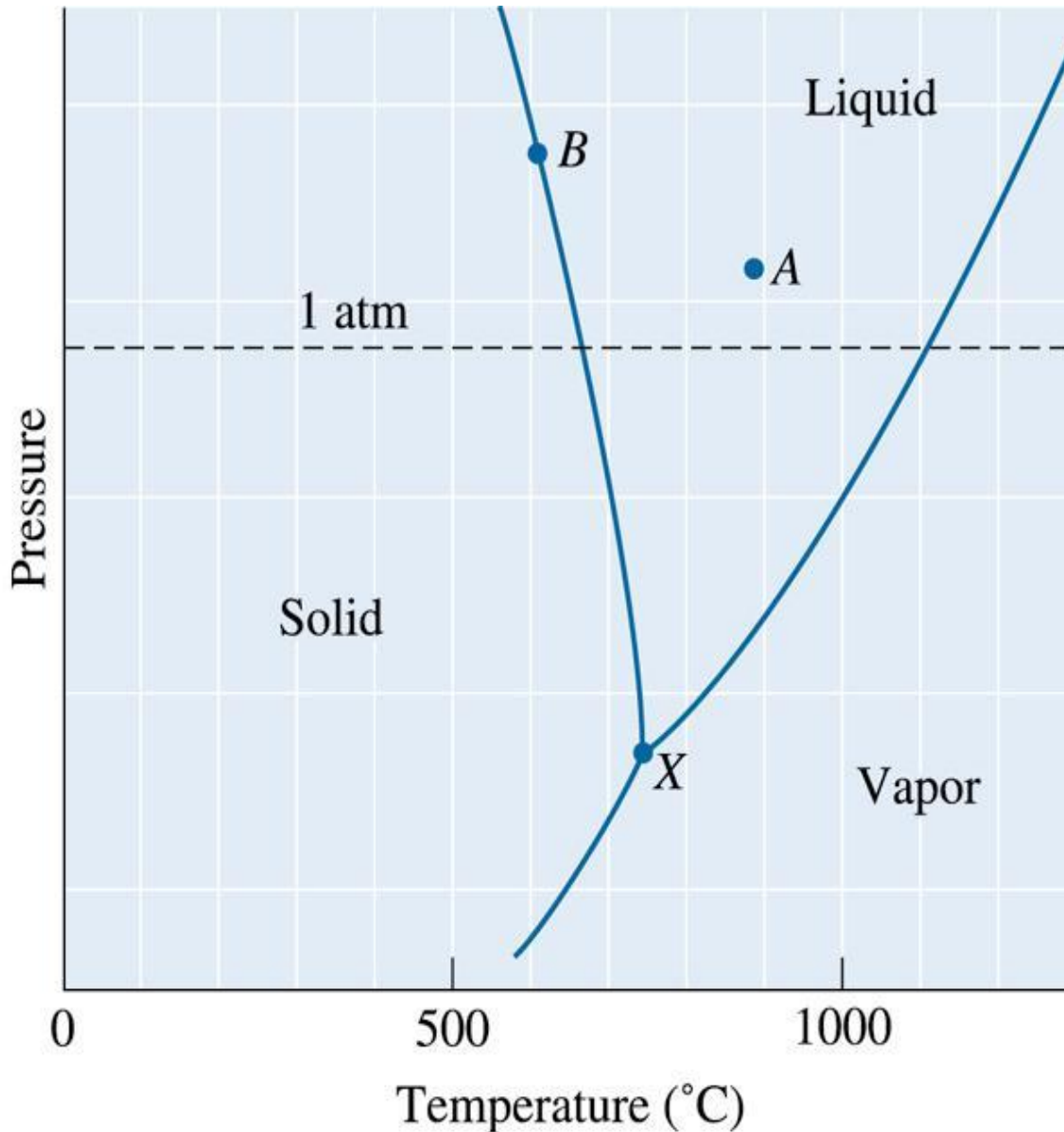
(c)



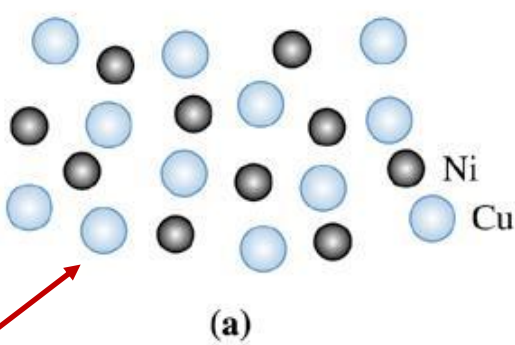
(d)

**Ilustração das fases e solubilidade: (a) as três formas da água – gás, líquido e sólido – cada uma é uma fase. (b) Água e álcool são completamente solúveis (Solub. ilimitada). (c) Sal e água tem solubilidade limitada. (d) Óleo e água tem virtualmente nenhuma solubilidade.**

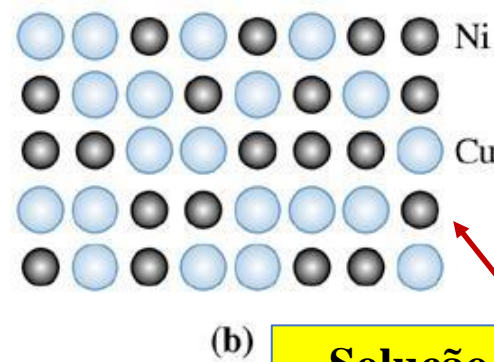
# Sistema de um componente: Mg



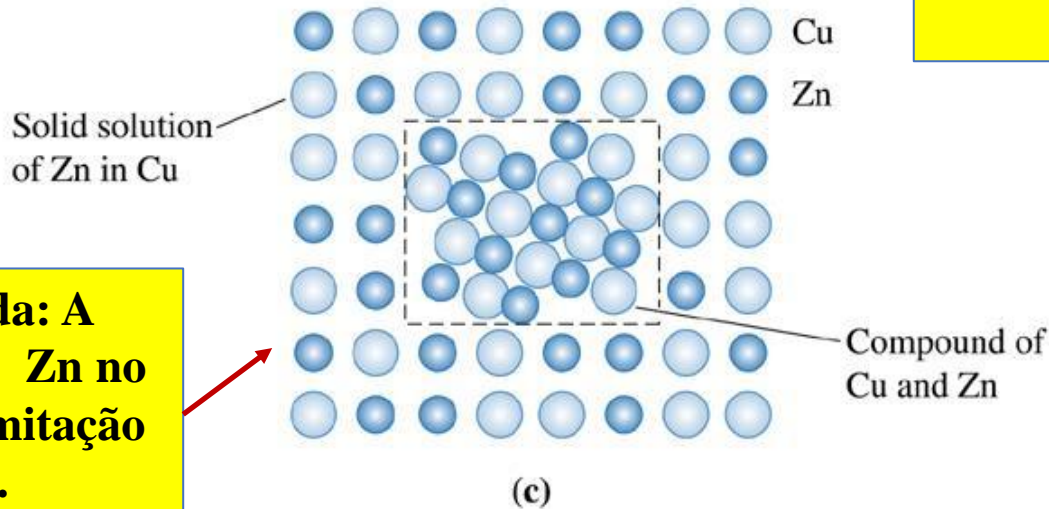
**Diagrama de fases para o magnésio, mostrando as temperaturas de fusão e vaporização na pressão de 1 atm.**



Solução líquida



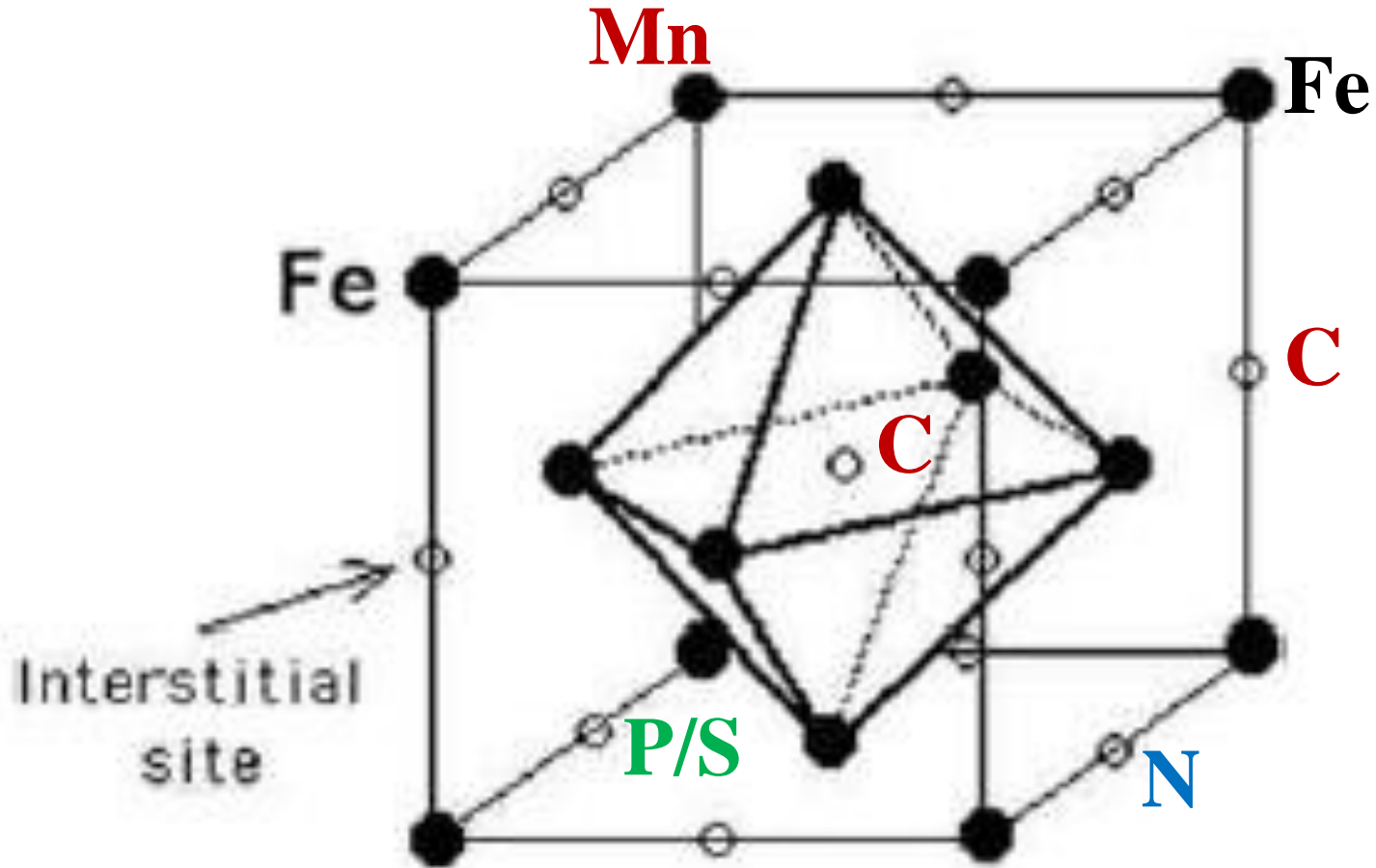
Solução sólida: Cu é completamente solúvel no Ni



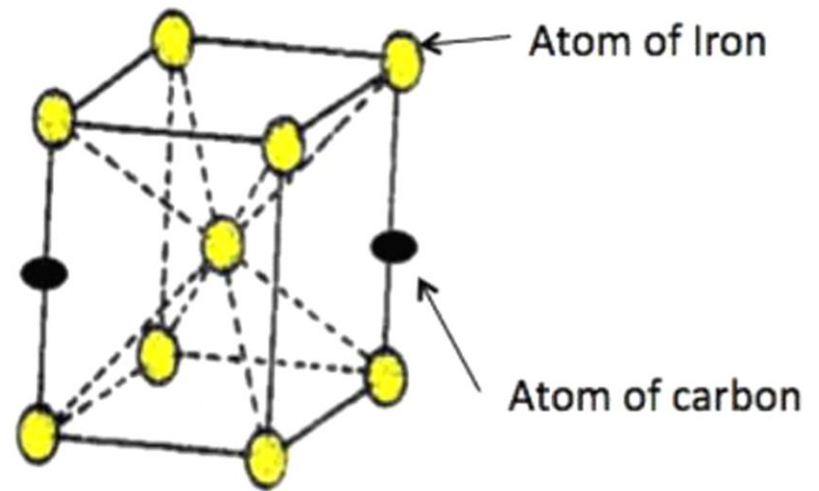
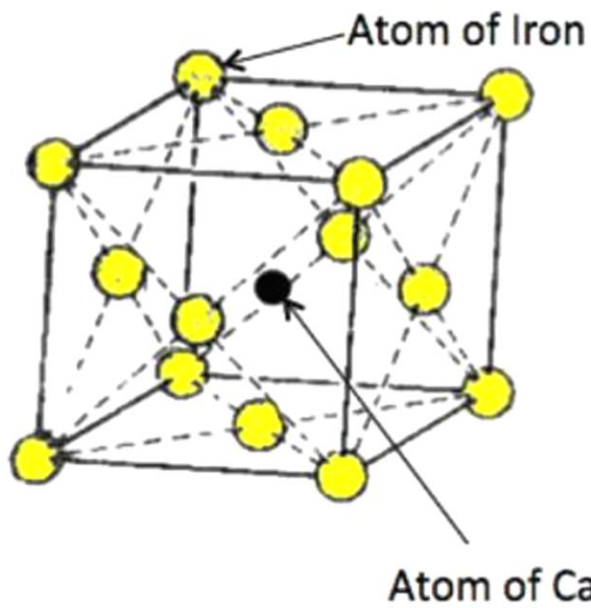
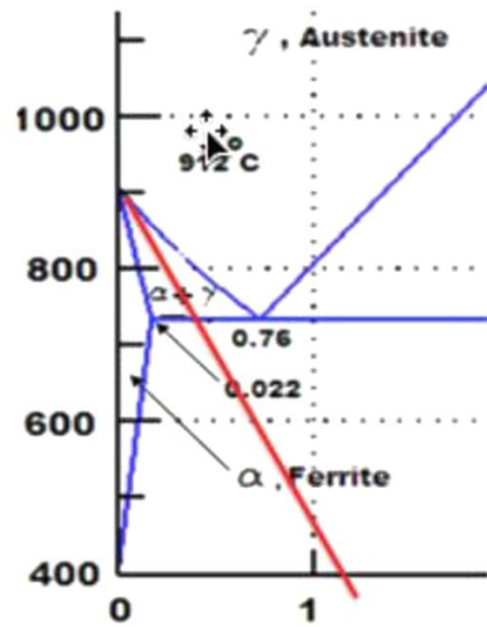
Solução sólida: A solubilidade do Zn no Cu tem uma limitação em 30%.

(a) Cu e Ni líquidos são **completamente solúveis** um no outro. (b) Ligas de Cu e Ni sólidas apresentam **solubilidade completa** com os átomos de Ni ocupando ao acaso os lugares no retículo. (c) Nas ligas de Cu – Zn contendo mais do que 30% Zn, uma segunda fase é formada por causa da **solubilidade limitada do Zn no Cu**.

# O QUE É AÇO?



**Fe~ 80/90%p, C: 0,008-2,00%p, Mn: 0,30-0,90%p, Pmáx: 0,05%p e Smáx: 0,05%p**



# **FABRICAÇÃO DO AÇO E SUA CLASSIFICAÇÃO**

**Produção mundial de aço em 2023**  
**1,89 bilhão de tons**

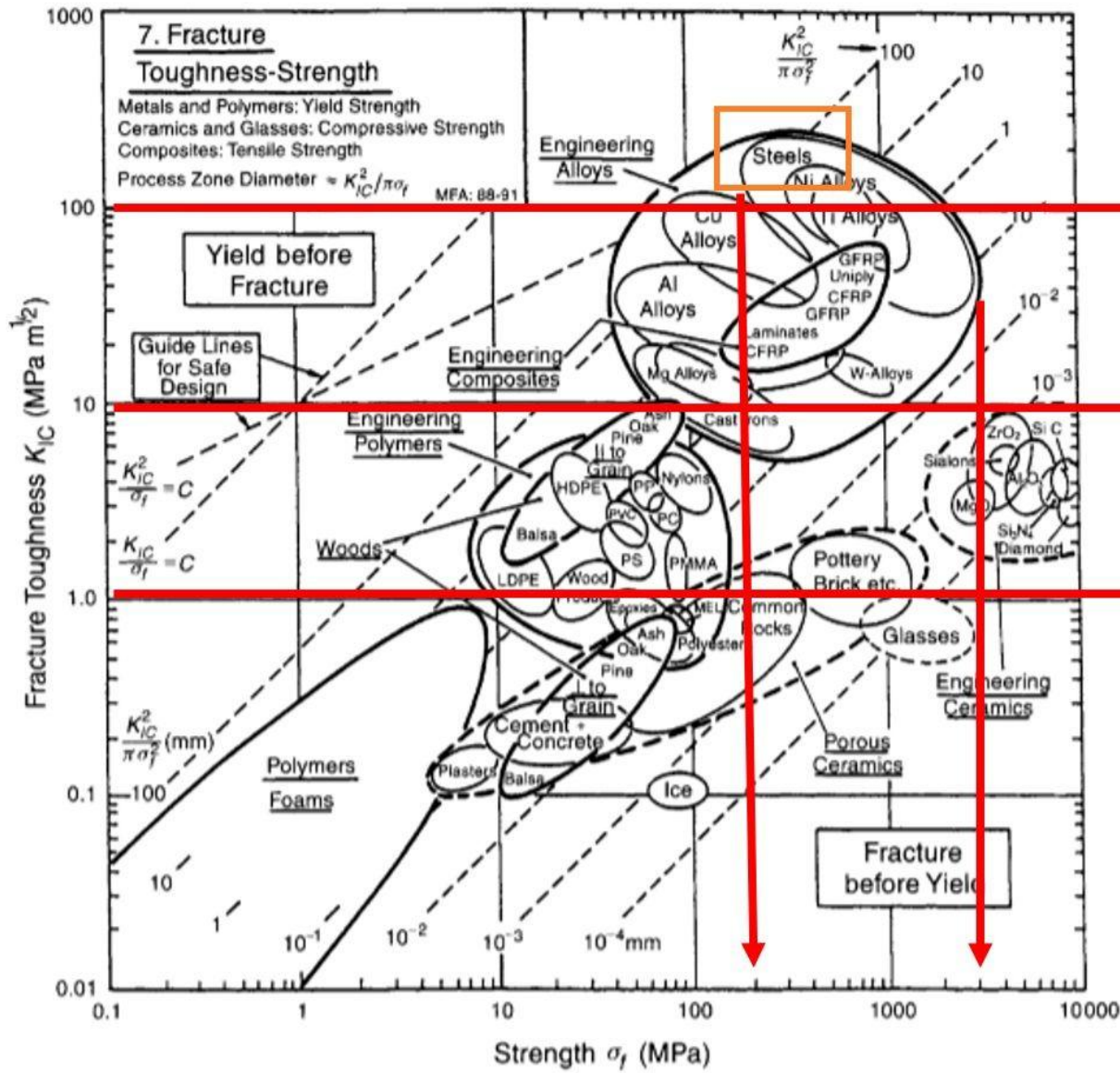
**Produção mundial de aço em 2024**  
**1,84 bilhão de tons**

### **Curiosidades**

- **1 pneu caminhão** fora de estrada (lavras de minério): **1 ton de aço** (*Tire Cord Steel*);
- **70% a 90%** escória da fabricação de aço é reaproveitada: cimentos, correção de solo (agricultura-minerais), isolantes (lãs).



<https://www.hunterseguros.com.br/caminhao-fora-de-estrada-para-mineracao-veja-os-5-maiores/>



METAIS

NÃO METAIS

# SIDERURGIA

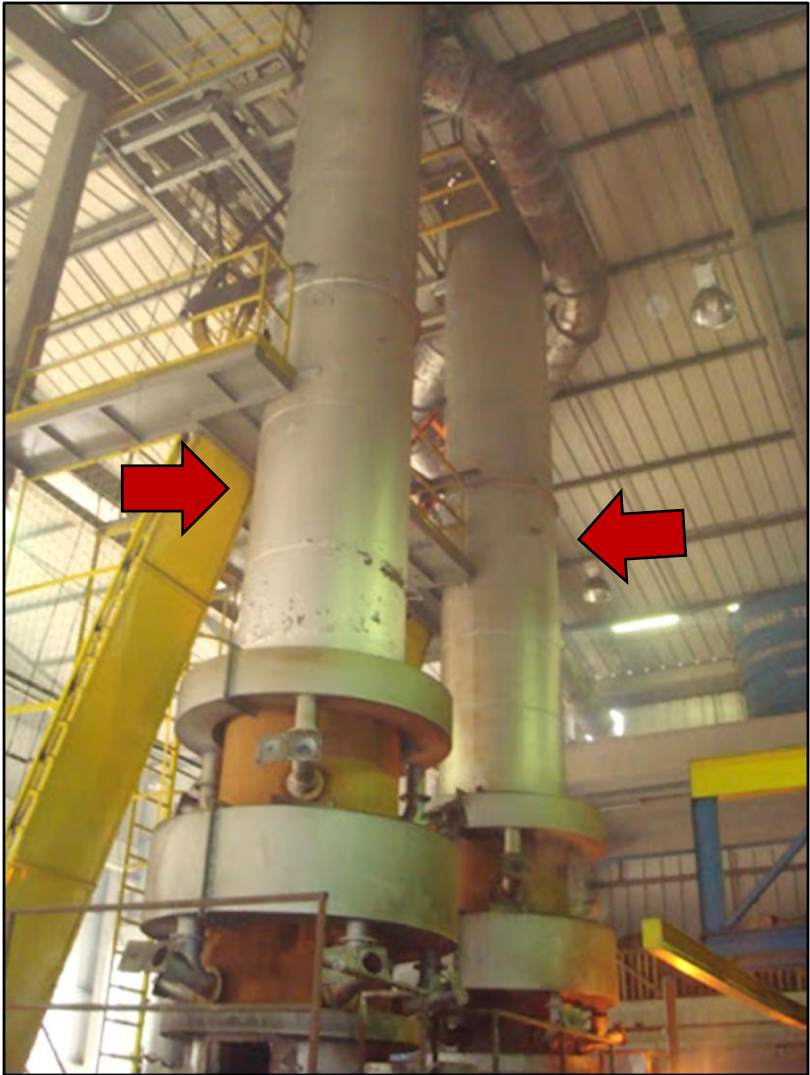
**Processos de extração e refino aplicados aos metais ferrosos.**

- **1ª Etapa: extração do Fe** a partir da **redução** do minério de Fe, em **Alto Forno** (*Blast Furnace*). Produto: **Ferro Gusa** (*Pig Iron*), com 90% Fe;
- **2ª Etapa: Refino:** Obtenção do **aço** em conversores: Bessemer ou **LD** (Nos EUA e alguns países da Europa: *BOF- Basic Oxygen Furnace*) ou de **Ferros Fundidos FoFo** (*Cast Iron*) em fornos **Cubilô**.
- **Produtos:** **Aços** (ligas de Fe-C, com ~2,0%C) ou **FoFo**, com  $C > 2,0\%C$ .



XXXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO "Os desafios da engenharia de produção para uma gestão inovadora da Logística e Operações" Santos, São Paulo, Brasil, 15 a 18 de outubro de 2019.

**FORNO CUBILÔ (CUBILOT)**





**FORNO CUBILÔ (CUBILOT) – POLI-USP**

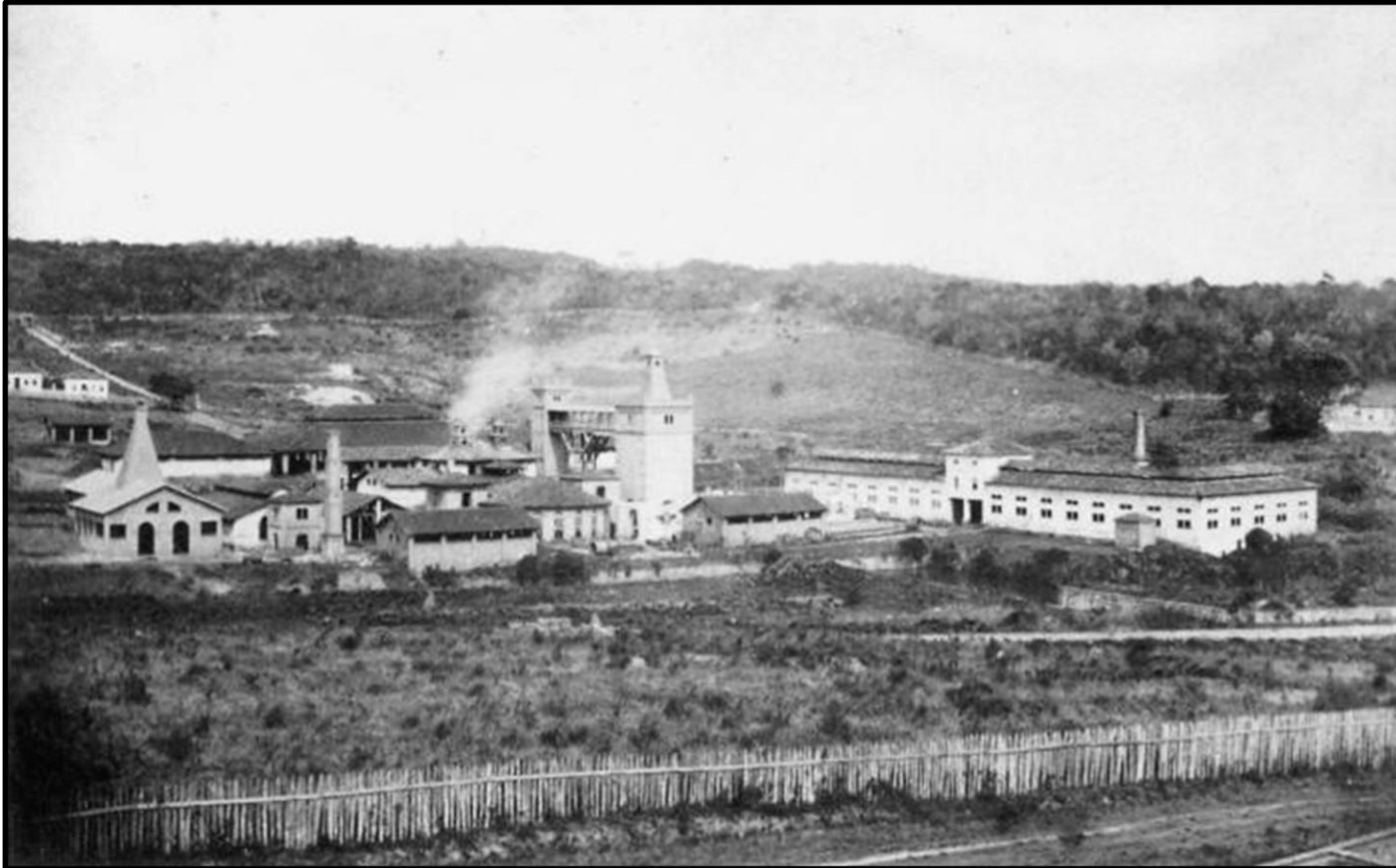


O forno usado na primeira fundição didática do Brasil (ao lado) e a placa feita há 122 anos (acima), hoje expostos na Poli: intuição de Paula Souza

Em **1903**, sob a chefia de um mestre suíço, os alunos trabalhavam no laboratório dotado de um forno cubilô para a produção de **350 quilos por hora de ferro fundido**.

# O AÇO NO BRASIL

*([www.cidadeipero.com.br](http://www.cidadeipero.com.br))*



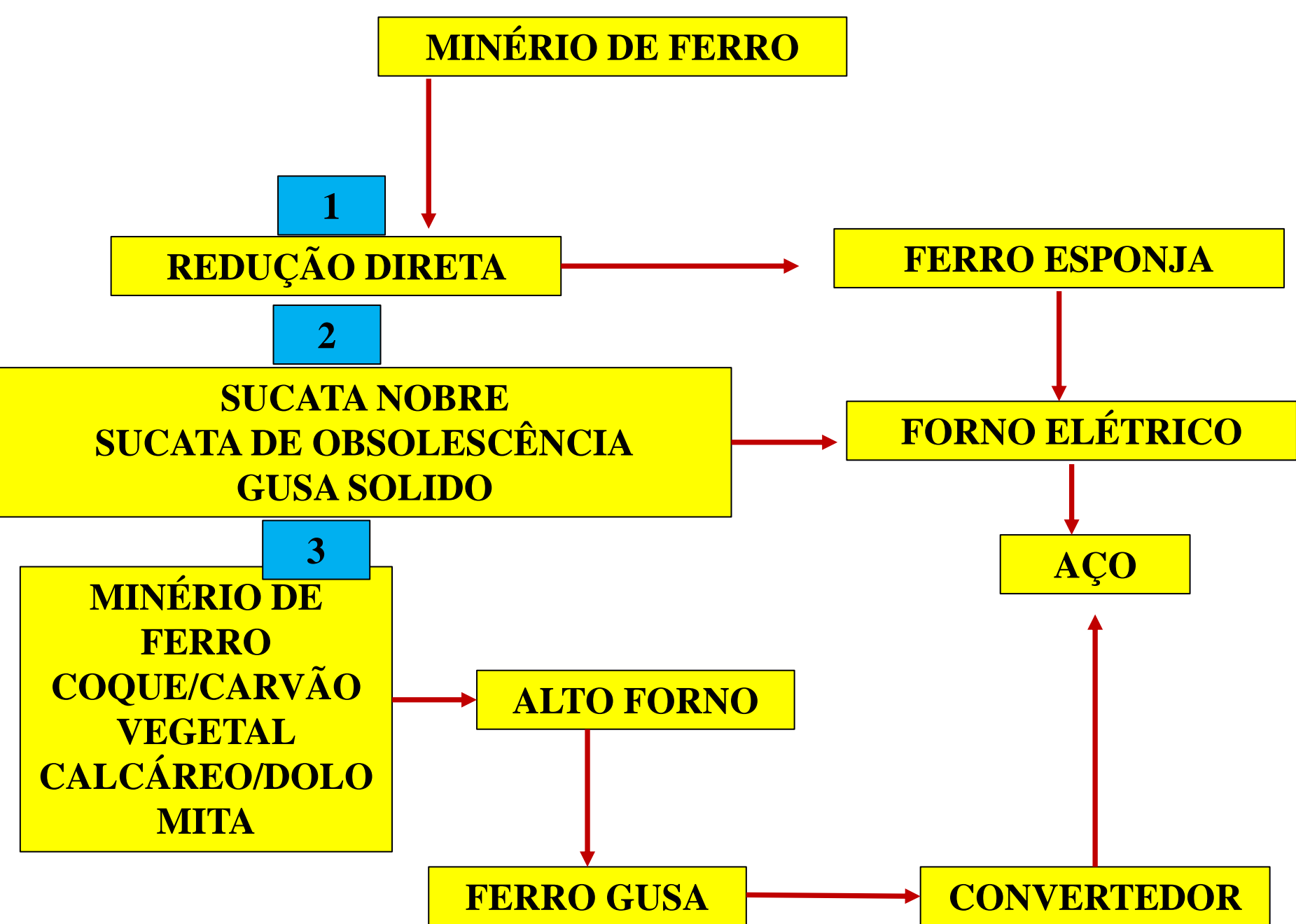
**Real fábrica de ferro Ipanema – Sorocaba-1888**

# Real Fábrica de Ferro Ipanema-atualmente



# PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO





# ALTO-FORNO

# COQUE



# HEMATITA $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$



# MAGNETITA ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

# WUSTITA ( $\text{FeO}$ )



# COQUERIA

**COQUEIFICAÇÃO** : aquecimento do carvão mineral na ausência da ar.

- **Detalhes do processo**



Típica Bateria de coqueificação



Coque incandescente pronto para ser descarregado

# ALTO-FORNO

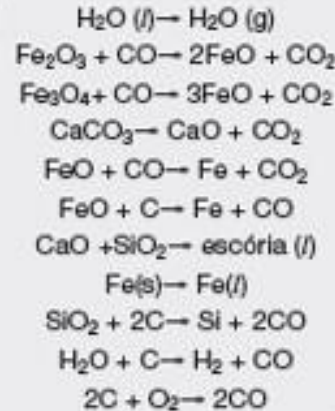


# ALTO-FORNO

Carga:  
Minério de ferro  
Coque ou carvão vegetal  
Escorificantes

Gás do alto-forno  
4,04 mol N<sub>2</sub>  
1,31 mol CO<sub>2</sub>  
1,31 mol CO  
0,24 mol H<sub>2</sub>O  
0,04 mol H<sub>2</sub>

Contendo:  
0,5 mol Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
0,1 mol CaCO<sub>3</sub>  
0,12 mol SiO<sub>2</sub>  
2,71 mol C  
0,2 mol H<sub>2</sub>O



Sopro  
0,08 mol H<sub>2</sub>O  
1,075 mol O<sub>2</sub>  
4,044 mol N<sub>2</sub>

**Ex: CIMENTO**

**HIDROGÊNIO?**

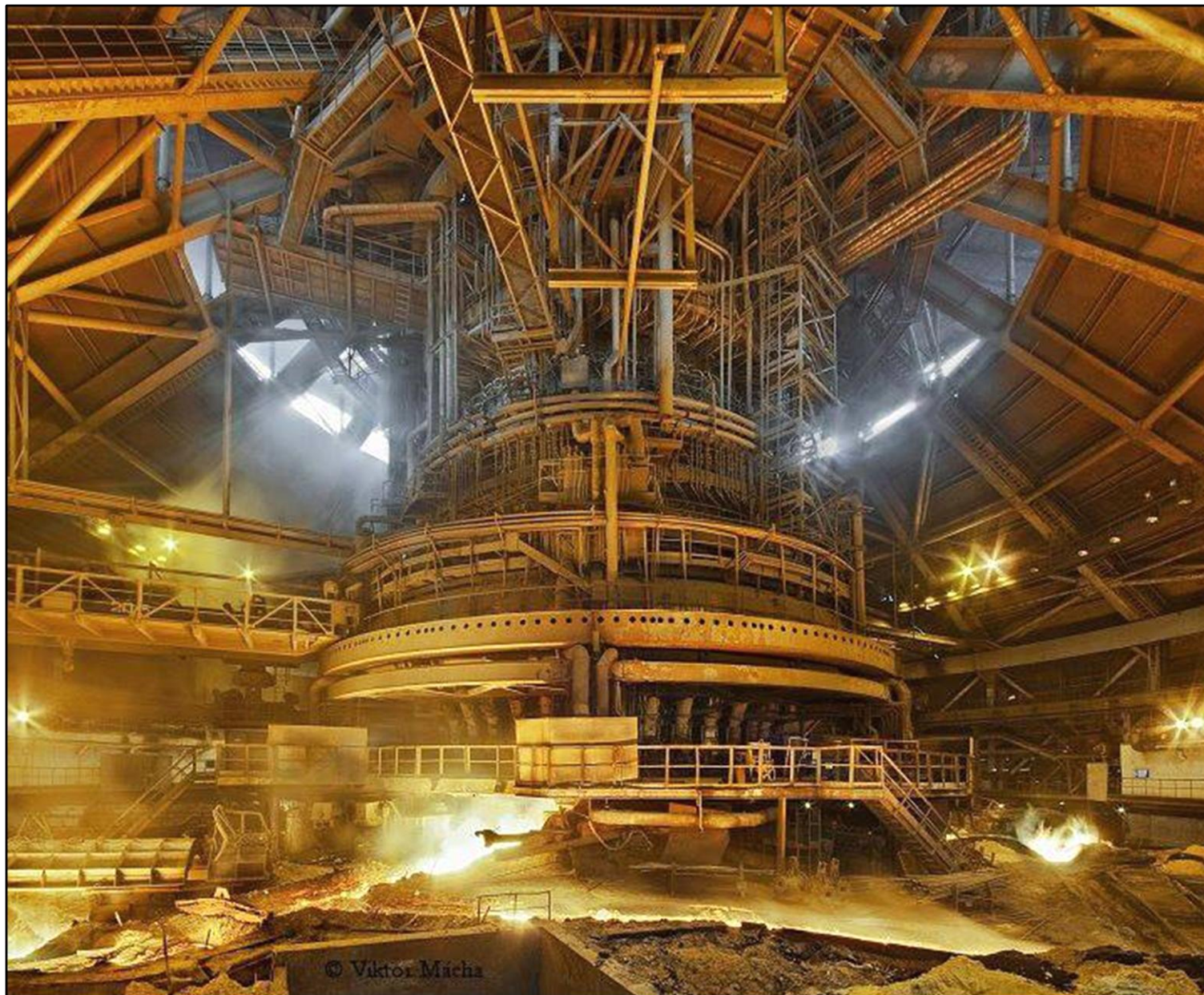
**ESCÓRIA**

Escória  
0,1 mol CaO  
0,1 mol SiO<sub>2</sub>

**FERRO GUSA**

Ferro-gusa  
1 mol Fe  
0,02 mol Si  
0,19 mol C

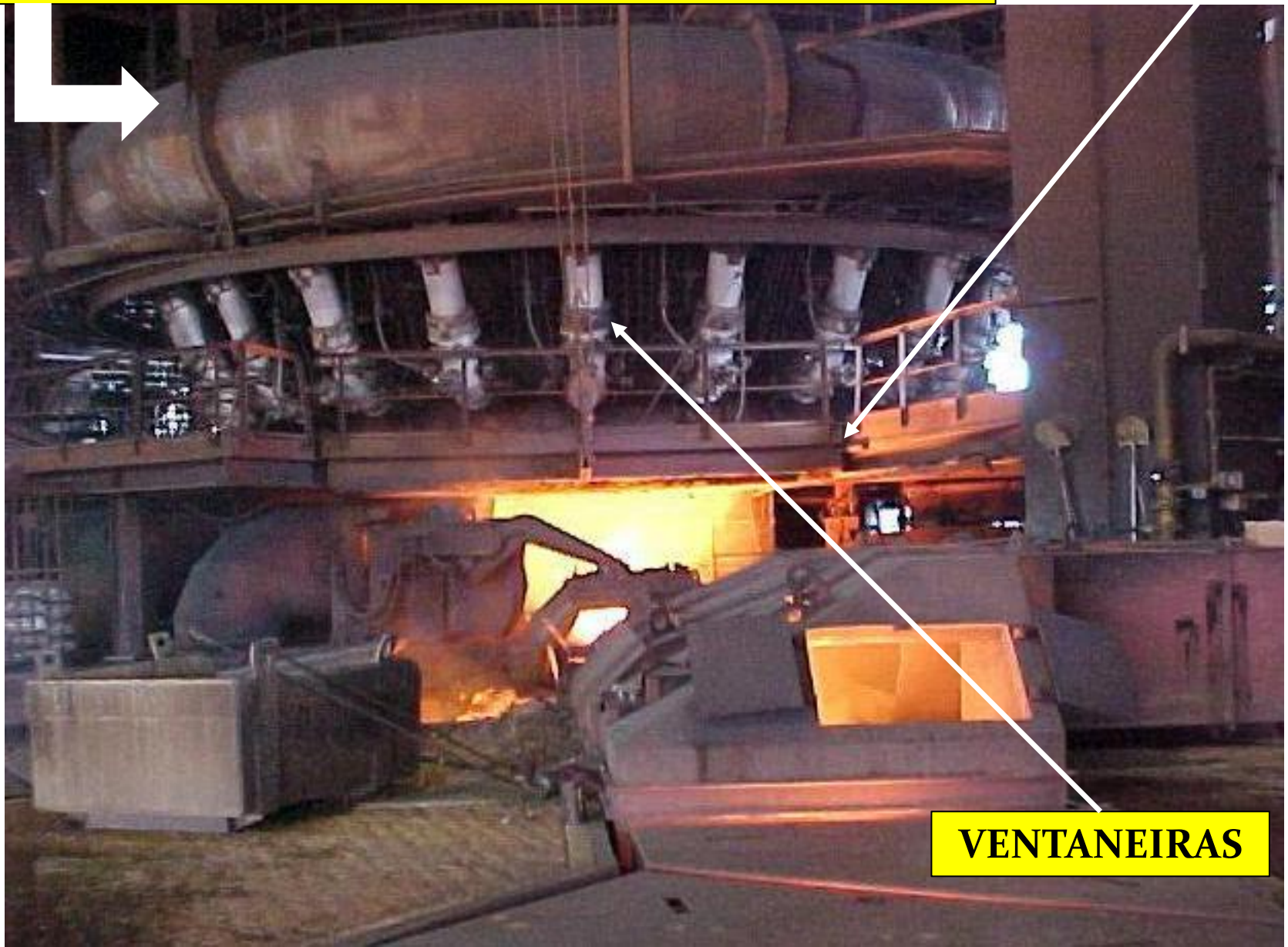
# SOLEIRA DO ALTO-FORNO



# SOLEIRA DO ALTO-FORNO

ANEL DE VENTO – AR ORIUNDO DOS REGENERADORES

CASA DE CORRIDAS



VENTANEIRAS

## **COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FERRO GUSA:**

**CARBONO: 3,5 - 4,5%**

**SILÍCIO: 0,3 - 2,0%**

**ENXÔFRE: 0,01 - 0,1%**

**FÓSFORO: 0,05 - 2 %**

**MANGANÊS: 0,5 - 2%**



**SAÍDA DO  
FERRO GUSA  
DO ALTO  
FORNO PARA O  
CARRO  
TORPEDO.**

# CARRO TORPEDO.



**1ª dessulfuração por lança:  $\text{CaCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ , antes de chegar ao LD/BOF: dessulfuração por escória.**

# DESCARREGAMENTO DO GUSA PARA OS CONVERSORES



**CONVERSOR LD/BOF\***

**\*LD (EUROPA)**

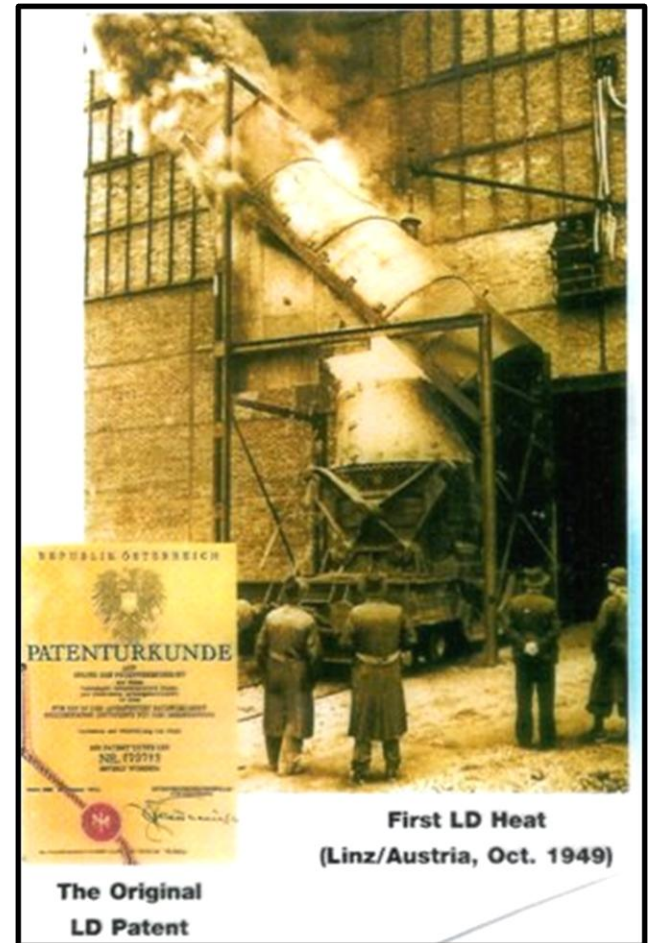
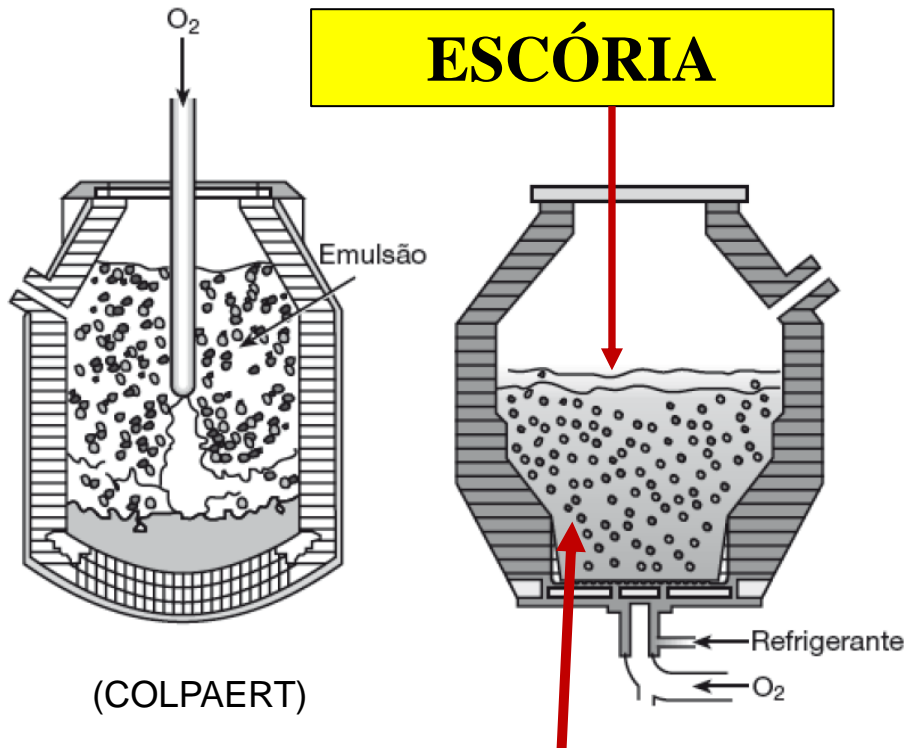
**BOF (Basic Oxygen Furnace-EUA)**

# CONVERSÃO DO GUSA EM AÇO

## CONVERSOR LD/BOF\*

L : LINZ NA ÁUSTRIA (VOEST ALPINE) – 1952.

D: DONAWITZ NA ÁUSTRIA – 1953.



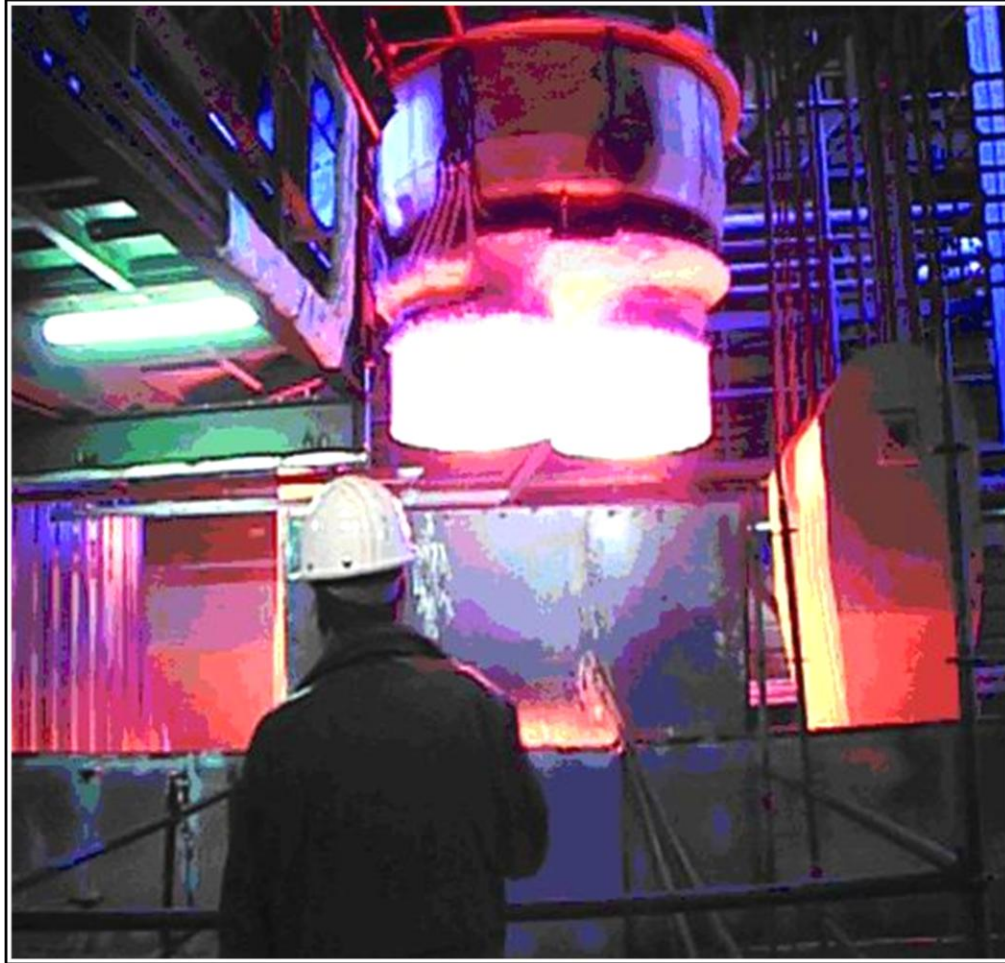
# ACIARIA ELÉTRICA



# FORNO - PANELA



# DESGASEIFICAÇÃO



Principal objetivo é eliminar os gases dissolvidos no aço líquido, especialmente o **hidrogênio**



([www.manutencaoesuprimentos.com.br](http://www.manutencaoesuprimentos.com.br))

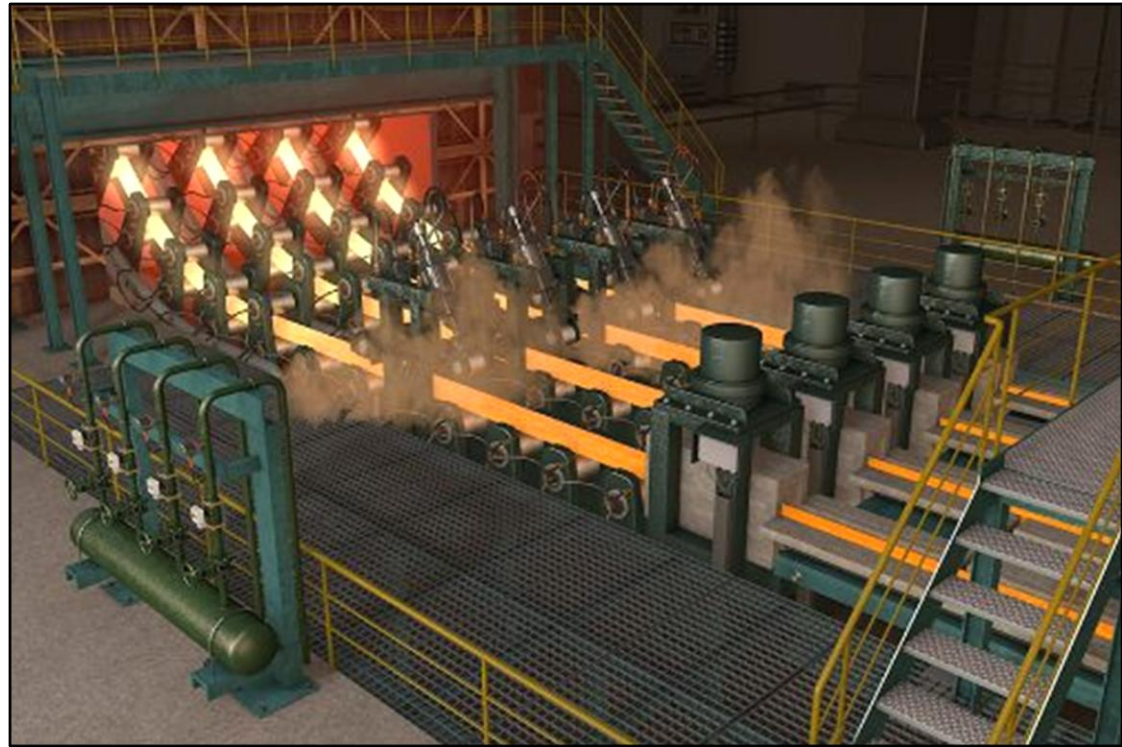
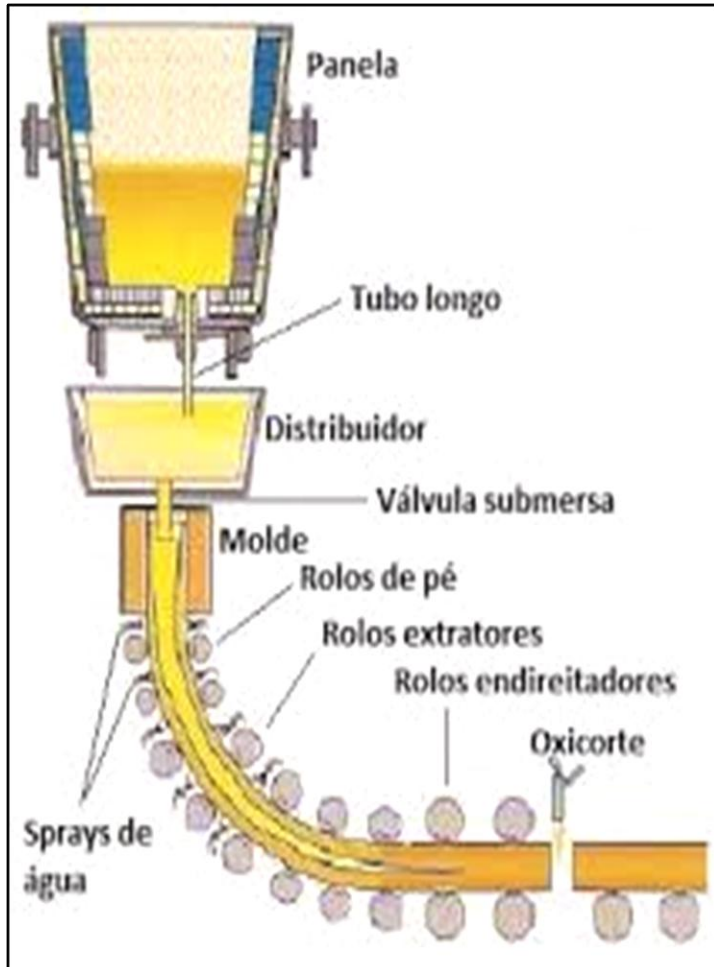
# SOLIDIFICAÇÃO POR LINGOTAMENTO CONVENCIONAL



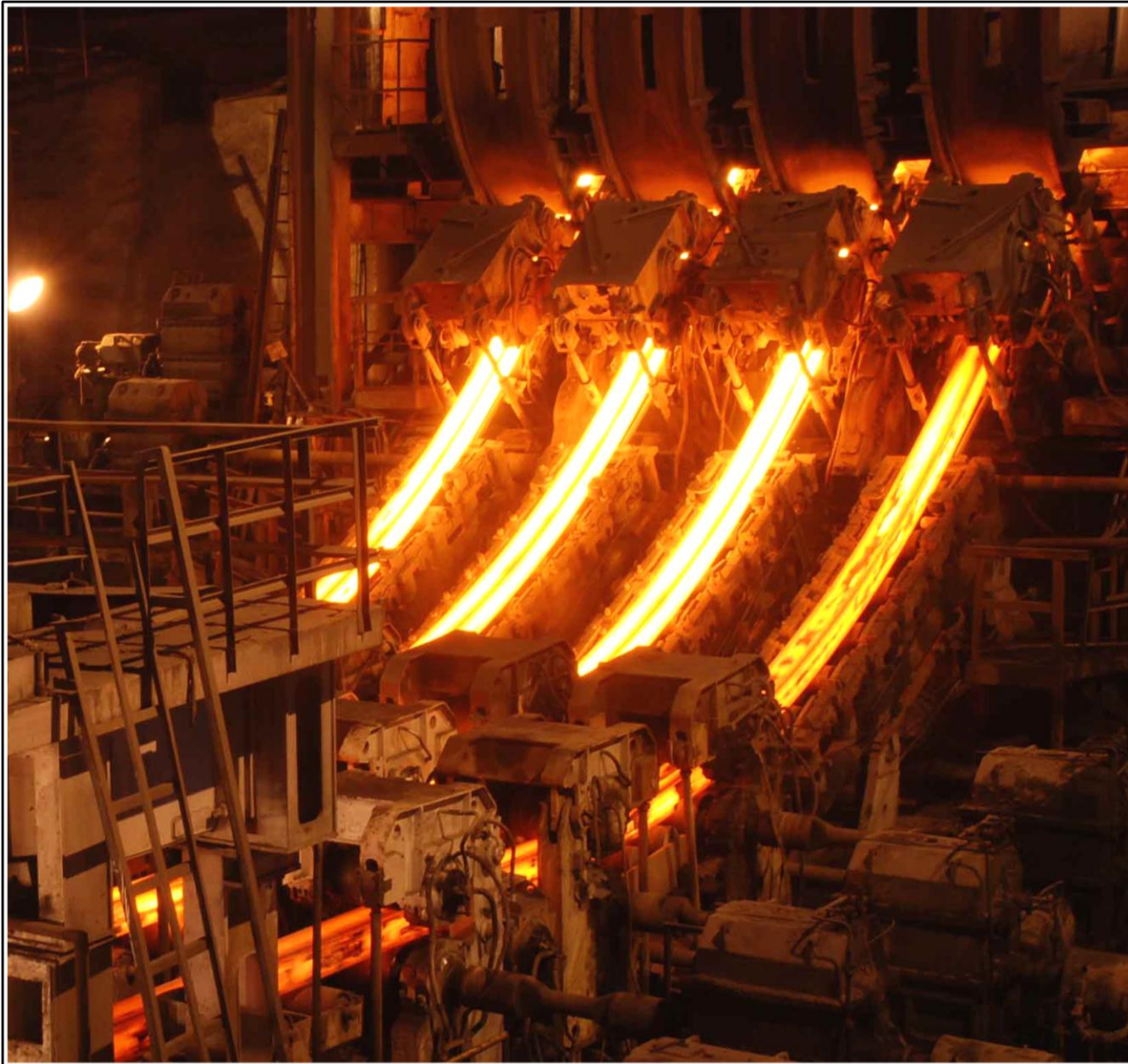
# LINGOTAMENTO CONTÍNUO

LC: 95% da produção mundial

Convencional ou estático: menos de 10%



# LINGOTAMENTO CONTÍNUO



# AÇO EFERVESCENTE-ACALMAR-DESOXIDAR

MINÉRIO/SUCATA/COQ  
UE/REFRATÁRIO  
(S,P,Si)

CONVERSORES  
(O<sub>2</sub>)

TRATAMENTOS PARA  
ACALMAR  
(Ca,Al,Mn,Mg)

INCLUSÕES NÃO  
METÁLICAS: ENDÓGENAS E  
EXÓGENAS  
ASTME 45

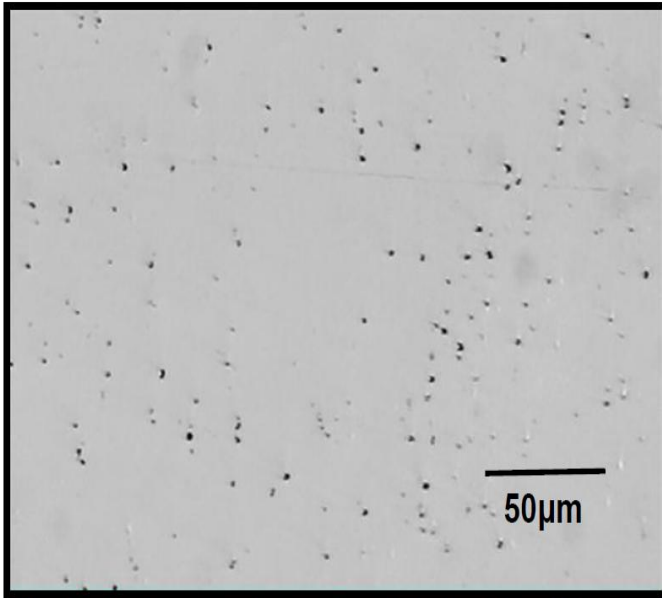
TIPO A  
SULFETOS  
(Mn,Fe,Ca)

TIPO B  
ALUMINA  
(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

TIPO C  
SILICATOS  
(SiO<sub>2</sub>)

TIPO D  
ÓXIDOS  
GLOBULARES  
(Mn,Fe,Ca)

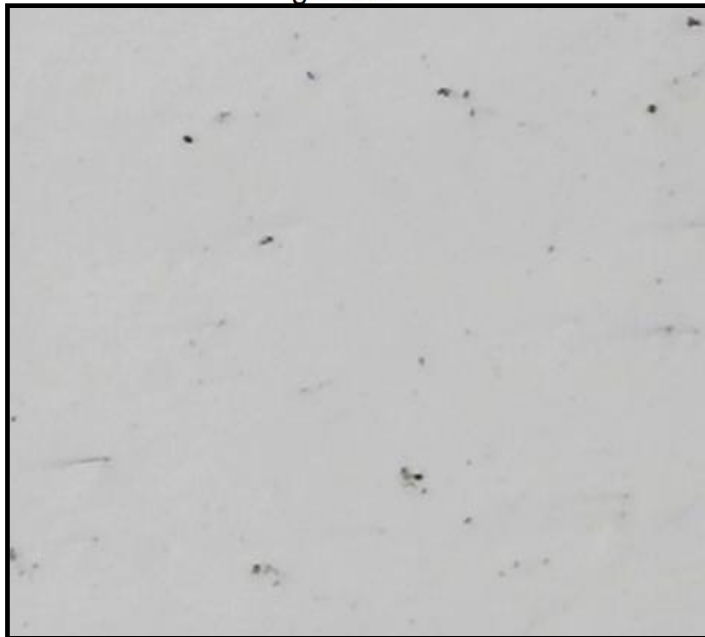
(MARCOMINI)



Amostra 3. Inclusões de óxido globular (tipo D), nível 3, série fina e grossa.



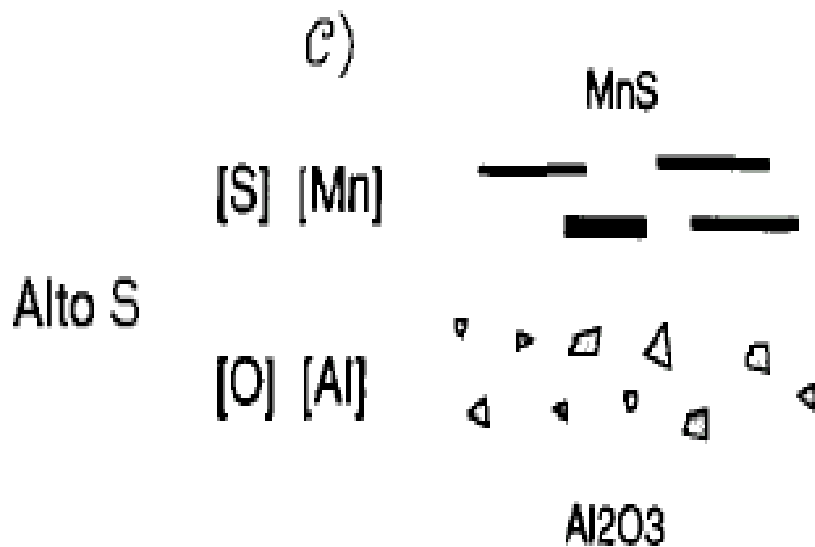
INCLUSÕES DE SULFETO-  
1000X



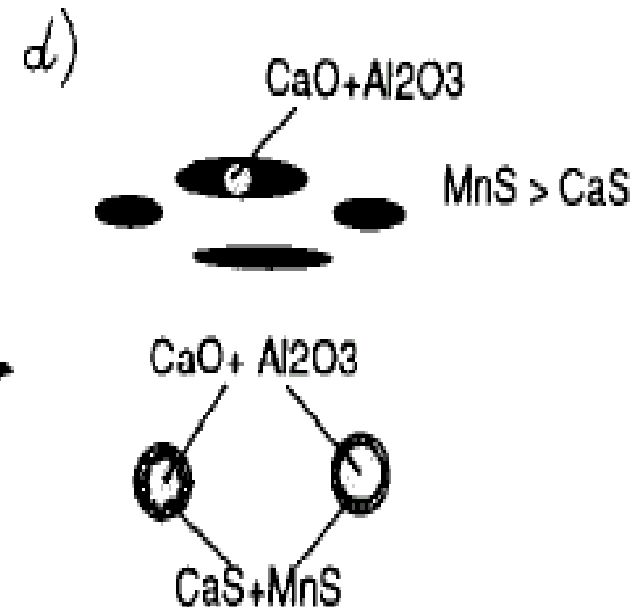
análise de microinclusões do CP3. Tipos A,B, nível1, série fina

**Aços acalmados ao Al: Ca é usado para modificar inclusões de alumina em cálcioaluminatos de menor ponto de fusão e maior deformabilidade (plasticidade).**

**SEM TRATAMENTO  
COM CÁLCIO**



**COM TRATAMENTO  
COM CÁLCIO**



# Evitar “Clogging” – obstrução da válvula submersa no lingotamento contínuo

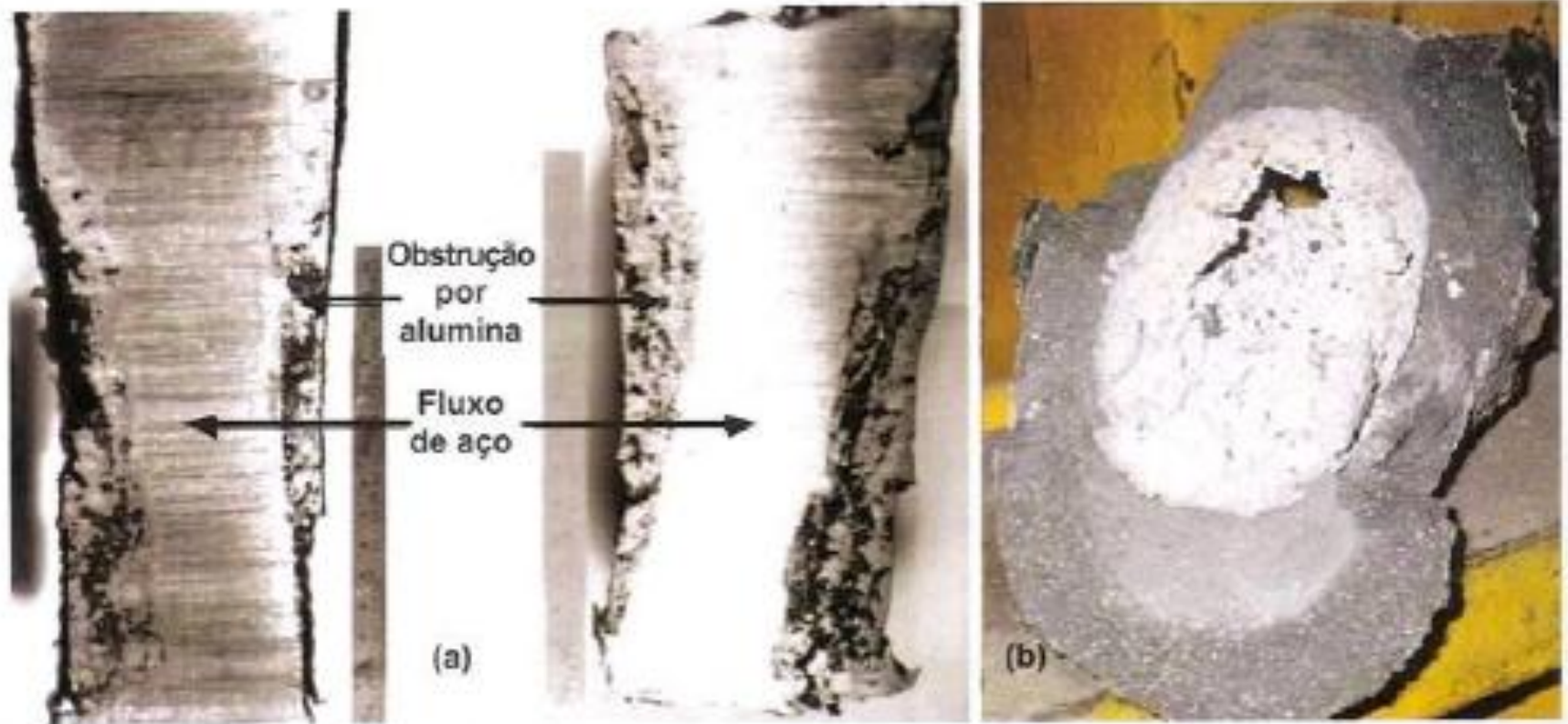


Figura 3.17 – (a) exemplos de tubos submersos seccionados na direção vertical para mostrar a região correspondente ao fluxo de aço e à formação de alumina; (b) tubo submerso obstruído pela formação de alumina.

**Inclusões: ainda é grande preocupação das siderúrgicas.  
Um dos grandes objetivos: produção de aços cada vez  
mais “limpos”.**

**Grande especialista na área: Prof. D. Wagner- atual  
chefe do departamento de metalurgia da UFRGS.  
Ministra cursos pela ABM.**

**Wagner Viana Bielefeldt**

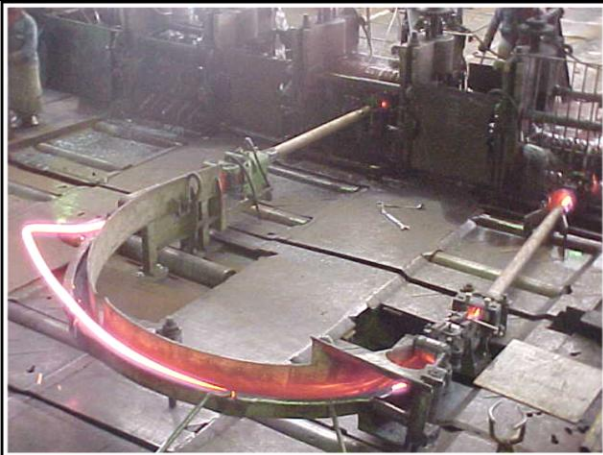
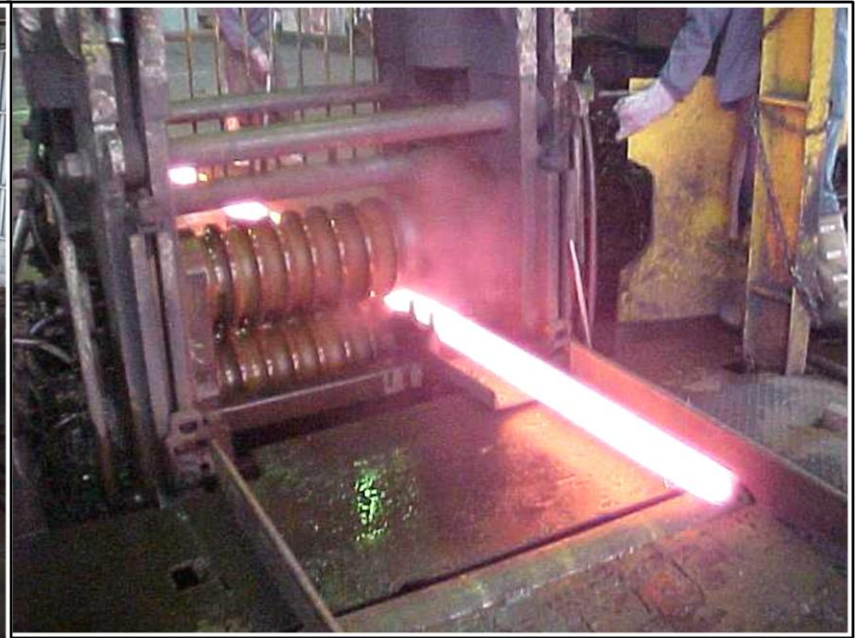
**E-mail: [wagner.viana@ufrgs.br](mailto:wagner.viana@ufrgs.br)**

**55 51 991611051**

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Departamento de metalurgia [www.ufrgs.br/demet](http://www.ufrgs.br/demet)  
Laboratório de Siderurgia**

**APÓS A SOLIDIFICAÇÃO, O LINGOTE É  
SUBMETIDO AOS  
PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO  
(DEFORMAÇÃO A QUENTE OU A FRIO)**

# LAMINAÇÃO

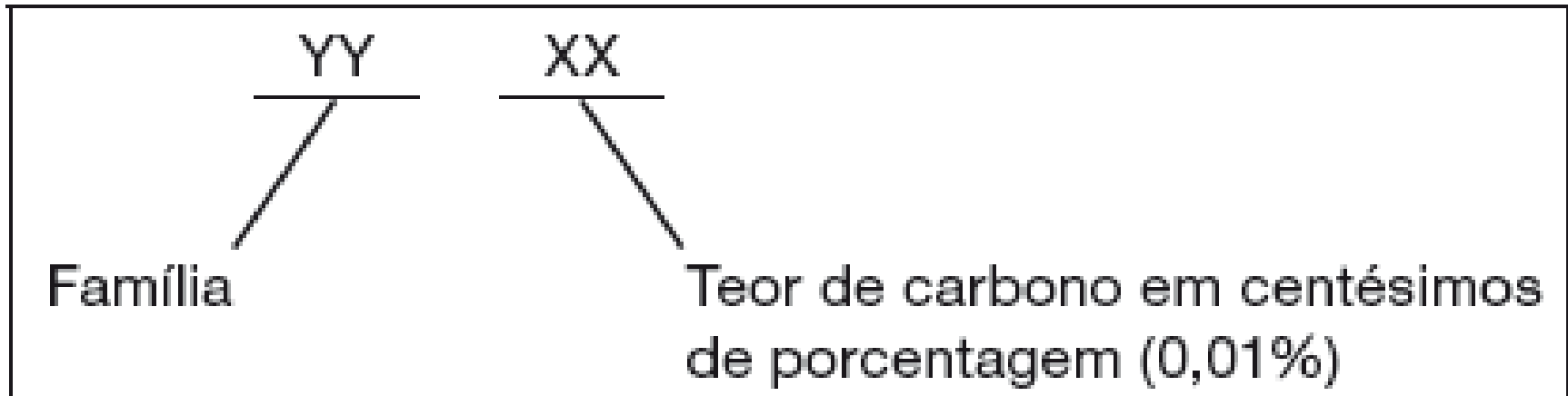




# FORJAMENTO

# **CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS**

# CLASSIFICAÇÃO SAE/AISI/ABNT



*(Colpaert)*

# NORMAS

## COMPOSIÇÃO QUÍMICA:

- NORMA ABNT NM87
- NORMA SAE J 403 E J 404

## COMPOSIÇÃO QUÍMICA E

### DUREZA:

- NORMA SAE J 1268

## ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES

### MECÂNICAS:

- NORMA SAE J 1397

## NORMAS ASTM E DIN:

## COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES MECÂNICAS

## CÓDIGO ASME: PETROQUÍMICA- SOLDAGEM-MATERIAIS- ENSAIOS

**Tabela 10.1**

Principais famílias de aços conforme a classificação ABNT (similar a AISI e SAE)

Aços carbonos	10xx	Aço carbono
	11xx	Aço carbono resulfurado (corte fácil)
	12xx	Aço carbono resulfurado e refosforado (corte fácil)
Aços de baixa liga (construção mecânica)	13xx	Mn 1,75%
	23xx	NI 3,5%
	25xx	NI 5,0%
	31xx	NI 1,25%, Cr 0,65%
	33xx	NI 3,50%, Cr 1,55%
	40xx	Mo 0,25%
	41xx	Cr 0,50% ou 0,95%, Mo 1,12% ou 0,20%
	43xx	NI 1,80%, Cr 0,50% ou 0,80%, Mo 0,25%
	46xx	NI 1,55% ou 1,80%, Mo 0,20% ou 0,25%
	47xx	NI 1,05%, Cr 0,45%, Mo 0,20%
	48xx	NI 3,50%, Mo 0,25%
	50xx	Cr 0,80% ou 0,40%
	51xx	Cr 0,80% a 1,05%
	5xxxx	Cr 0,50% ou 1,00% ou 1,45%, C 1,00%
	61xx	Cr 0,80% ou 0,95%, V 0,10% ou 0,15% mínimo
	86xx	NI 0,55%, Cr 0,50% ou 0,65%, Mo 0,20%
87xx	NI 0,55%, Cr 0,50%, Mo 0,25%	
92xx	Mn 0,85%, Si 2,00%	
93xx	NI 3,25%, Cr 1,20%, Mo 0,12%	
98xx	NI 1,00%, Cr 0,80%, Mo 0,25%	

# NORMAS

N-034.004.001



ABNT-Associação  
Brasileira de  
Normas Técnicas

Sede:  
Rio de Janeiro  
Av. Treze de Maio, 13 - 28º andar  
CEP 20003-900 - Caixa Postal 1680  
Rio de Janeiro - RJ  
Tel.: PABX (021) 210-3122  
Fax: (021) 220-1762/220-6436  
Endereço Telegráfico:  
NORMATÉCNICA

Copyright © 2000,  
ABNT-Associação Brasileira  
de Normas Técnicas  
Printed in Brazil/  
Impresso no Brasil  
Todos os direitos reservados

OUT 2000

NBR NM 87

## Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química

Origem: NM 87:1996  
ABNT/CB-28 - Comitê Brasileiro de Siderurgia  
NBR NM 87 - Carbon steel and alloy steel for general engineering purpose -  
Designation and chemical composition  
Descriptors: Steel, Chemical composition  
Esta Norma cancela e substitui a NBR 6006:1994  
Válida a partir de 30.11.2000

Palavras-chave: Aço, Composição

19 páginas

# COMPOSIÇÃO QUÍMICA: NORMA ABNT NM87

Designação COPANT del acero/ Designação COPANT do aço	Composición química de colada (%) (1) / Composição química de corrida (%) (1)						
	Carbono (C)	Manganeso/ Manganês (Mn)	Silicio (Si)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdeno/ Molibdênio (Mo)	Vanadio/ Vanádio (V)
1330	0,28-0,33	1,60-1,90	0,15-0,35	-	-	-	-
1345	0,43-0,48	1,60-1,90	0,15-0,35	-	-	-	-
3015	0,12-0,17	0,40-0,60	0,15-0,40	1,40-1,70	1,40-1,70	-	-
3115	0,13-0,18	0,40-0,50	0,15-0,35	1,10-1,40	0,55-0,75	-	-
3519	0,15-0,20	0,40-0,60	0,15-0,40	1,80-2,10	1,80-2,10	-	-
4015	0,12-0,20	0,40-0,80	0,10-0,35	-	-	0,25-0,35	-
4113	0,10-0,18	0,40-0,70	0,10-0,35	-	0,70-1,10	0,45-0,65	-
4117	0,15-0,22	0,60-0,90	0,10-0,40	-	0,85-1-15	0,10-0,40	-
4118	0,18-0,23	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,40-0,60	0,08-0,15	-
4120	0,17-0,22	0,60-0,90	0,15-0,40	-	0,30-0,50	0,40-0,50	-
4122	0,17-0,22	0,70-1,00	0,15-0,40	-	0,30-0,60	0,40-0,50	-
4125	0,23-0,28	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,40-0,60	0,20-0,30	-
4126	0,22-0,29	0,60-0,90	0,15-0,40	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-
4127	0,23-0,29	0,60-0,90	0,15-0,40	-	0,40-0,60	0,40-0,50	-
4130	0,28-0,33	0,40-0,60	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-
4133 <sup>A</sup>	0,29-0,35	0,60-0,85	0,15-0,35	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-
4135	0,33-0,38	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15,0,25	-
4136	0,30-0,37	0,60-0,90	0,15-0,40	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-
4137	0,35-0,40	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15,0,25	-
4141	0,38-0,45	0,60-0,90	0,15-0,40	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-
4142	0,40-0,45	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15-0,25	-
4145	0,43-0,48	0,75-1,00	0,15-0,30	-	0,80-1,10	0,15,0,25	-
4150	0,48-0,53	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,80-1,10	0,15,0,25	-
4151	0,46-0,54	0,50-0,80	0,15-0,40	-	0,90-1,20	0,15-0,30	-
4161	0,56-0,64	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,70-0,90	0,25-0,35	-
4210	0,08-0,15	0,40-0,70	0,50 max.	-	2,00-2,50	0,90-1,20	-
4320	0,17-0,22	0,45-0,65	0,15-0,35	1,65-2,00	0,40-0,60	0,20-0,30	-
4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,15-0,35	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30	-
4517	0,15-0,20	0,40-0,60	0,15-0,40	1,40-1,70	1,50-1,80	0,25-0,35	-
4534	0,30-0,38	0,40-0,70	0,15-0,40	1,40-1,70	1,40-1,70	0,15-0,30	-
4620	0,17-0,22	0,45-0,65	0,15-0,35	1,65-2,00	-	0,20-0,30	-
4720	0,17-0,22	0,50-0,70	0,15-0,35	0,90-1,20	0,35-0,55	0,15-0,25	-
4815	0,13-0,18	0,40-0,60	0,15-0,35	3,25-3,75	-	0,20-0,30	-
4820	0,18-0,23	0,50-0,70	0,15-0,35	3,25-3,75	-	0,20-0,30	-
5016	0,12-0,18	0,40-0,60	0,15-0,40	-	0,40-0,70	-	-
5046	0,43-0,48	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,20-0,35	-	-
5060	0,56-0,64	0,75-1,00	0,15-0,35	-	0,40-0,60	-	-
5115	0,13-0,18	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,70-0,90	-	-
5116	0,14-0,19	1,00-1,30	0,15-0,35	-	0,80-1,10	-	-
5120	0,17-0,22	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,70-0,90	-	-
5121 <sup>B</sup>	0,17-0,22	1,10-1,40	0,15-0,35	-	1,00-1,30	-	-
5123 <sup>C</sup>	0,20-0,25	0,60-0,80	0,12 max	-	0,80-1,00	-	-
5125 <sup>C</sup>	0,23-0,28	0,60-0,80	0,12 max	-	0,80-1,00	-	-
5130	0,28-0,33	0,70-0,90	0,15-0,35	-	0,80-1,10	-	-
5132	0,30-0,35	0,60-0,80	0,15-0,35	-	0,75-1,00	-	-



# NORMAS DIN



## COMO INTERPRETAR A NOMENCLATURA DE AÇOS NA NORMA DIN

### AÇOS CARBONO

Podem ser classificados de duas formas: **pelo limite de resistência à tração** ou **pela composição química**.

Pelo **limite de resistência à tração**, utiliza-se o símbolo St (de stahl, que significa aço em alemão), seguido do limite de resistência à tração mínimo.

Ex: **St 42** – aço com limite de resistência à tração mínimo de **42 kgf/mm<sup>2</sup>**.



Pela **composição química**, emprega-se a letra C seguida do teor de carbono multiplicado por 100.

Ex: **C 45** - aço com teor médio de carbono de **0,45%**. Equivalente ao **SAE/ABNT 1045**



**EESC • USP**

## **AÇOS LIGADOS**

# **NORMAS DIN**



No caso de **aços baixa liga**, estes são representados de acordo com o seguinte exemplo:

**Aço DIN 42 Cr Mo 4**, da norma DIN EN 10083-3 (equivalente ao **SAE4140**):

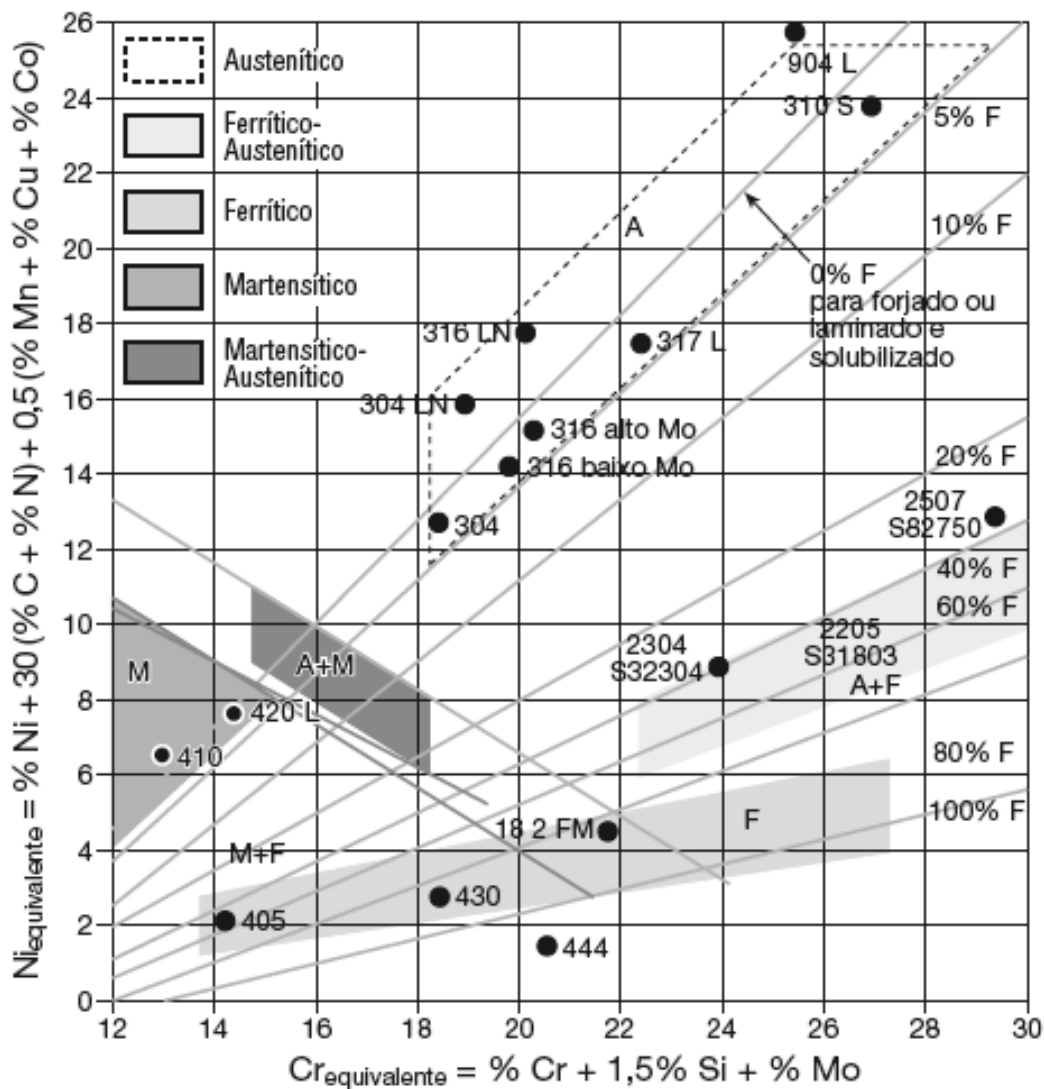
- **42** é o teor de **carbono** multiplicado por 100 (ou seja **0,42%**);
- **Cr e Mo** são símbolos dos elementos de liga;
- **4** é o multiplicador do teor do elemento de liga em maior quantidade (**Cr**)

# EQUIVALÊNCIA ENTRE NORMAS

## 5.1.3 - AÇOS LIGADOS PARA BENEFICIAMENTO

QUAL. GERDAU	ABNT/SAE AISI/ASTM	DIN	UNI	JIS	BS	AFNOR
1330	1330	(30Mn5)	-	(SMn 2H)	(120M36)	-
4037	4037	-	-	-	(605A37)	-
41 Cr 4	5140	41Cr4	41Cr4	SCr 4H	(530H40)	42C4
4130	4130	(30CrMo4)	(30CrMo4)	SCM 3H	(708A30)	(30CD4)
4140	4140	(42CrMo4)	(42CrMo4)	(SCM 4H)	(708M40)	(42CD4)
4142	4142	41CrMo4	41CrMo4	(SCM 4H)	(708A42)	(42CD4)
4150	4150	(50CrMo4)	-	(SCM 5H)	(708A47)	-
42CrMo4	(4140)	42CrMo4	42CrMo4	(SCM 24H)	708M40	42CD4
4340	4340	(40CrNiMo6)	-	(SNM 21H)	(817M40)	(35NCD6)

# AÇOS INOXIDÁVEIS- DIAGRAMA DE SCHAEFFLER



**ÁÇOS INOXIDÁVEIS:**  
**ALTO Cr > 12%**  
**CARBONO ABAIXO DE 0,10%.**

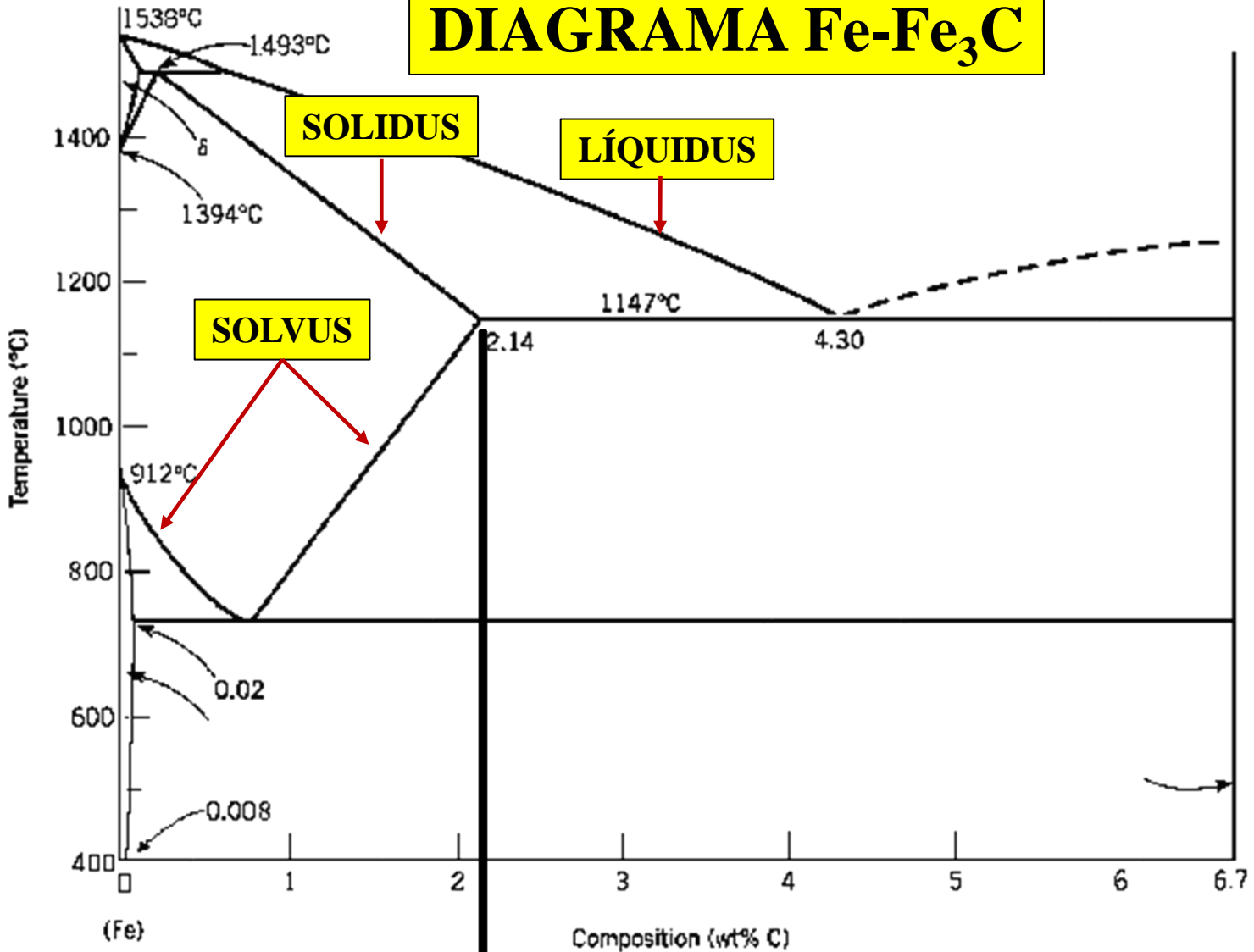
**AUSTENÍTICOS:** SÉRIE 300 – Cr (16- 30%) E Ni (8-35%) EX: 316, 304.

**MARTENSÍTICOS:** SÉRIE 400- Cr(11-18%) EX: 410, 420.

**DUPLEX:** Cr(18-27%), Ni(4-7%) E Mo(1-4%). EX: 2205.

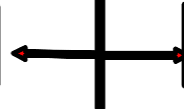
( ADAPTADO: COLPAERT)

# DIAGRAMA Fe-Fe<sub>3</sub>C



**Aços**

**Ferros fundidos**



## FASES E CONSTITUINTES DO AÇO

- ***Ferrita ( $\delta$ )***: Solução sólida de C em Fe CCC – 1.394°C a 1.538°C. Solubilidade máxima de 0,09% de C em 1.495°C ( $a=2,91\text{\AA}$ )
- ***Austenita ( $\gamma$ )***: Solução sólida de C no Fe CFC- 727°C a 1.495°C. Solubilidade máxima de C-2,11 % a 2,14%, em 1148°;
- ***Ferrita ( $\alpha$ )***: Solução sólida de C no Fe CCC – até 912°. Solubilidade máxima 0,020% de C em 723°C a 727°C ( $a=2,88\text{\AA}$ );
- ***Cementita ( $Fe_3C$ )***: ortorrômbico, alta dureza;
- ***Perlita: microconstituente*** formado por lamelas de  $\alpha$  e  $Fe_3C$ .

**Figura 7.3**

Aço de teor de carbono extra baixo<sup>(7)</sup> (no caso, Ferro Armco). Grãos de ferrita e pequenas inclusões não-metálicas. Ataque: água régia.

**FASE: FERRITA (GRÃOS)**

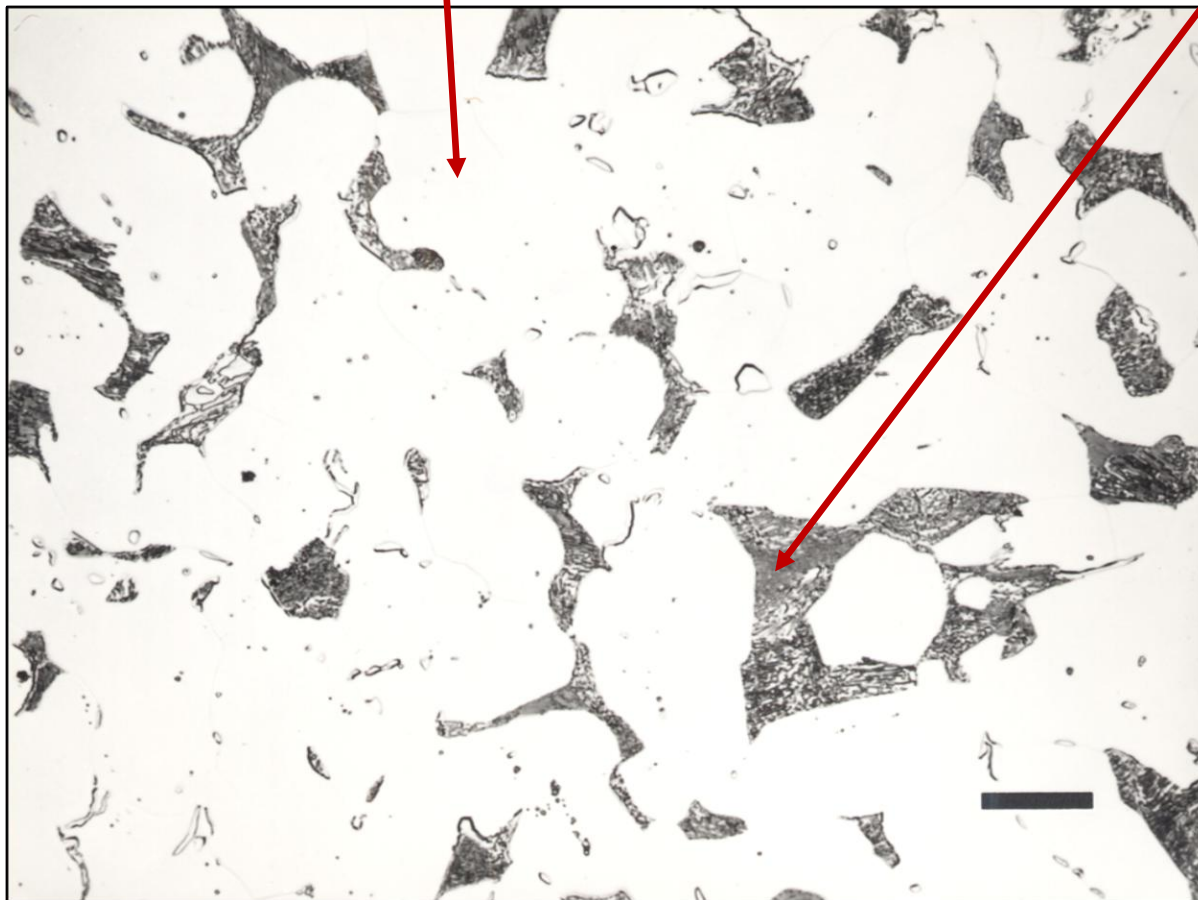
**CONTORNOS DE GRÃO**

100  $\mu\text{m}$

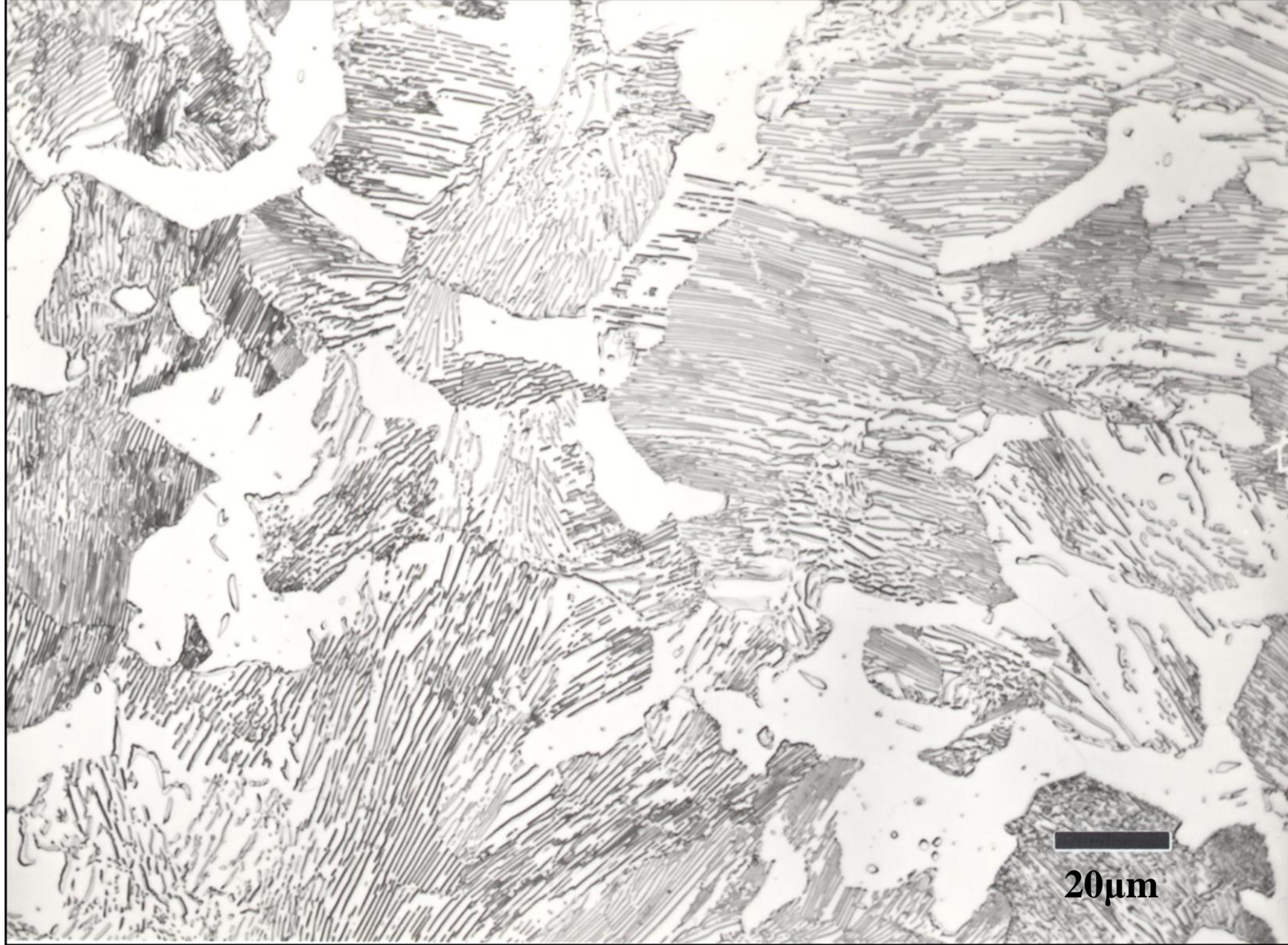
*(Colpaert)*

**FERRITA (CLARA)**

**PERLITA (ESCURA)**



**20 $\mu$ m**



**Ferrita (branca) e perlita (escura) aço com 0.6% C. Ataque Picral.**

**FIM**