



SMM 0342 - INTRODUÇÃO AO ENSAIO MECÂNICO DOS MATERIAIS

Prof. Dr. José Benedito Marcomini

**EM QUAL NÍVEL AS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DOS MATERIAIS COMEÇAM
A SE DEFINIR?**

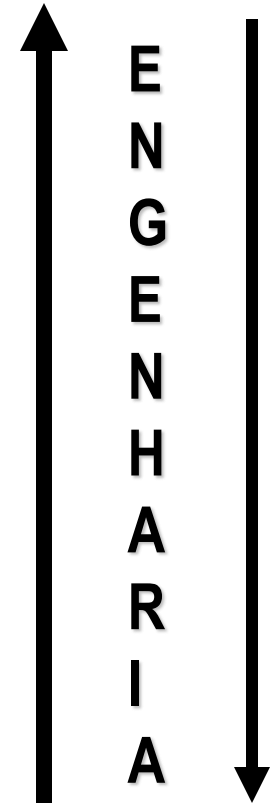
**Composição e Processo
de Fabricação**



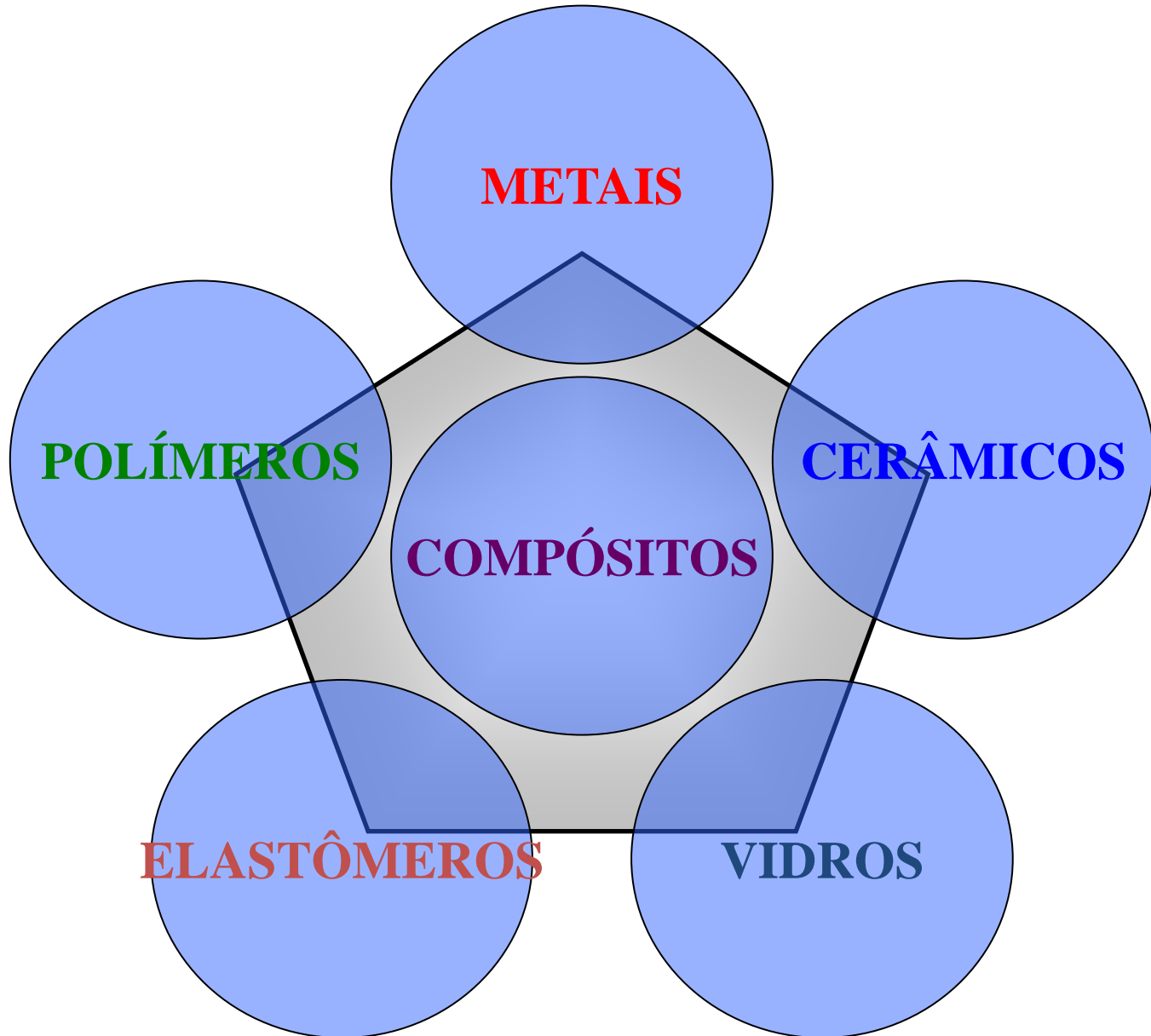
Microestrutura



**Propriedades dos
Materiais**



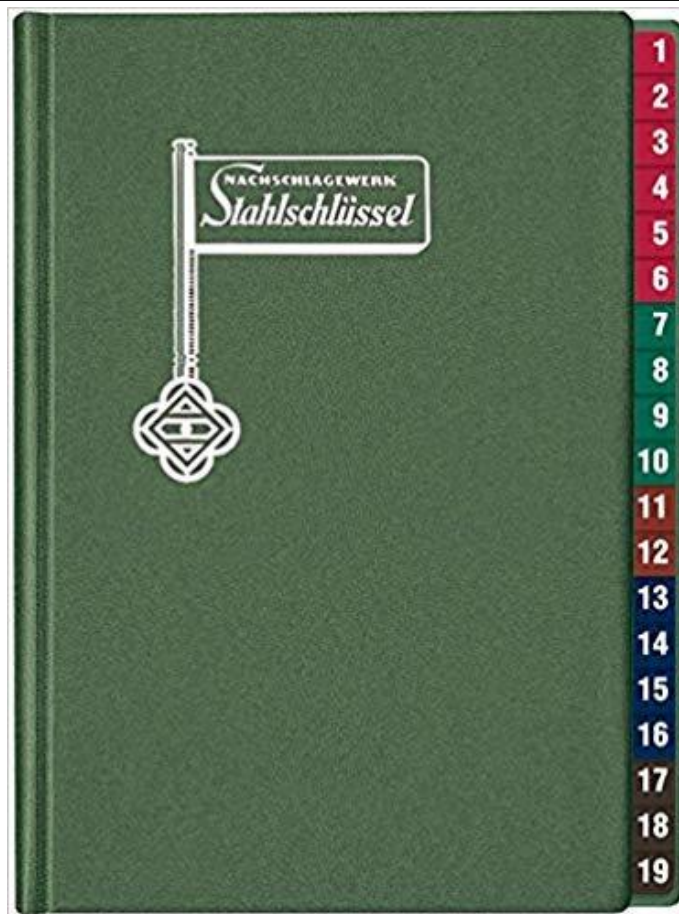
FAMÍLIAS DE MATERIAIS DE ENGENHARIA



QUANTOS MATERIAIS DIFERENTES EXISTEM ?

Aprox. 120.000
diferentes, contando as variantes
de tratamento térmico e composição
de cada material

STAHLSCHLÜSSEL: CHAVE DOS AÇOS



MAIS DE 70.000 NORMAS DE AÇO!

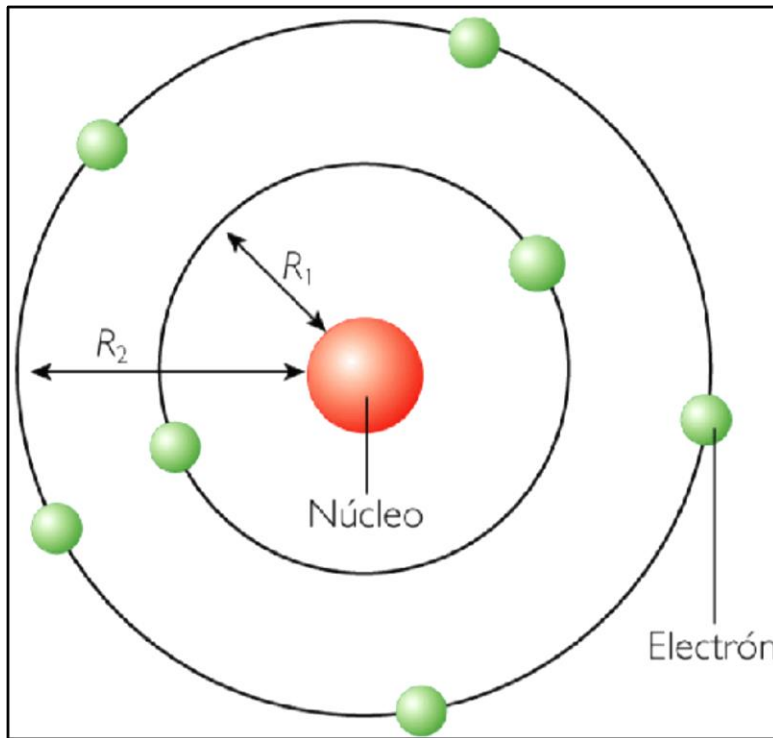
CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS E PROPRIEDADES MECÂNICAS

- A primeira classificação dos materiais é baseada no tipo de ligação química, que nasce do modelo de átomo;**
- As propriedades começam a ser definidas pelo tipo de ligação química;**
- Os átomos se organizam em estruturas, que contribuem para as propriedades macroscópicas.**

ÁTOMO

- **Demócrito de Abdera (360-460 AC): partícula indivisível;**
- **John Dalton (1766-1844): indivisível, esfera maciça -utilizada em ciência dos materiais (modelo de esferas rígidas) para descrever as redes cristalinas;**
- **Michael Faraday (1791-1867) - 1833 relatou a existência de partículas negativas da matéria em seus estudos de eletrólise;**
- **George Johnstone Stoney (1833-1911) – O primeiro a reconhecer o trabalho de Faraday e cunhar o nome “elétron”;**
- **Joseph John Thomson (1856-1940): modelo de átomo com os elétrons incrustados em uma esfera de cargas positivas, com raio aproximado de 10^{-8} cm.**

Rutherford- 1911:Órbitas – falhavam já para o átomo de Hidrogênio – desde Maxwell (1831-1879) sabia-se – partícula acelerada emite radiação e perde energia: elétron se fundiria com o núcleo



Átomo de Bohr (1913)

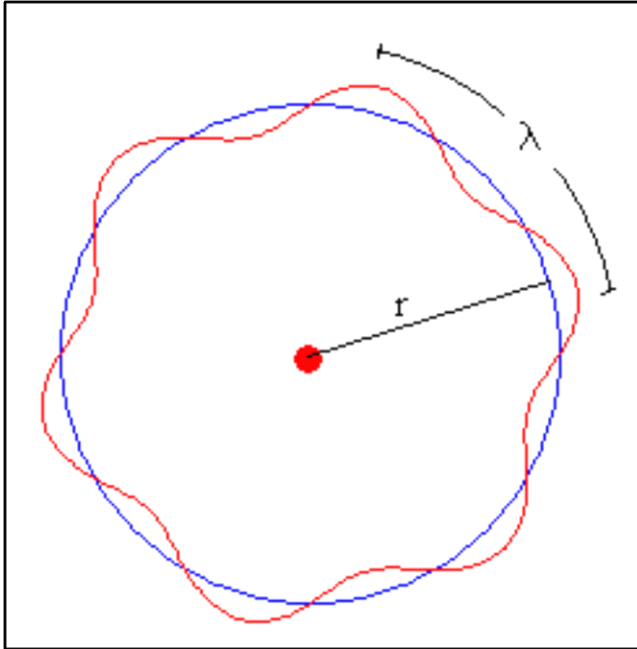
Bohr quantizou os níveis energéticos (corrigindo Rutherford-órbitas): só funcionava para o hidrogênio.

$$L = n \cdot \hbar = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$



Átomo de Bohr (1913) – apenas um número quântico

Louis De Broglie(1923): aplicou a teoria onda-partícula na quantização de Bohr: o elétron orbitando o núcleo em raios discretos leva ao conceito de onda de matéria estacionária



$$\lambda = \frac{h}{m_e v}$$



Erwin Schrödinger (1926): Função de onda

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E_T - E_P) \Psi = 0$$

Átomo de Bohr (1913) – apenas um número quântico

Orbital: densidade de probabilidade da localização do elétron “ao redor” do núcleo.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0$$

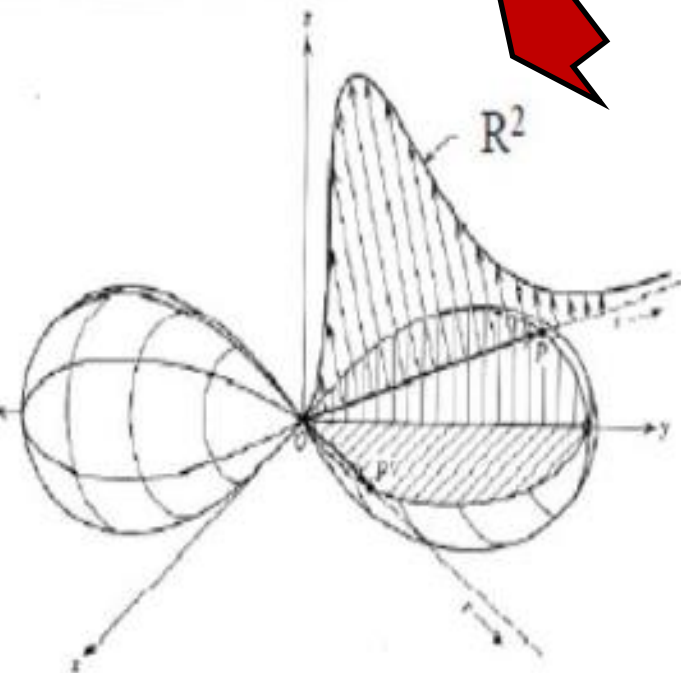
Second derivative with respect to X → $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$
 Shrodinger Wave Function → ψ
 Position → x
 Energy → E
 Potential Energy → V

Solução da Eq. Schrödinger: 4 números quânticos

Números Quânticos
 n l m_l

Funções de Onda

1	0	0	$\psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} e^{-Zr/a_0}$
2	0	0	$\psi_{200} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} \left(2 - \frac{Zr}{a_0}\right) e^{-Zr/2a_0}$
2	1	0	$\psi_{210} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} \frac{Zr}{a_0} e^{-Zr/2a_0} \cos \theta$
2	1	± 1	$\psi_{21\pm 1} = \frac{1}{8\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} \frac{Zr}{a_0} e^{-Zr/2a_0} \sin \theta e^{\pm i\phi}$
3	0	0	$\psi_{300} = \frac{1}{81\sqrt{3\pi}} \left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} \left(27 - 18 \frac{Zr}{a_0} + 2 \frac{Z^2 r^2}{a_0^2}\right) e^{-Zr/3a_0}$
3	1	0	$\psi_{310} = \frac{\sqrt{2}}{81\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} \left(6 - \frac{Zr}{a_0}\right) \frac{Zr}{a_0} e^{-Zr/3a_0} \cos \theta$
3	1	± 1	$\psi_{31\pm 1} = \frac{1}{81\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} \left(6 - \frac{Zr}{a_0}\right) \frac{Zr}{a_0} e^{-Zr/3a_0} \sin \theta e^{\pm i\phi}$



AS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS TÊM SUA ORIGEM NA LIGAÇÃO ENTRE OS ÁTOMOS

Quanto à energia envolvida na ligação elas podem ser divididas em:

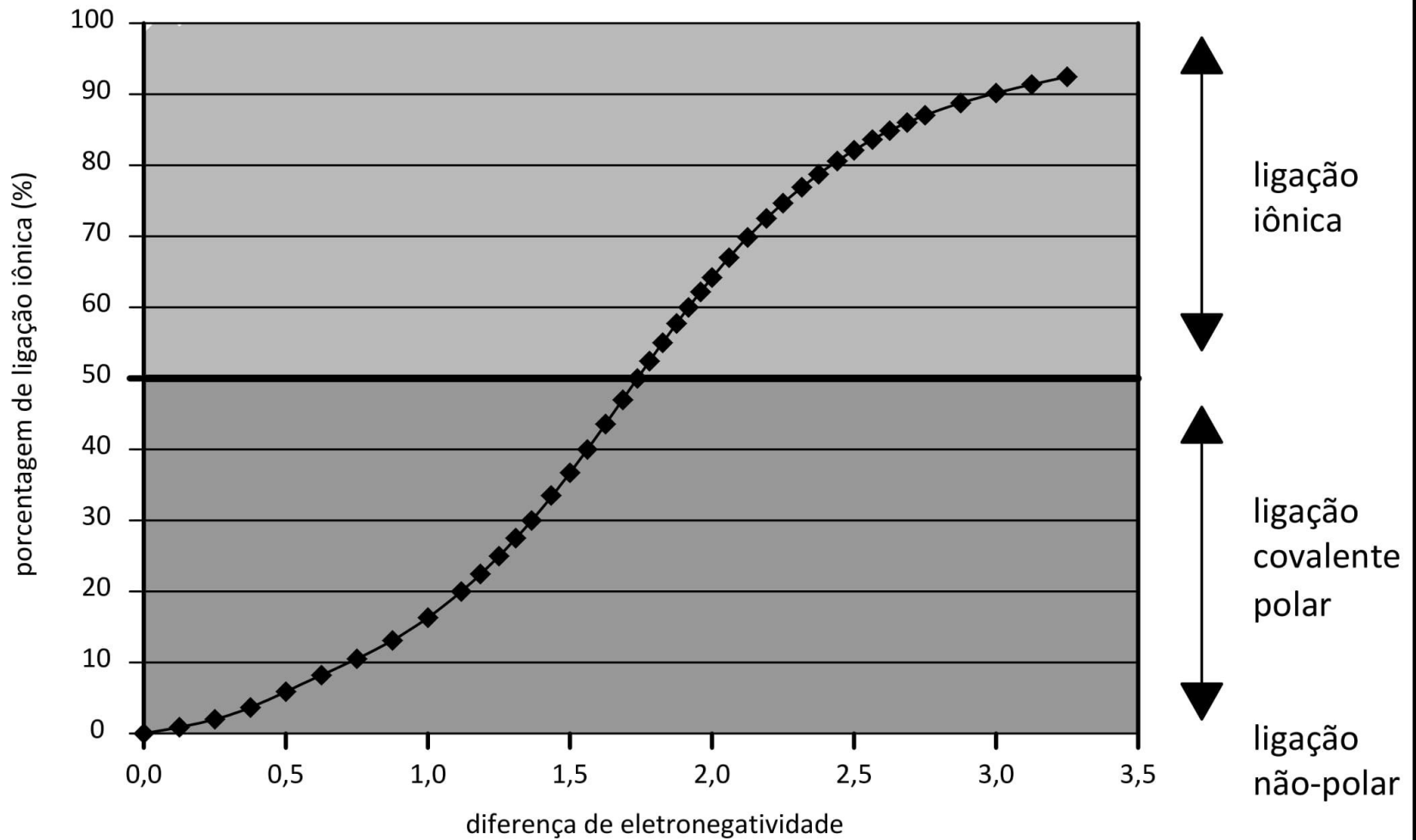
- **Fortes : covalente, iônica e metálica;**
- **Fracas: Van der Waals e pontes de hidrogênio.**

Tipos de ligação química

- Elementos **eletronegativos**: facilidade em **receber** elétrons;
- Elementos **eletropositivos**: facilidade em **doar** elétrons.

ELEMENTO	TIPO DE LIGAÇÃO
ELETROPOSITIVO COM ELETRONEGATIVO	IÔNICA
ELETROPOSITIVO COM ELETROPOSITIVO	METÁLICA
ELETRONEGATIVO COM ELETRONEGATIVO	COVALENTE

Maior dif.eletronegatividade-maior % lig.iônica



Ligação covalente: direcional

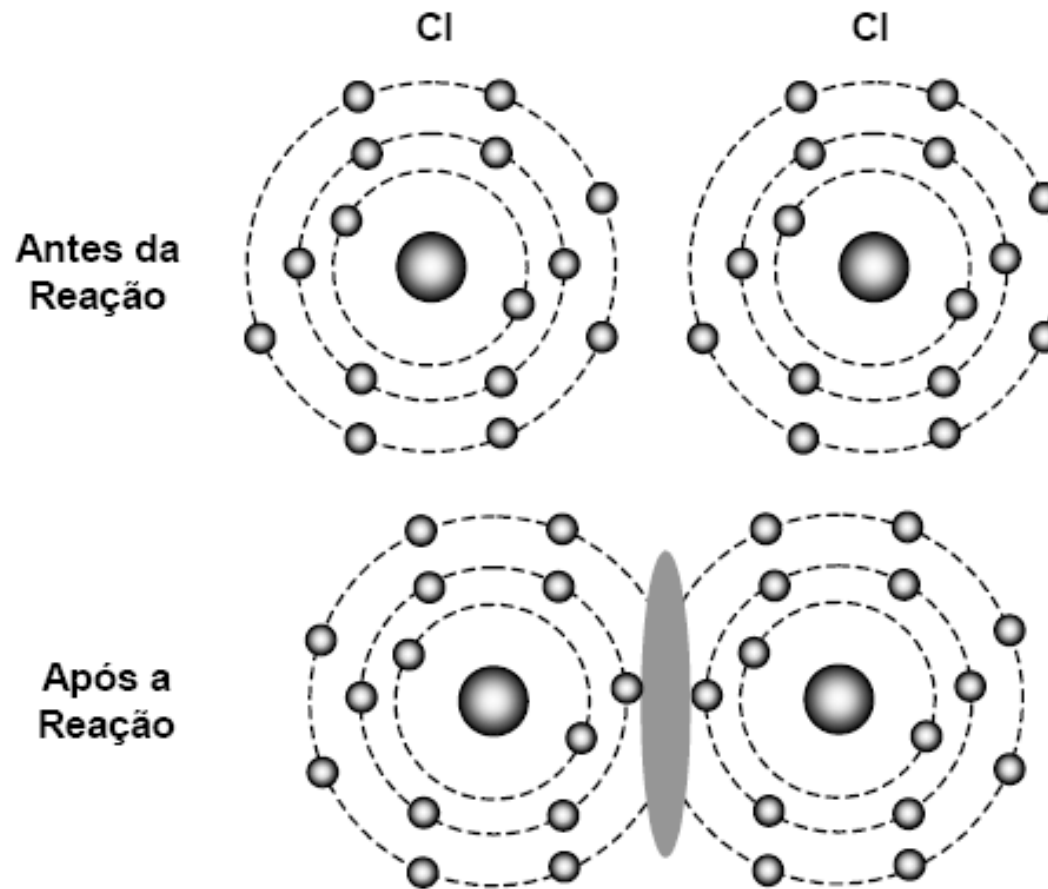
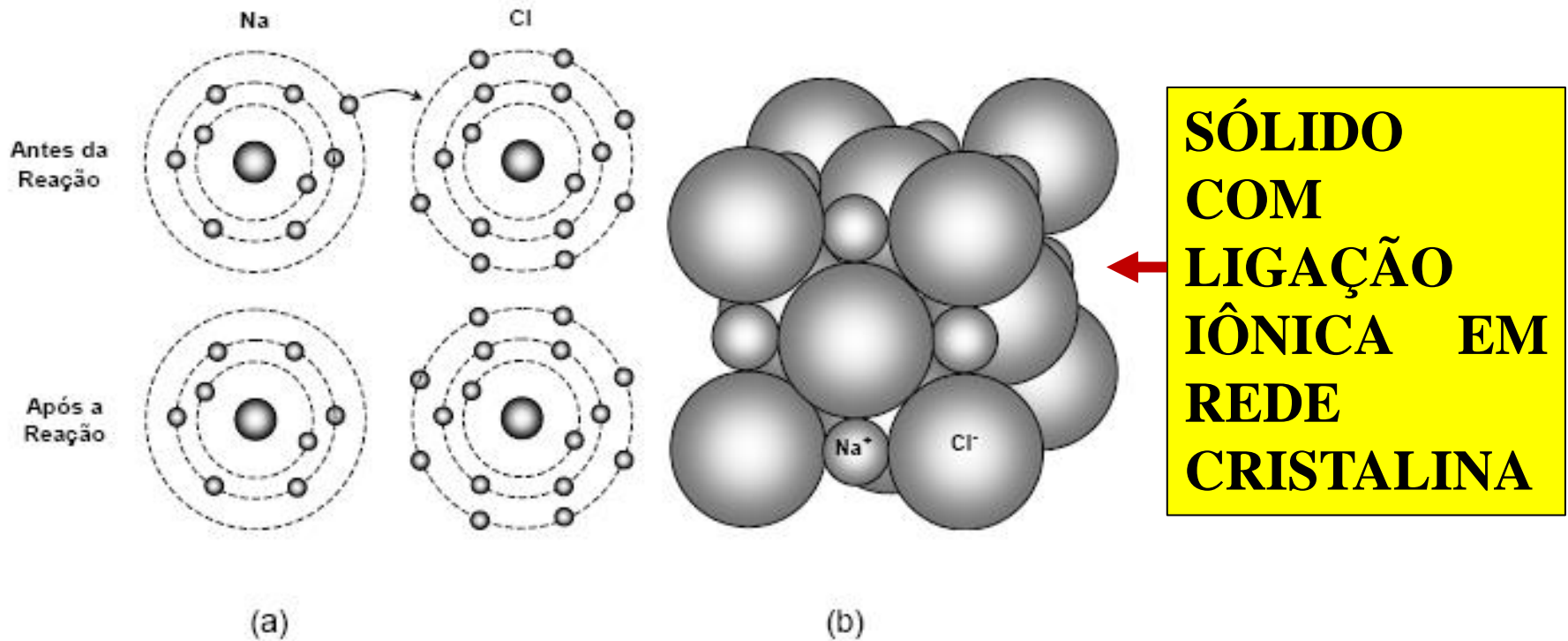
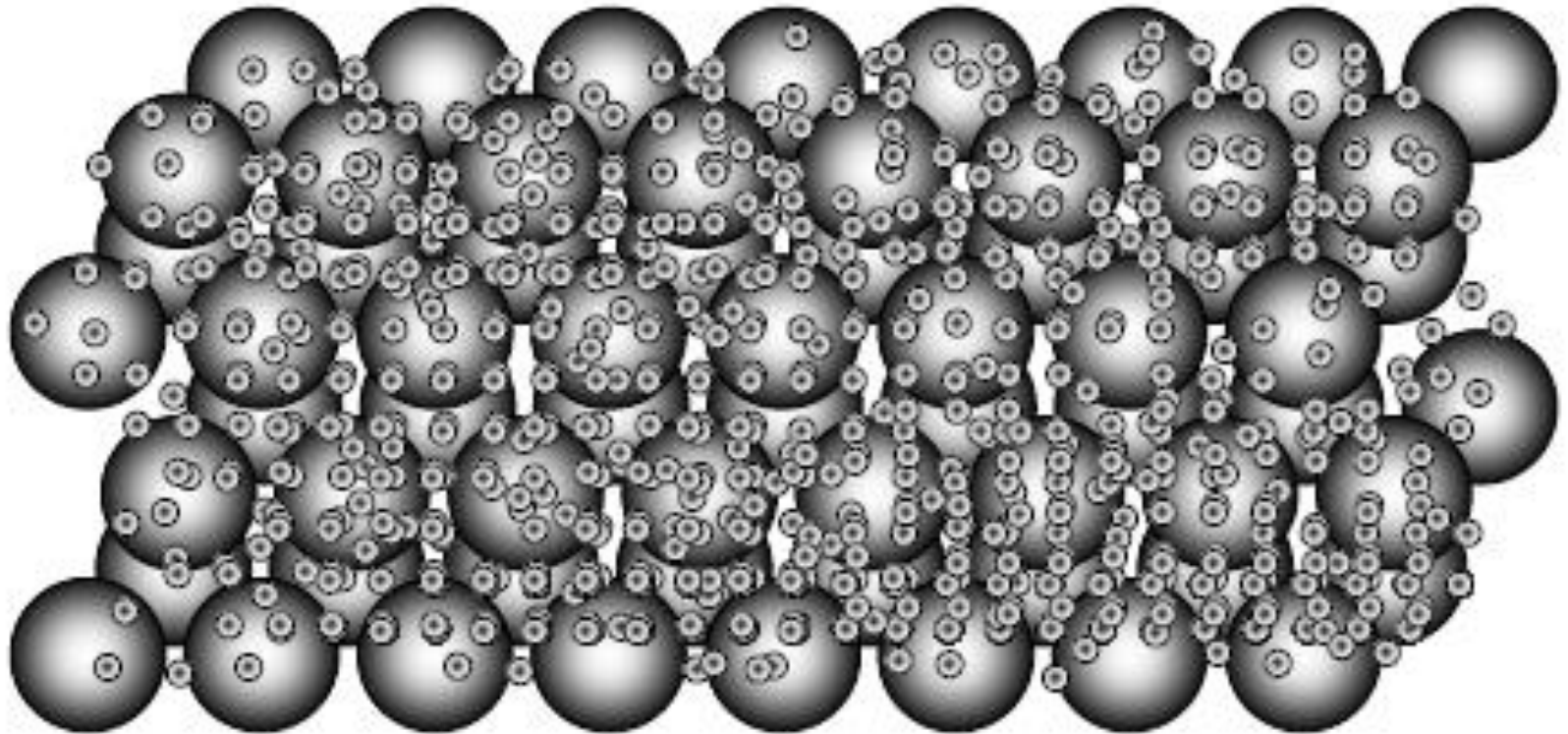


Diagrama esquemático da ligação covalente entre átomos de cloro.

Ligação iônica: rígida-interação eletrostática-Lei de Coulomb

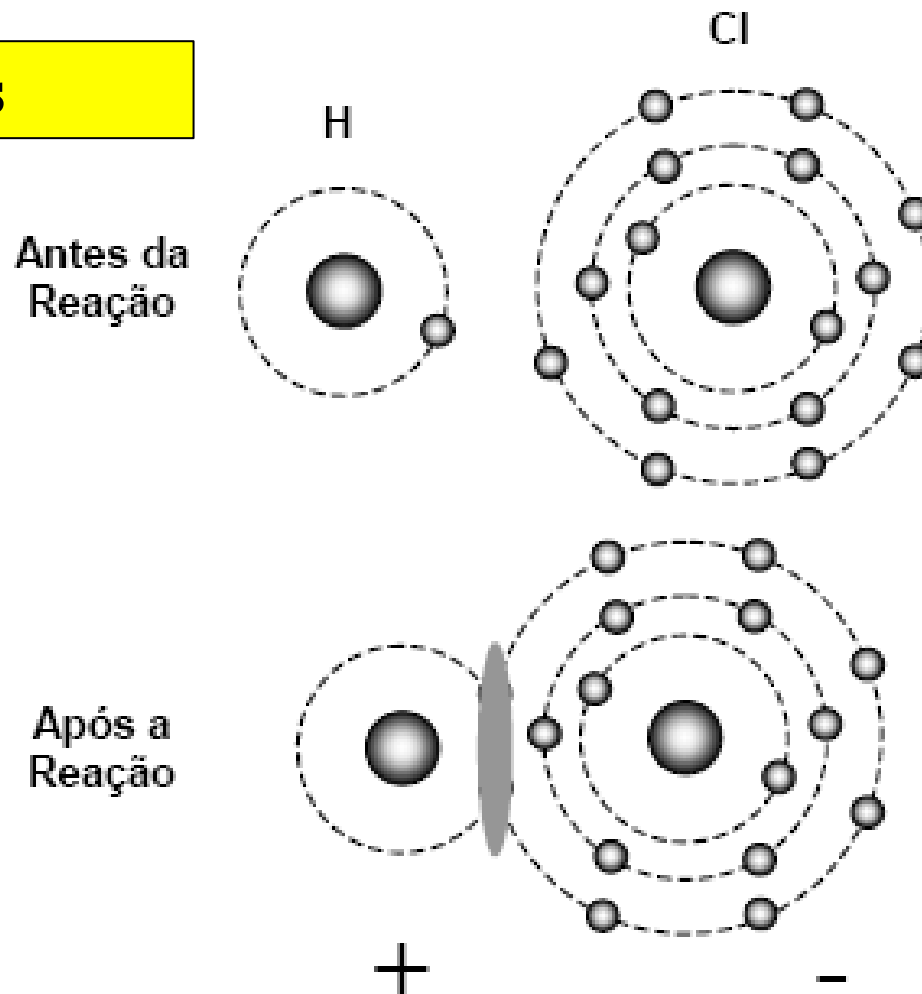


Ligação metálica: não direcional



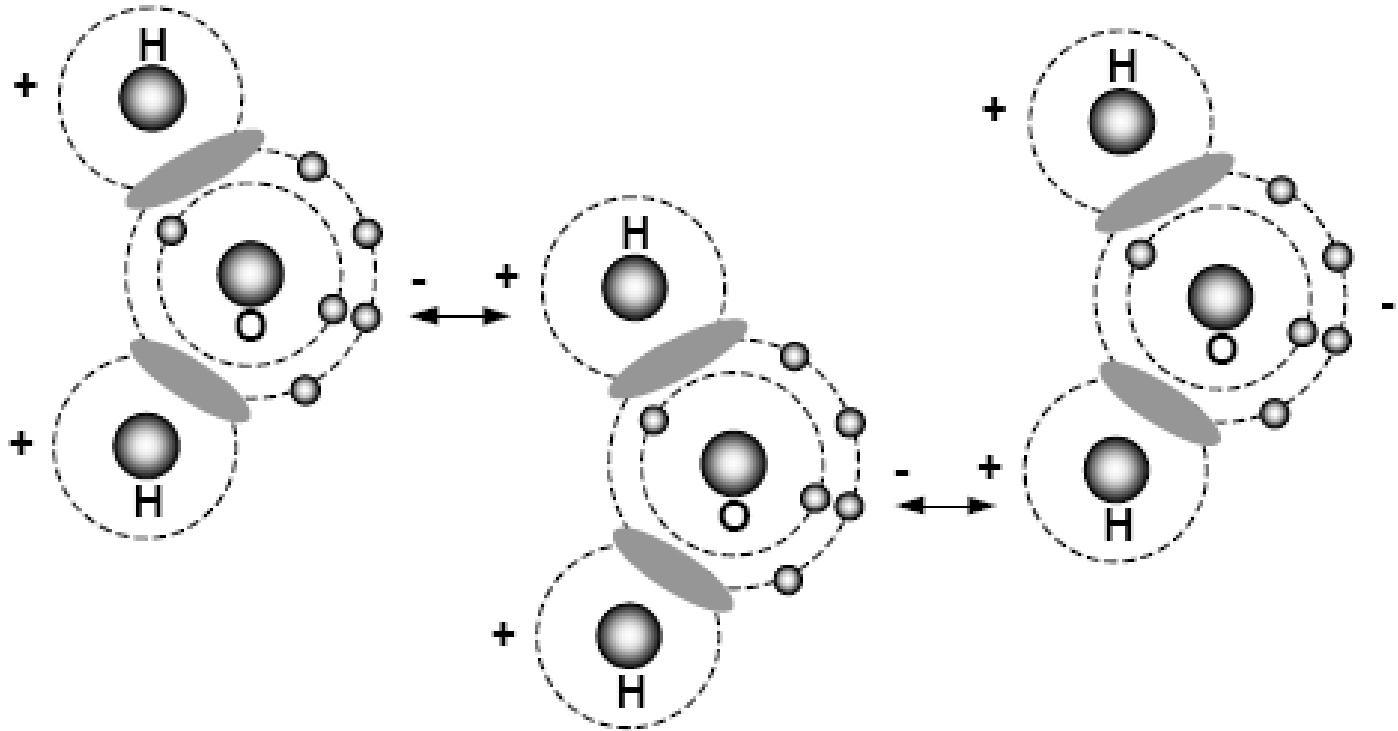
Ligações metálicas (nuvem de elétrons) encontradas nos metais.

Ligações fracas



Ligações de Van der Waals – dipolos permanentes

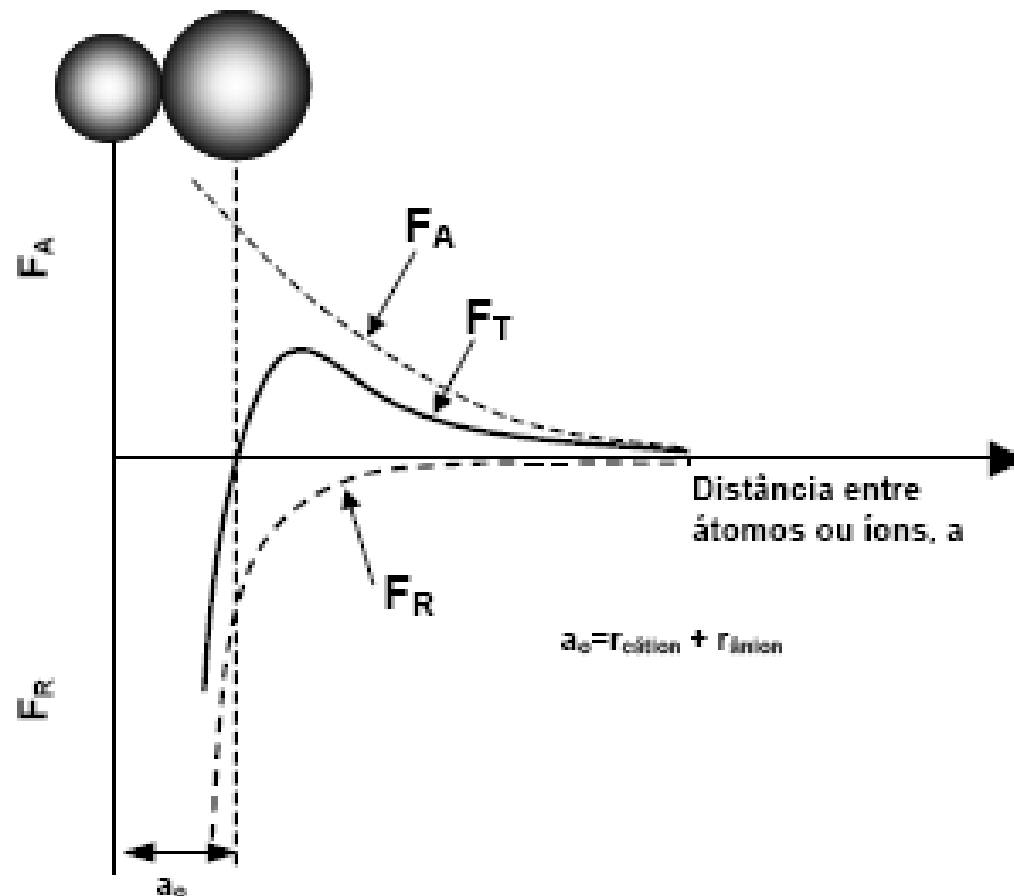
Ligações fracas



Pontes de hidrogênio em moléculas de água

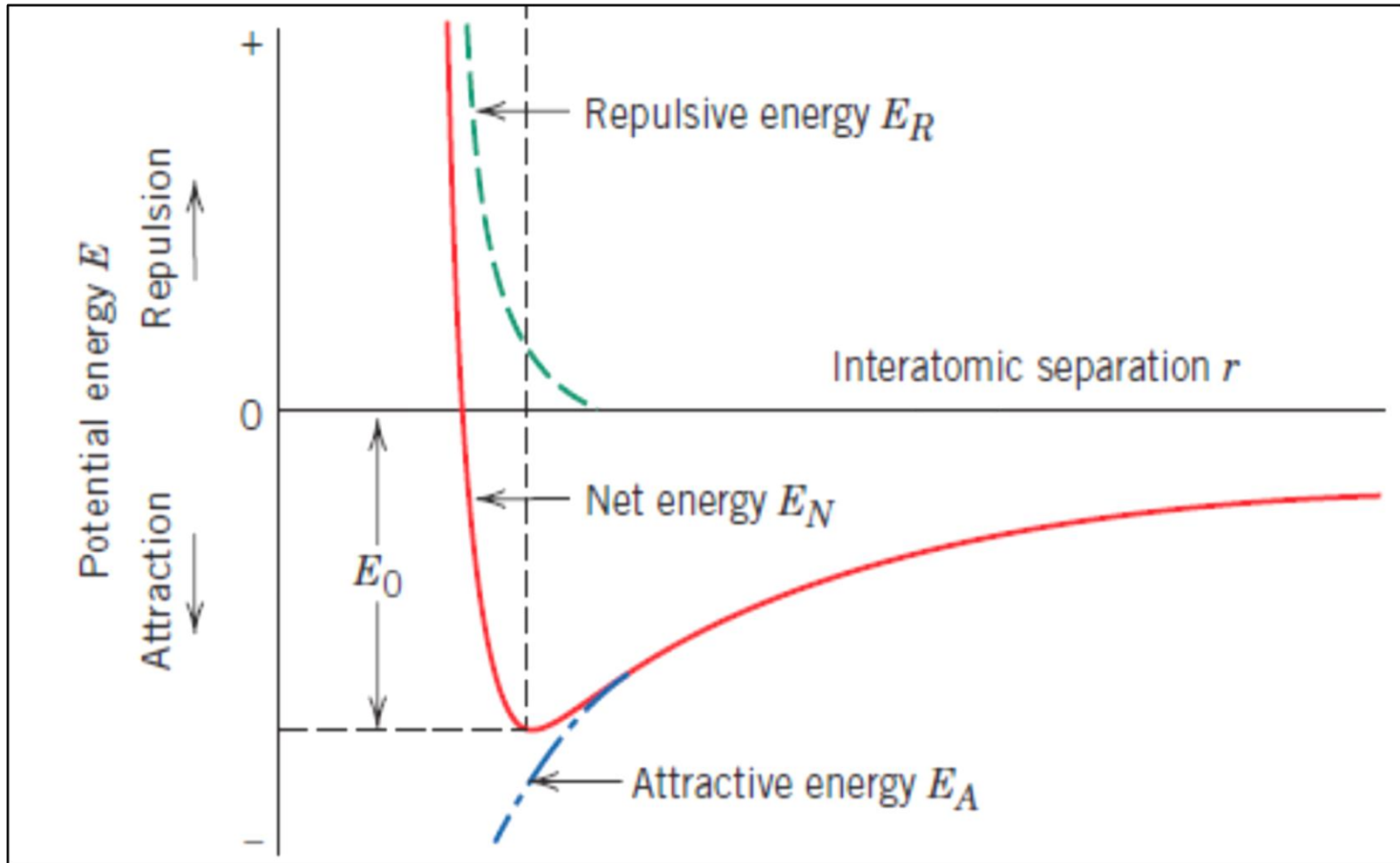
**O QUE OCORRE QUANDO UM
ÁTOMO/ÍON SE LIGA A OUTRO?**

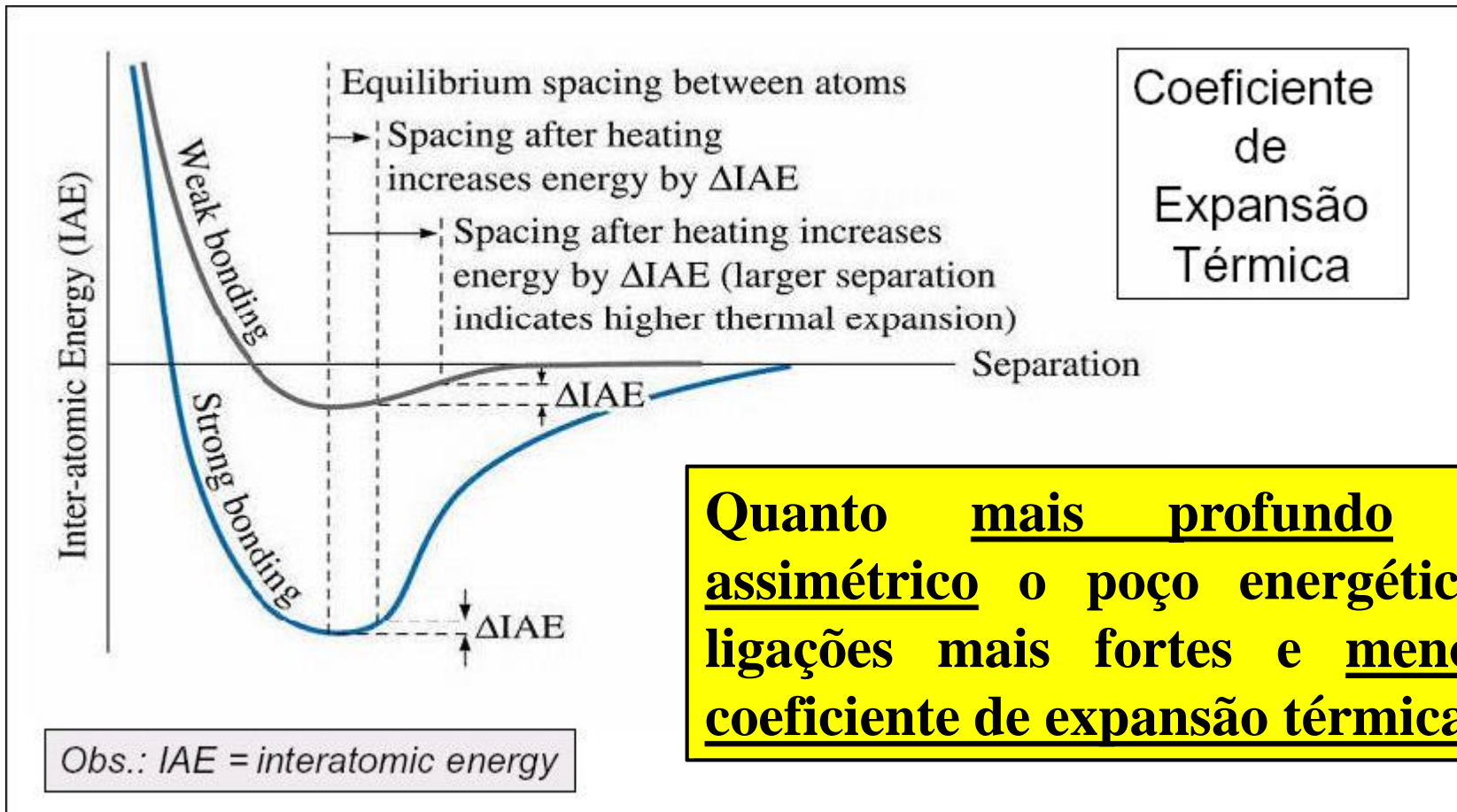
Força e energia interatômicas



Força de interação entre dois átomos: curva é a soma das forças de atração e repulsão.

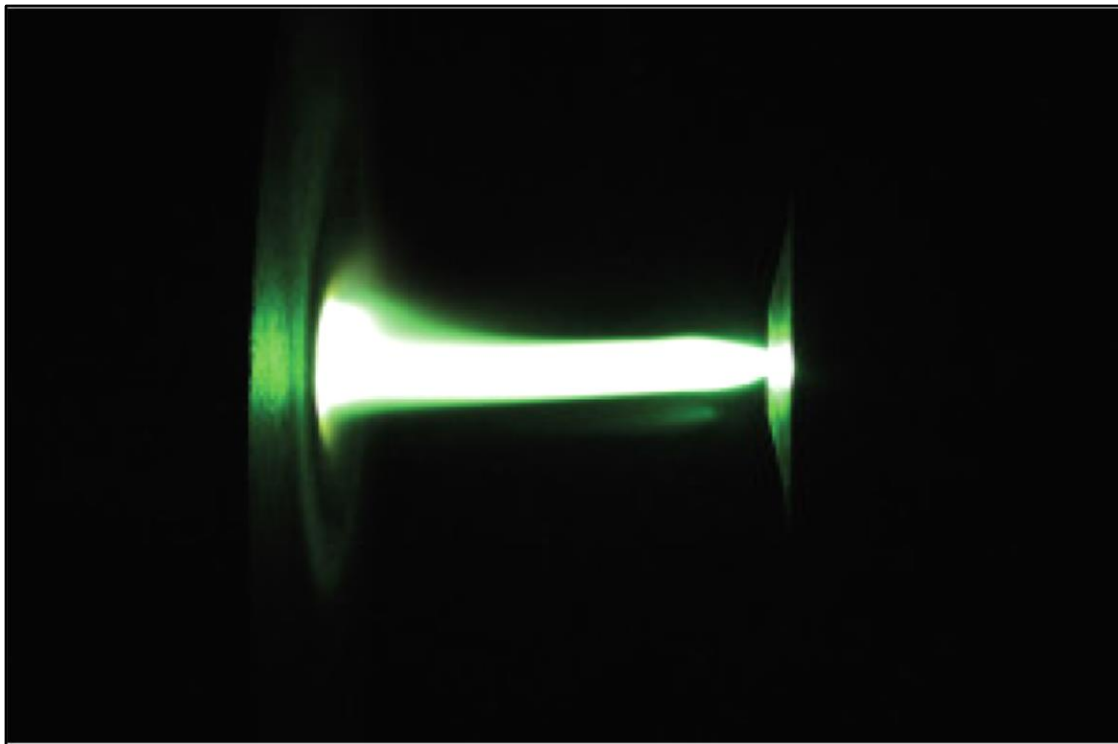
Energia interatômica: Variação da energia potencial resultante da interação entre átomos ou íons.





Quanto mais profundo e assimétrico o poço energético, ligações mais fortes e menor coeficiente de expansão térmica

Ponto de fusão: Quanto mais profundo o poço, maiores as temperaturas de fusão, ebulição e sublimação.



Tochas de plasma: materiais com alta temperatura de fusão, baixo coeficiente de expansão térmica e resistência mecânica a quente! Materiais que apresentam o poço de energia de ligação profundo e assimétrico.

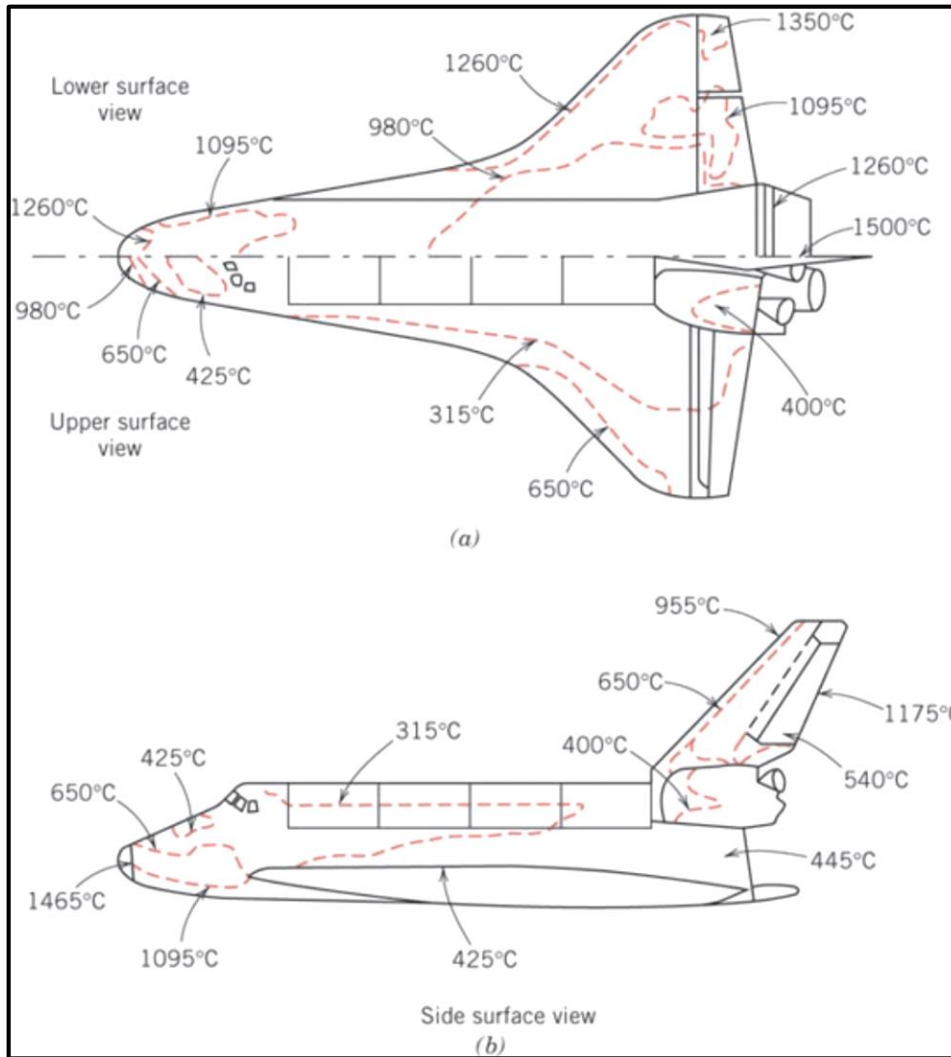
A figura mostra um reator de gaseificação que transforma resíduos sólidos em biogás: nitrogênio, metano e gás carbônico. Temperatura de operação: 1800°C a 2.800°C.

Seleção de vários materiais: Space shuttle!



(Callister)

Vários materiais: Space shuttle!



Seleção de vários materiais: resistência mecânica, temperatura de fusão, coeficiente de expansão térmica e isolamento em diferentes temperaturas!

(Callister)



(Callister)

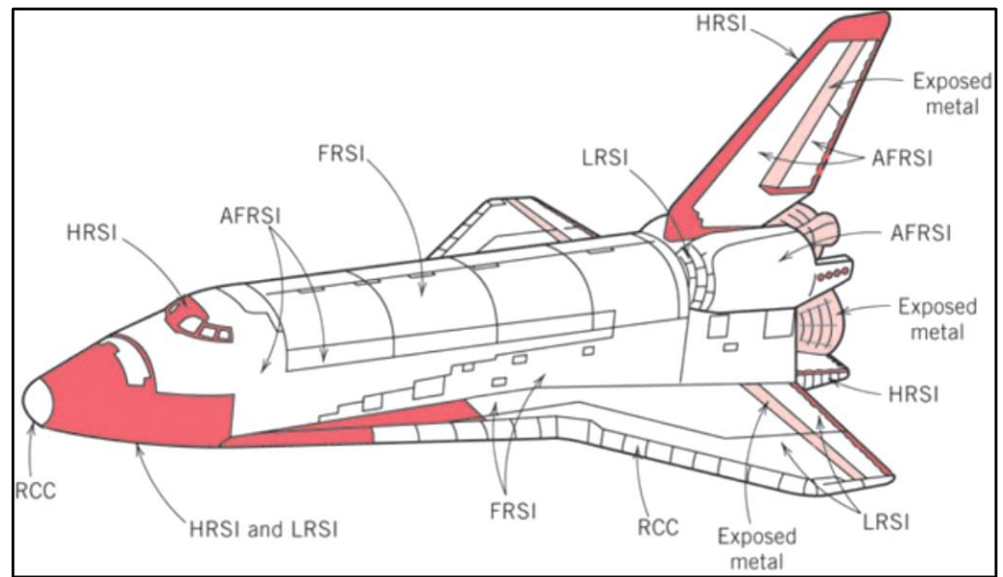


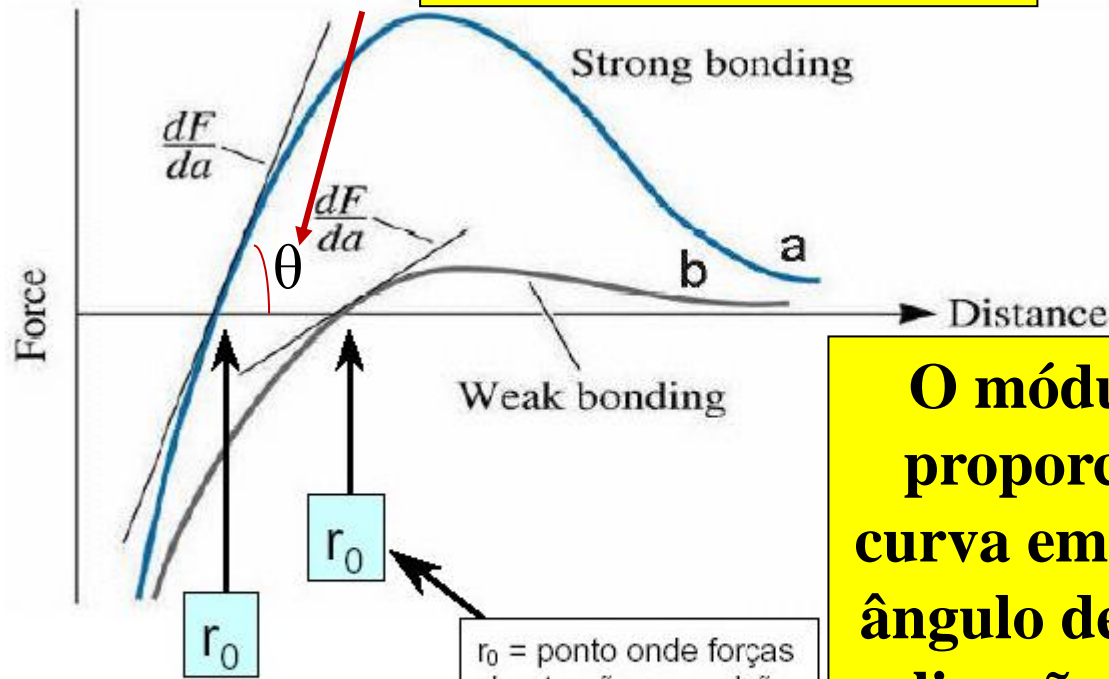
Table 20.5 Thermal Protection Systems Employed on the Space Shuttle Orbiter

<i>Material Generic Name</i>	<i>Minimum Operating Temperature, °C (°F)</i>	<i>Maximum Operating Temperature, °C (°F)</i>	<i>Material Composition</i>	<i>Orbiter Locations</i>
Felt reusable surface insulation (FRSI)	-130 (-200)	400 (750)	Nylon felt, silicone rubber coating	Wing upper surface, upper sides, cargo bay doors
Advanced flexible reusable surface insulation (AFRSI)	-130 (-200)	815 (1500)	Quartz batting sandwiched between quartz and glass fabrics	Upper surface regions
Low-temperature reusable surface insulation (LRSI)	-130 (-200)	650 (1200)	Silica tiles, borosilicate glass coating	Upper wing surfaces, tail surfaces, upper vehicle sides
High-temperature reusable surface insulation (HRSI)	-130 (-200)	1260 (2300)	Silica tiles, borosilicate glass coating with SiB ₄ added	Lower surfaces and sides, tail leading and trailing edges
Reinforced carbon-carbon (RCC)	No lower limit identified	1650 (3000)	Pyrolyzed carbon-carbon, coated with SiC	Nose cap and wing leading edges

Source: Adapted from L. J. Korb, C. A. Morant, R. M. Calland and C. S. Thatcher, "The Shuttle Orbiter Thermal Protection System," *Ceramic Bulletin*, No. 11, Nov. 1981, p. 1188. Copyright 1981. Reprinted by permission of the American Ceramic Society.

Propriedades mecânicas: módulo de Elasticidade

ligação forte: maior E



Módulo de elasticidade



E

r_0 = ponto onde forças de atração e repulsão são iguais

Obs.: o módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que será estudada em detalhe mais à frente no curso

O módulo de elasticidade é proporcional à derivada da curva em $r=r_0$: quanto maior o ângulo de inclinação da curva, ligações mais fortes, maior módulo de elasticidade.

Material a tem maior módulo que material b!

MATERIAL	LIGAÇÃO	PROPRIEDADES
<p>Cerâmicos: óxidos, silicatos, nitretos</p>	<p>Iônica ou covalente</p>	<p>Alta resistência mecânica e dureza, frágil, isolante térmico e elétrico, alta temperatura de fusão.</p>
<p>Metálicos: metais puros, ligas ferrosas e não ferrosas.</p>	<p>Metálica</p>	<p>Média a alta resistência mecânica e dureza, boa ductilidade, condutor térmico e elétrico, ampla faixa de temperatura de fusão.</p>
<p>Polímeros: plásticos (termoplásticos e termorrígidos), elastômeros (borrachas)</p>	<p>Covalente e ligações secundárias (Van der Waals, pontes de hidrogênio, dipolos permanentes)</p>	<p>Baixa resistência mecânica e dureza, alta ductilidade, isolante térmico e elétrico, baixa estabilidade térmica</p>
<p>Compósitos: união de duas ou mais classes de materiais</p>	<p>complexa</p>	<p>Depende do tipo.</p>

**OS ÁTOMOS, LIGADOS, ORGANIZAM-SE EM
ESTRUTURAS: SÓLIDOS AMORFOS OU
CRISTALINOS.**

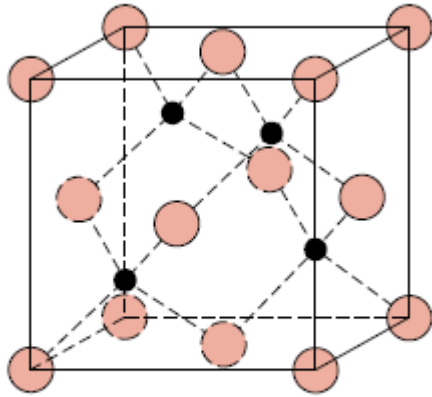
**AS PROPRIEDADES TÊM ORIGEM NA
COMBINAÇÃO DA LIGAÇÃO QUÍMICA COM A
ESTRUTURA DOS MATERIAIS!!!**

De acordo com a **distribuição espacial** dos átomos, moléculas ou íons, os sólidos podem ser:

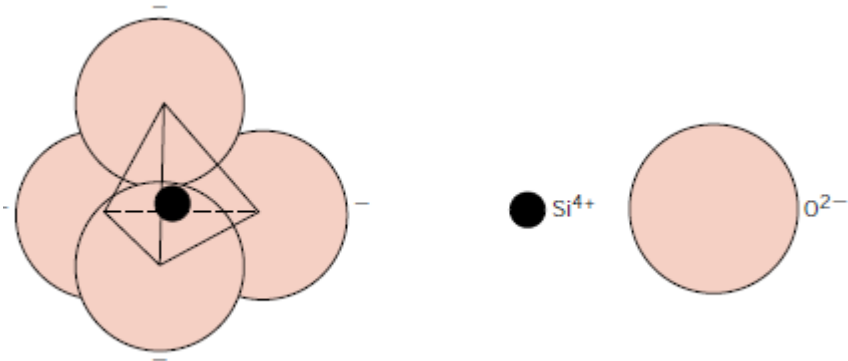
- **Amorfos:** arranjo de curto alcance (“*short-range array*”);
- **Cristalinos:** arranjo periódico tridimensional, que se repete ao longo do material, arranjo de longo alcance (“*long-range array*”);
- **Semi-cristalinos:** uma parte com arranjo periódico e outra com arranjo de **curto alcance** (alguns polímeros).

- **“Quase-cristais”**. Um quase-cristal ou **quasicristal** é um sólido cujo espectro de difração de **raios-X** é similar ao das **redes cristalinas**, porém sua estrutura é **não-periódica**. **Relativamente comuns em ligas metálicas**. **Maus condutores da eletricidade e extremamente duros e resistentes à deformação**. **Ideais para aplicações em revestimentos antiaderentes**. **Os quase-cristais foram descobertos por Dan Shechtman em 1982, lhe rendeu o Nobel de Química em 2011**.

Cerâmica cristalina: blenda de zinco e enxofre

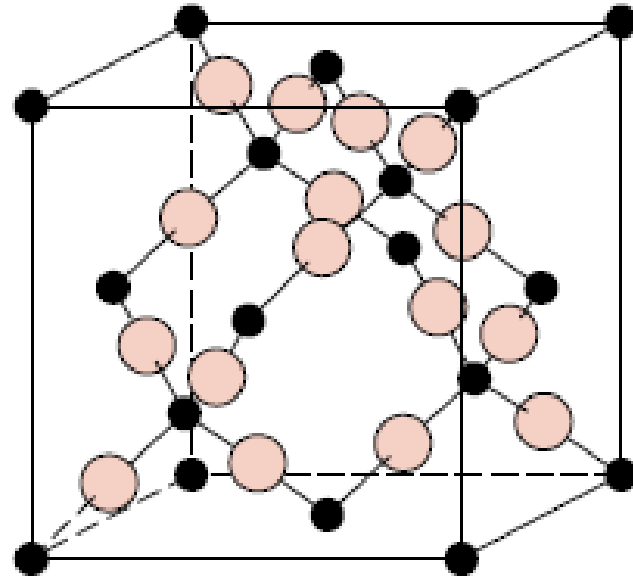


● Zn ○ S



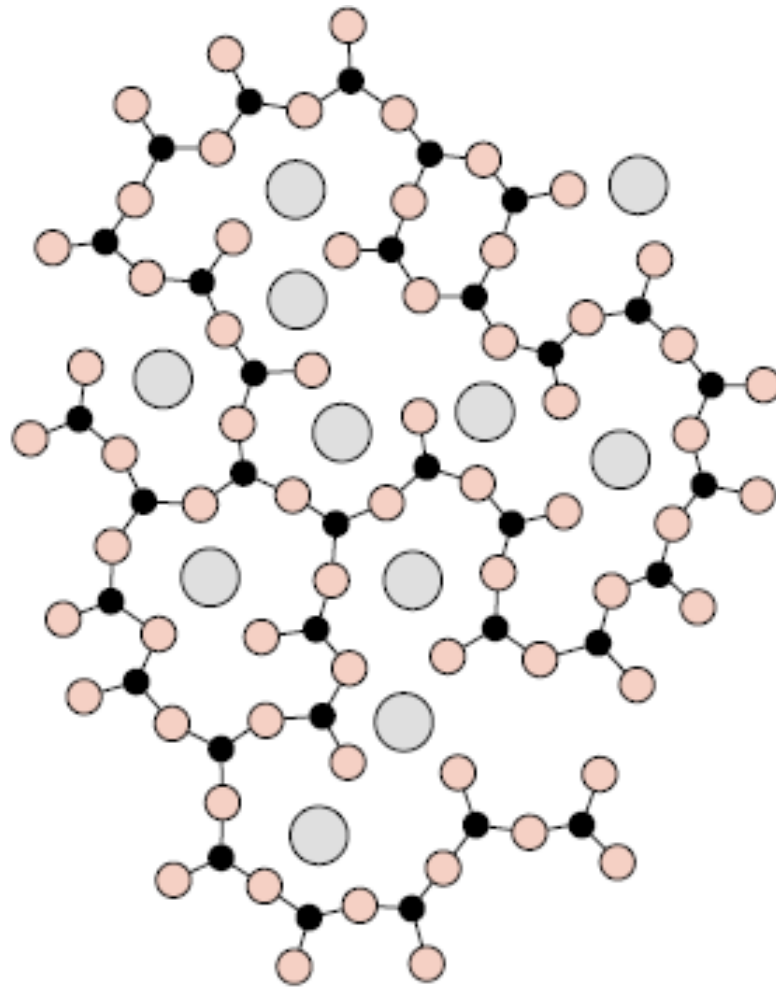
TETRAEDRO: Si-O

Cristal molecular: tetraedros são dispostos de forma regular e ordenada: formas cristalinas polimórficas primárias de **sílica: quartzo, cristobalita, tridimita**



● Si⁴⁺ ○ O²⁻

Vidro de Sílica: amorfo

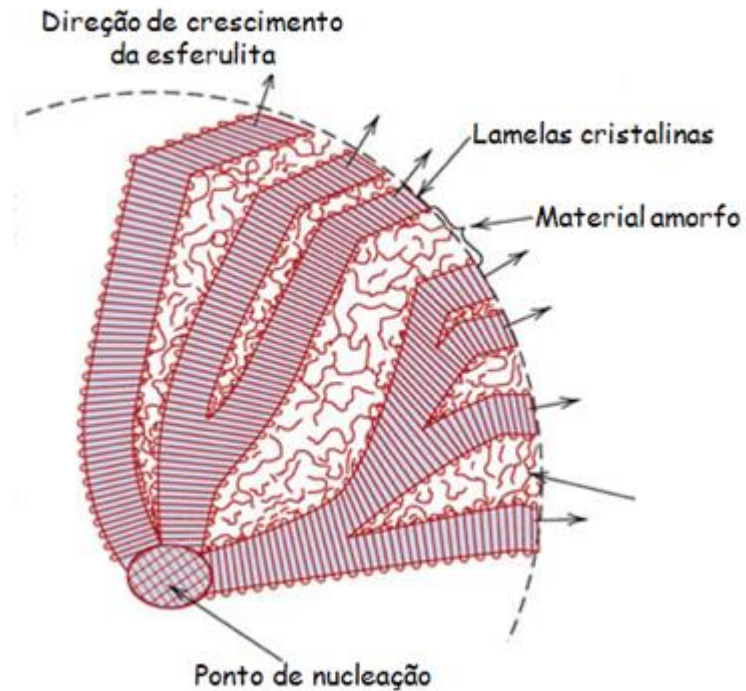
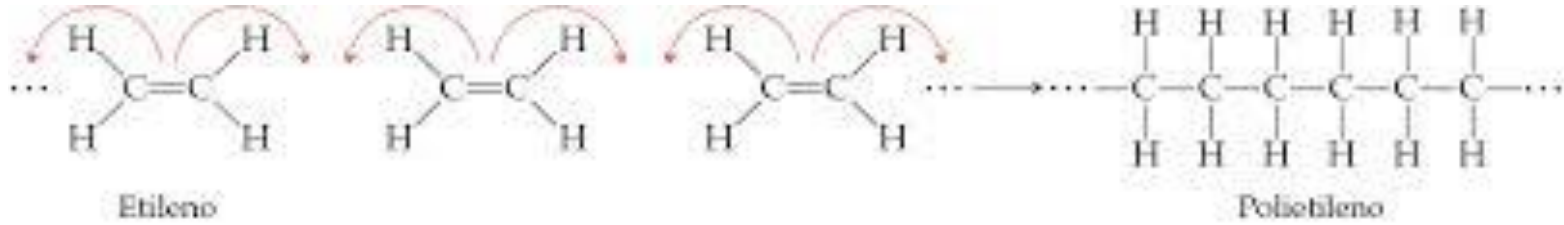


● Si⁴⁺

○ O²⁻

○ Na⁺

POLIETILENO- SEMI-CRISTALINO-PEAD (60-80%) E PEBD (40-50%)



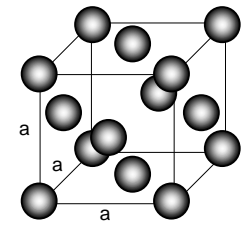
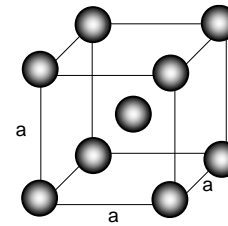
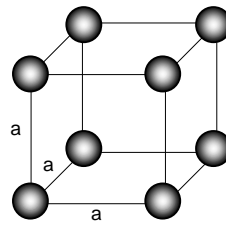
REDES DE BRAVAIS

Auguste Bravais

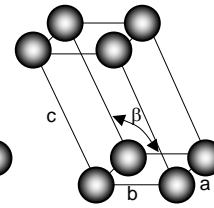
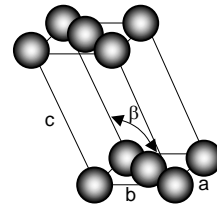
publicou em 1850 o

trabalho:

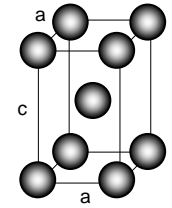
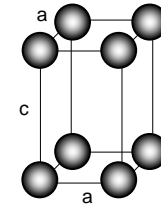
*Systemes formés par des
points distribués
régulièrement sur un
plan ou dans l'espace.*



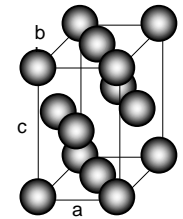
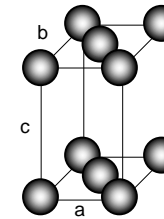
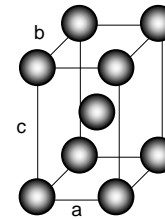
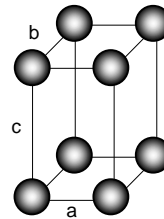
CÚBICO



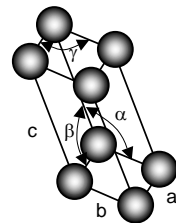
MONOCLÍNICO



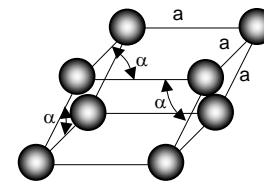
TETRAGONAL



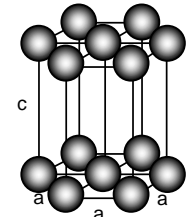
ORTORRÔMBICO



TRICLÍNICO

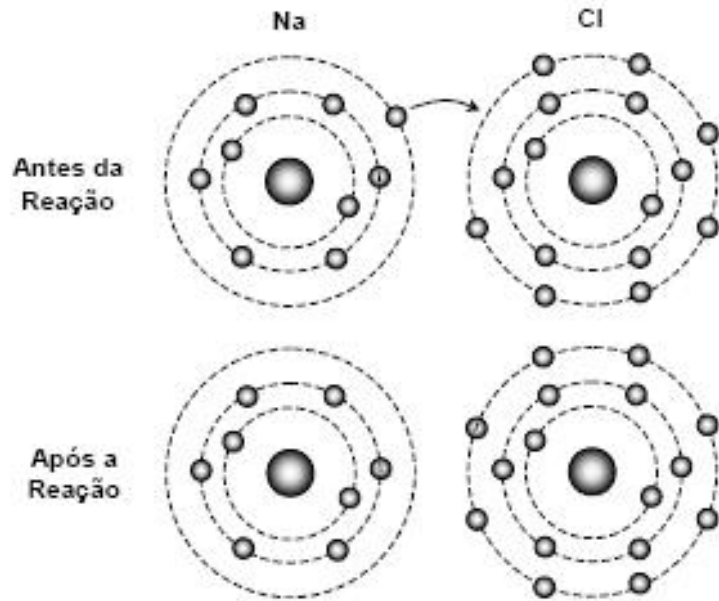


ROMBOÉDRICO

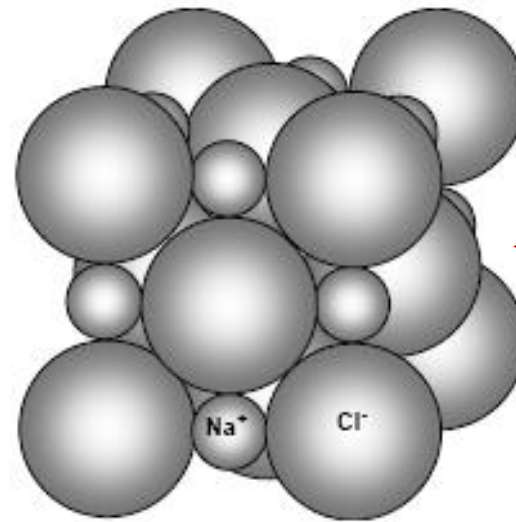


HEXAGONAL

Ligação iônica: rígida-interação eletrostática-Lei de Coulomb



(a)



(b)

**SÓLIDO
COM
LIGAÇÃO
IÔNICA EM
REDE
CRISTALINA**

CÉLULA UNITÁRIA

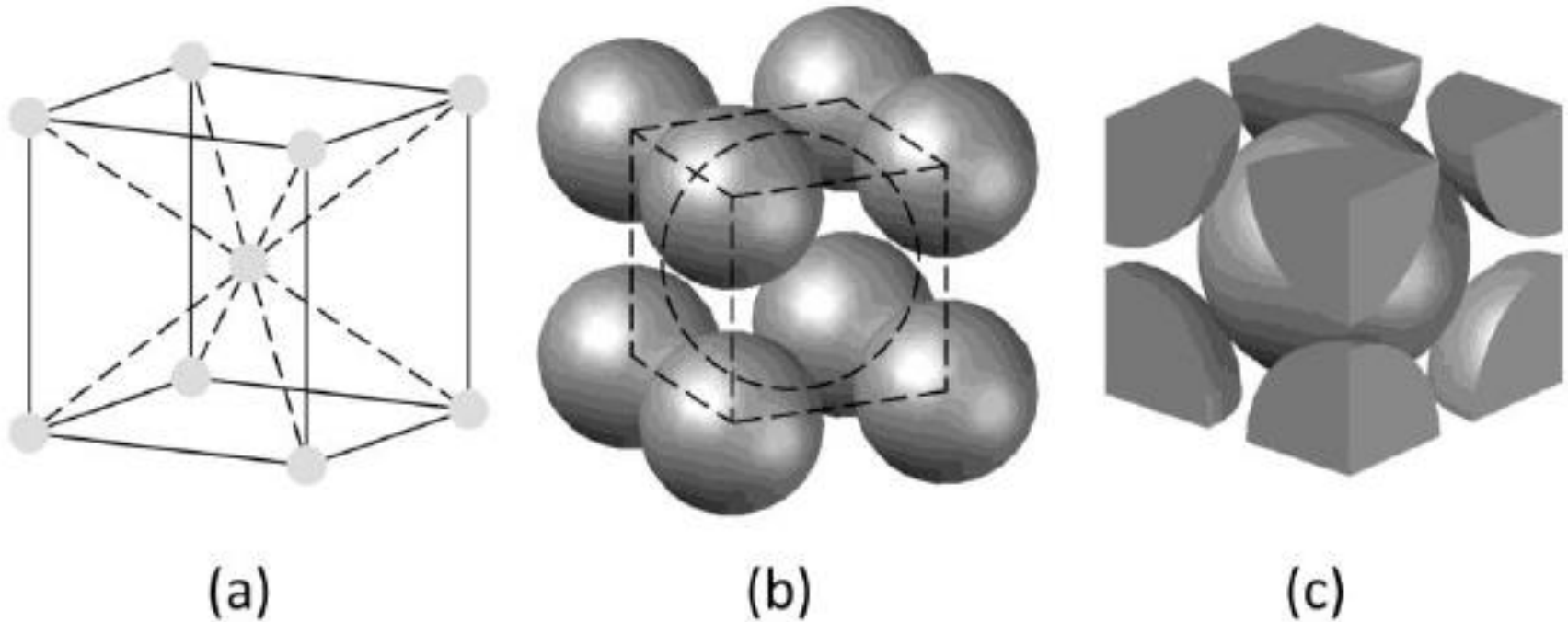
90% dos materiais metálicos se cristaliza em estruturas densas:

- **Cúbica de Corpo Centrado (CCC) ou *Body Centered Cubic (BCC)*;**
- **Cúbica de faces centradas (CFC) ou *Face Centered Cubic (FCC)*;**
- **Hexagonal Compacta (HC) ou *Hexagonal Close Packed (HCP)***

Sólidos cristalinos de único elemento:

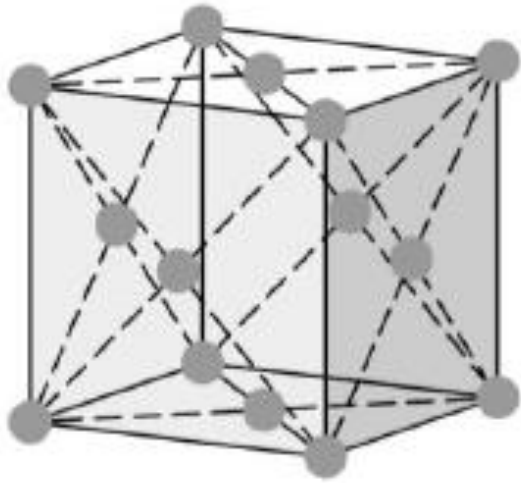
- **52%: estrutura cúbica;**
- **28%: estrutura hexagonal;**
- **20%: 5 outros tipos de estruturas (base: redes de Bravais).**

ESTRUTURA CCC: A DENSIDADE ESTÁ RELACIONADA À ESTRUTURA (FEA: 68%)

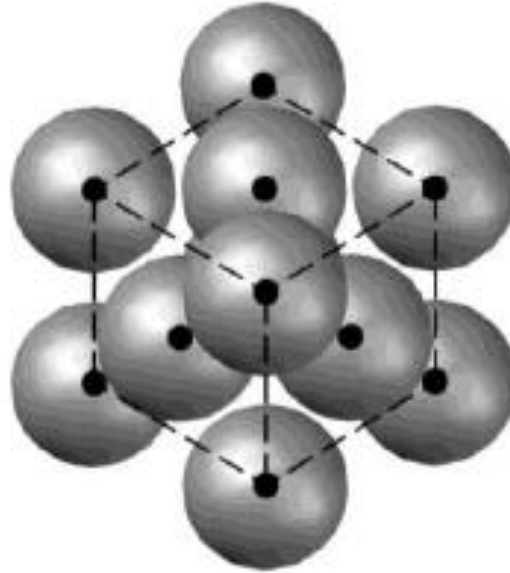


Estrutura CCC: Células unitárias: (a) posições atômicas na célula unitária, (b) célula unitária com esferas rígidas, e (c) célula unitária isolada. [Smith, 2012].

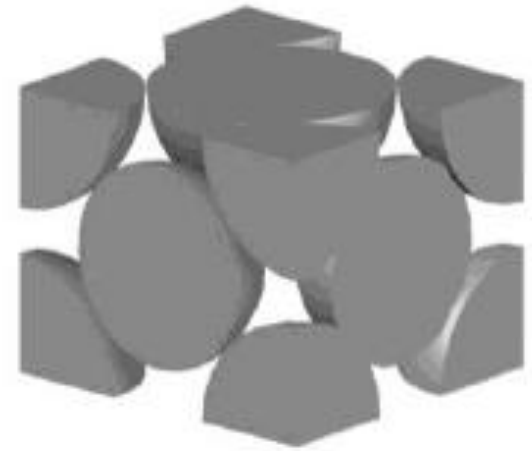
ESTRUTURA CFC: MAIS DENSO QUE O CCC. FEA:74%.



(a)



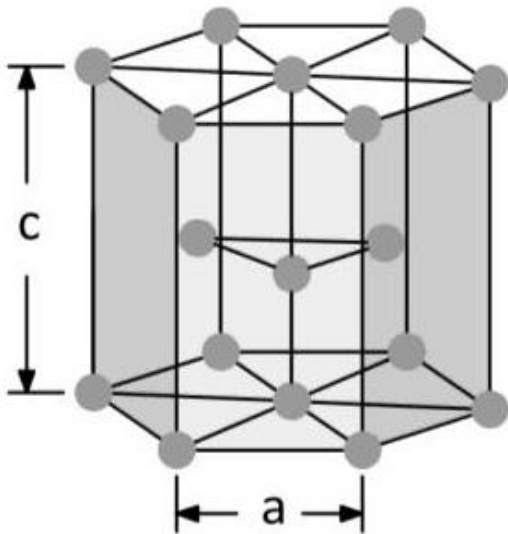
(b)



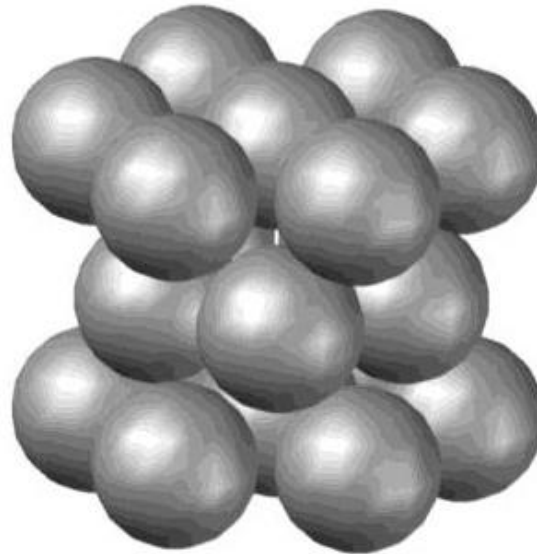
(c)

Estrutura CFC: Células unitárias CFC: (a) posições atômicas na célula unitária, (b) célula unitária com esferas rígidas, e (c) célula unitária isolada. [Smith, 2012].

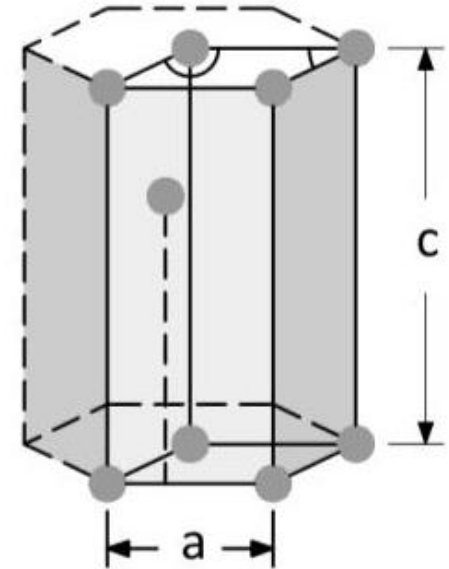
ESTRUTURA HC: MAIS DENSO QUE O CCC. FEA:74%.



(a)



(b)



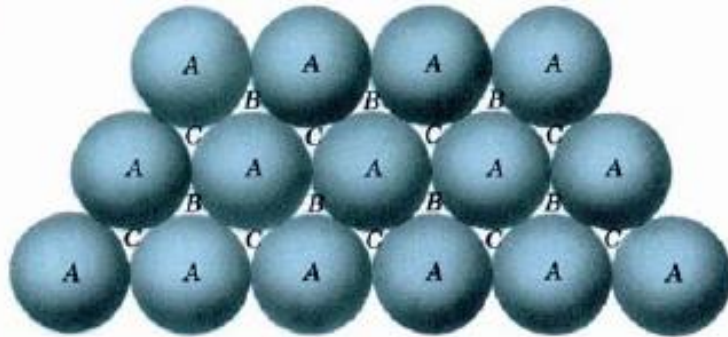
(c)

Estrutura HC: Células unitárias HC: (a) posições atômicas na célula unitária, (b) célula unitária com esferas rígidas, e (c) célula unitária isolada. [Smith, 2012].

Estrutura cristalina e propriedades físicas de alguns elementos.

Elemento	Símbolo	Número Atômico	Massa Atômica (g/mol)	Densidade à 20 °C (g/m³)	Estrutura Cristalina à 20 °C	Raio Atômico (nm)
Alumínio	Al	13	26,98	2,70	CFC	0,143
Ferro	Fe	26	55,85	7,87	CCC	0,124
Chumbo	Pb	82	207,20	11,36	CFC	0,175
Cobalto	Co	27	58,93	8,83	CCC	0,125
Cobre	Cu	29	63,54	8,93	CFC	0,128
Cromo	Cr	24	51,99	7,19	CCC	0,125
Enxofre	S	16	32,06	2,07	Ortorrômbica	0,104
Titânio	Ti	22	47,88	4,51	HC	0,148
Tungstênio	W	74	183,85	19,25	CCC	0,137
Urânio	U	92	238,03	19,05	Ortorrômbica	0,138
Vanádio	Va	23	50,94	6,10	CCC	0,132
Zinco	Zn	30	65,38	7,13	HC	0,133
Zircônio	Zr	40	91,22	6,51	HC	0,159

FORMAÇÃO DA ESTRUTURA COMPACTA-HC



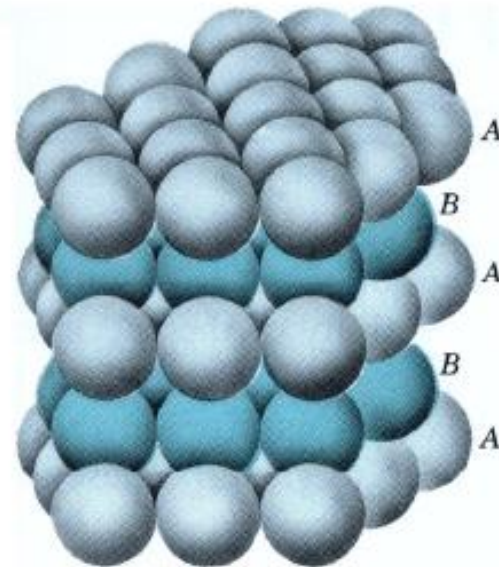
(a)

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



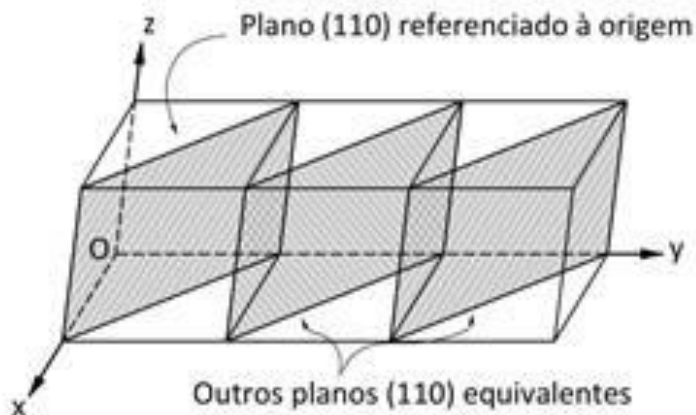
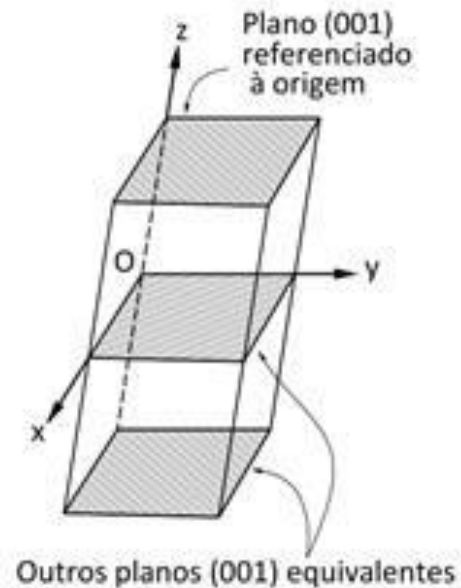
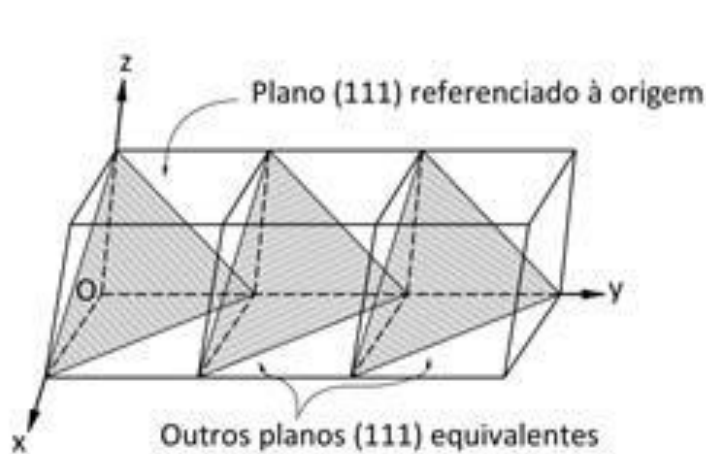
(b)

Empilhamento de dois planos compactos.



Empilhamento de planos compactos formando uma estrutura HC.

A existência de **propriedades dependentes** da orientação **crystalográfica** resulta na necessidade de se determinar **direções e planos** em um cristal.

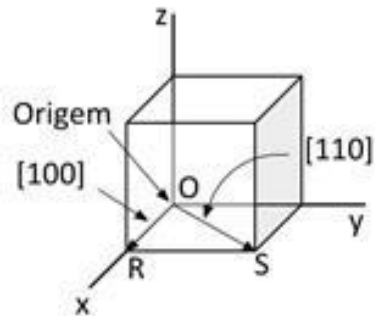


Nota: uma família de planos, como por exemplo $(\bar{1}11)$, $(1\bar{1}1)$, $(11\bar{1})$, $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(\bar{1}1\bar{1})$, $(1\bar{1}\bar{1})$ e $(11\bar{1})$ é representada por $\{111\}$.

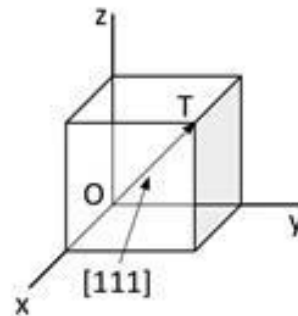
Planos cristalográficos em estruturas cúbicas.

O estudo dos **planos atômicos** é feito matematicamente, como em **geometria**, e aqui são utilizados os **índices de Miller**, propostos em 1839 (*A Treatise on Crystallography*) pelo **mineralogista William Hallowes Miller**: **inverso dos interceptos** do plano cristalográfico.

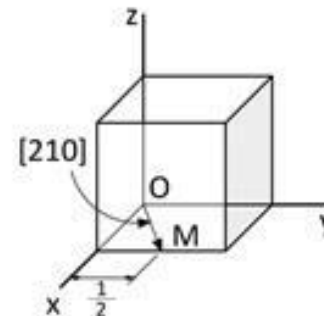
Os **planos atômicos**: **índices de Miller entre parênteses**. Na rede cristalina **CFC**, o **plano mais compacto**: **(111)**. **Planos** cristalograficamente **equivalentes** são **agrupados em famílias** e são representados pelos **índices de Miller entre chaves**. Assim, a **família do plano (111)** é representada por **{111}**. **Direções** cristalográficas são representadas por **colchetes** e as **famílias** por **colchetes angulados**. Exemplo: direção **[111]**, família **<111>**.



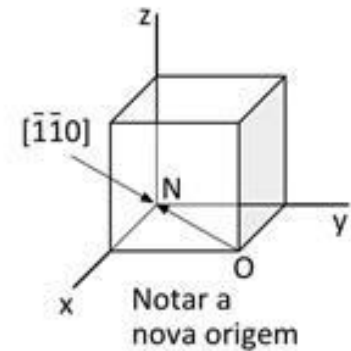
(a)



(b)



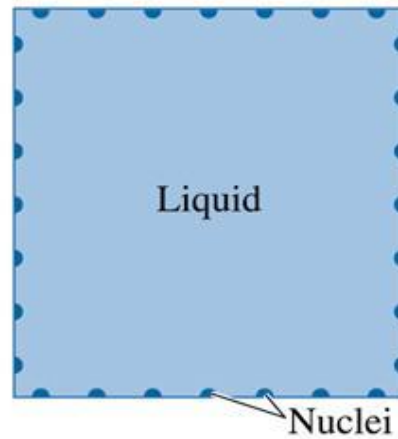
(c)



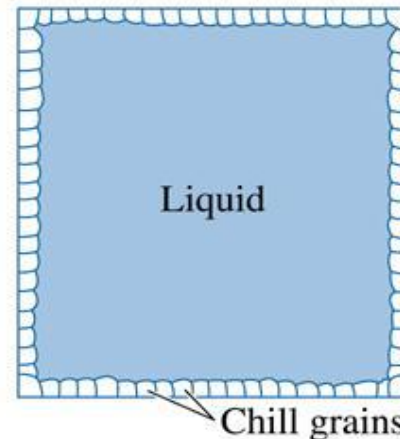
(d)

Uma **direção** em uma **célula unitária** é determinada a partir de um **vetor** que parte da **origem** e atinge a **posição** definida pelas **coordenadas** consideradas.

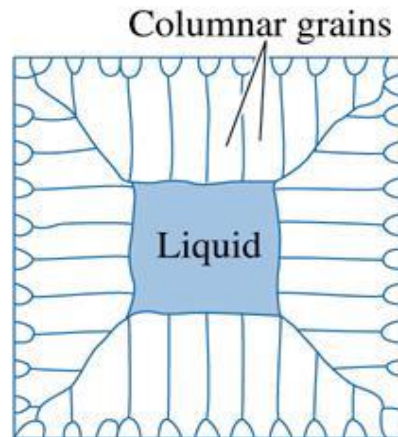
Desenvolvimento da estrutura cristalina em um lingote fundido durante o processo de fundição



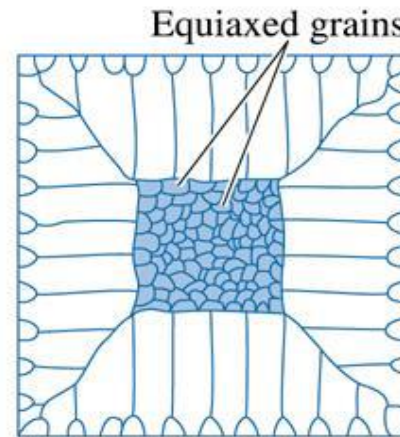
(a)



(b)



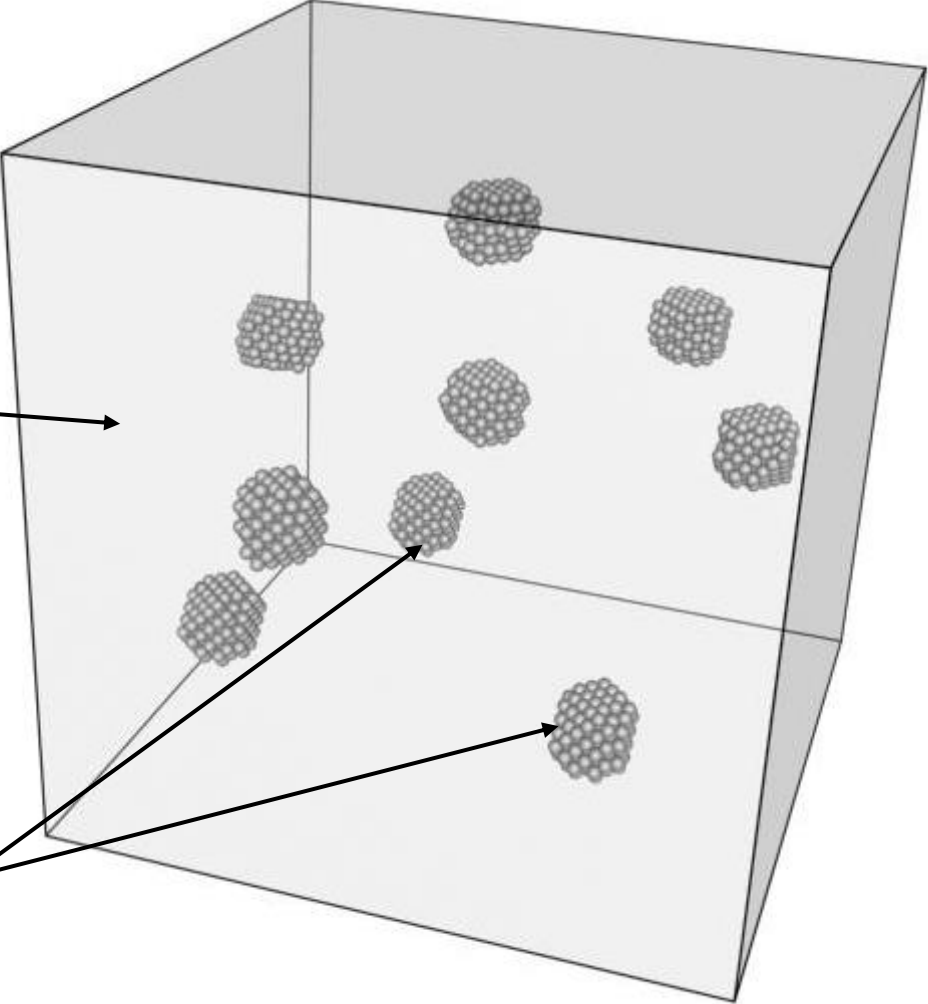
(c)



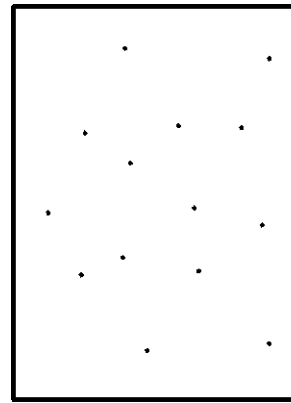
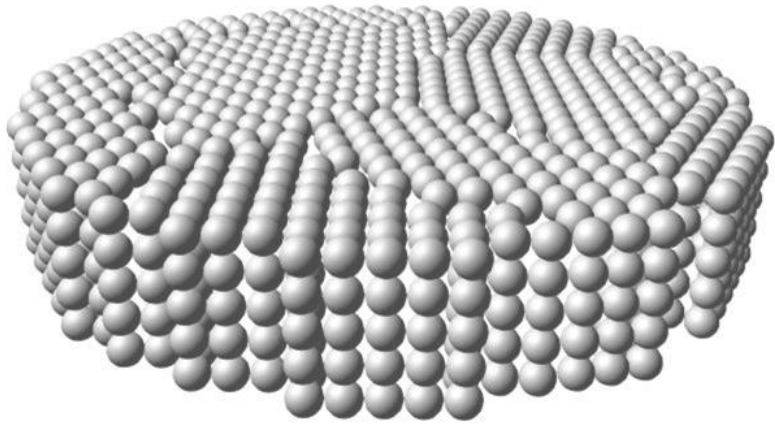
(d)

Formação dos grãos cristalinos (Solidificação)

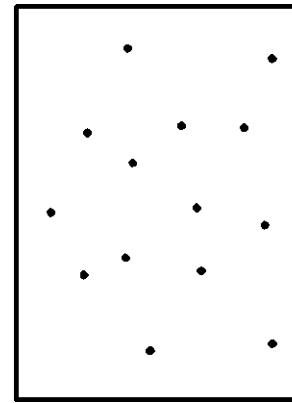
LÍQUIDO



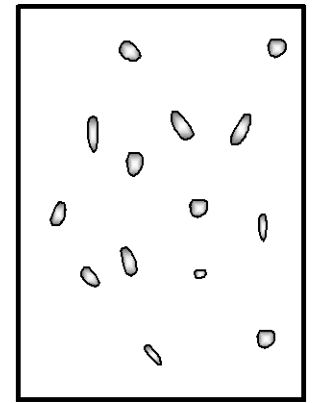
EMBRIÕES DA FASE SÓLIDA



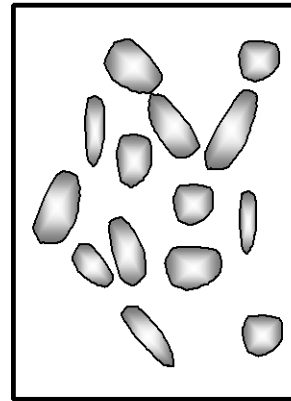
(a)



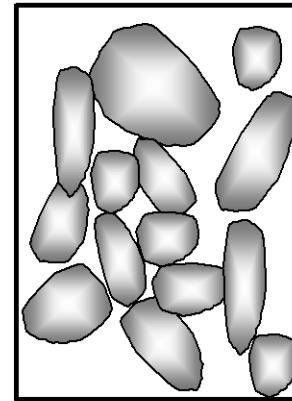
(b)



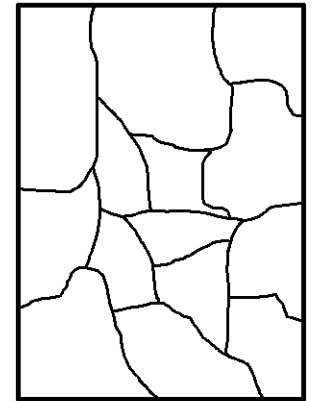
(c)



(d)



(e)

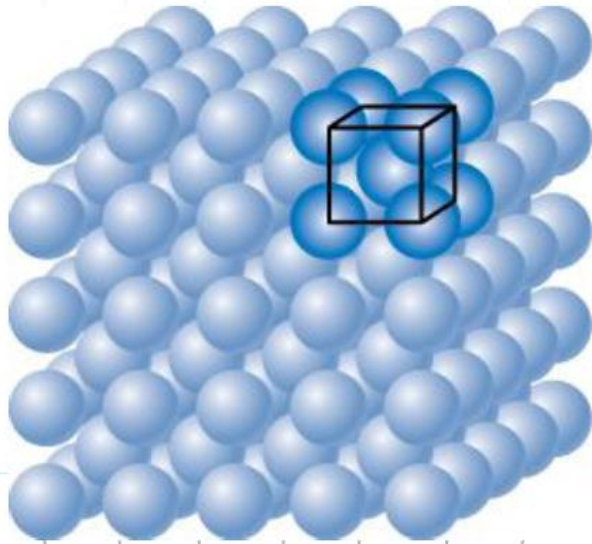


(f)

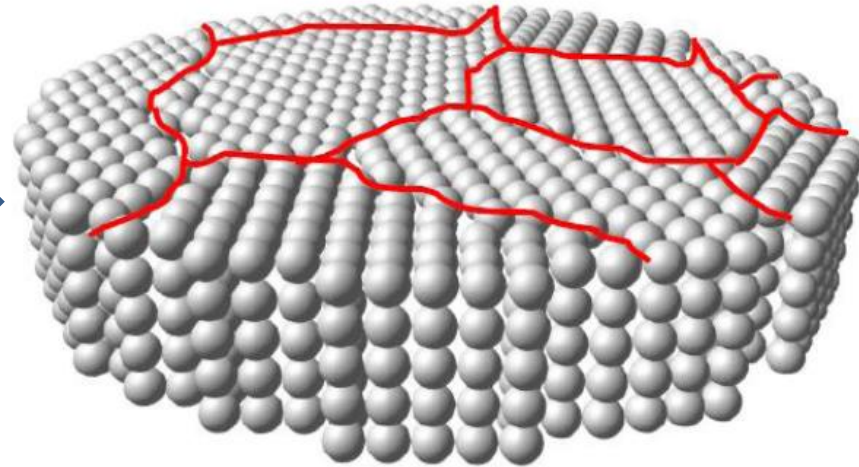
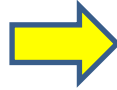
Formação de um material policristalino:

- (a) Surgem os **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
- (f) **Contornos dos grãos** cristalinos.

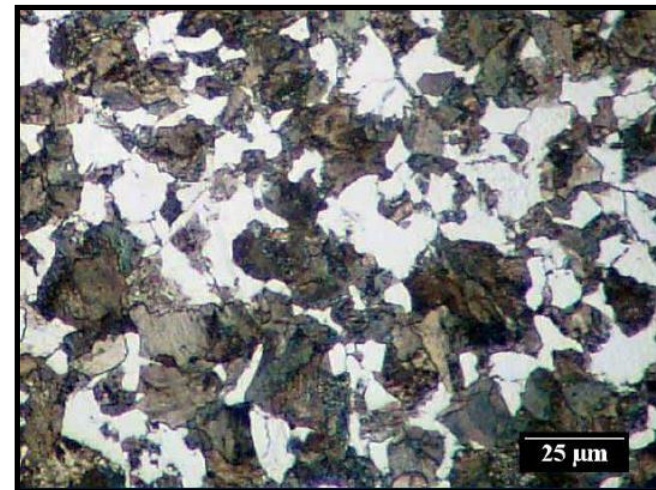
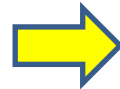
FORMAÇÃO DOS GRÃOS- TG ESTÁ RELACIONADO ÀS PROPRIEDADES MECÂNICAS



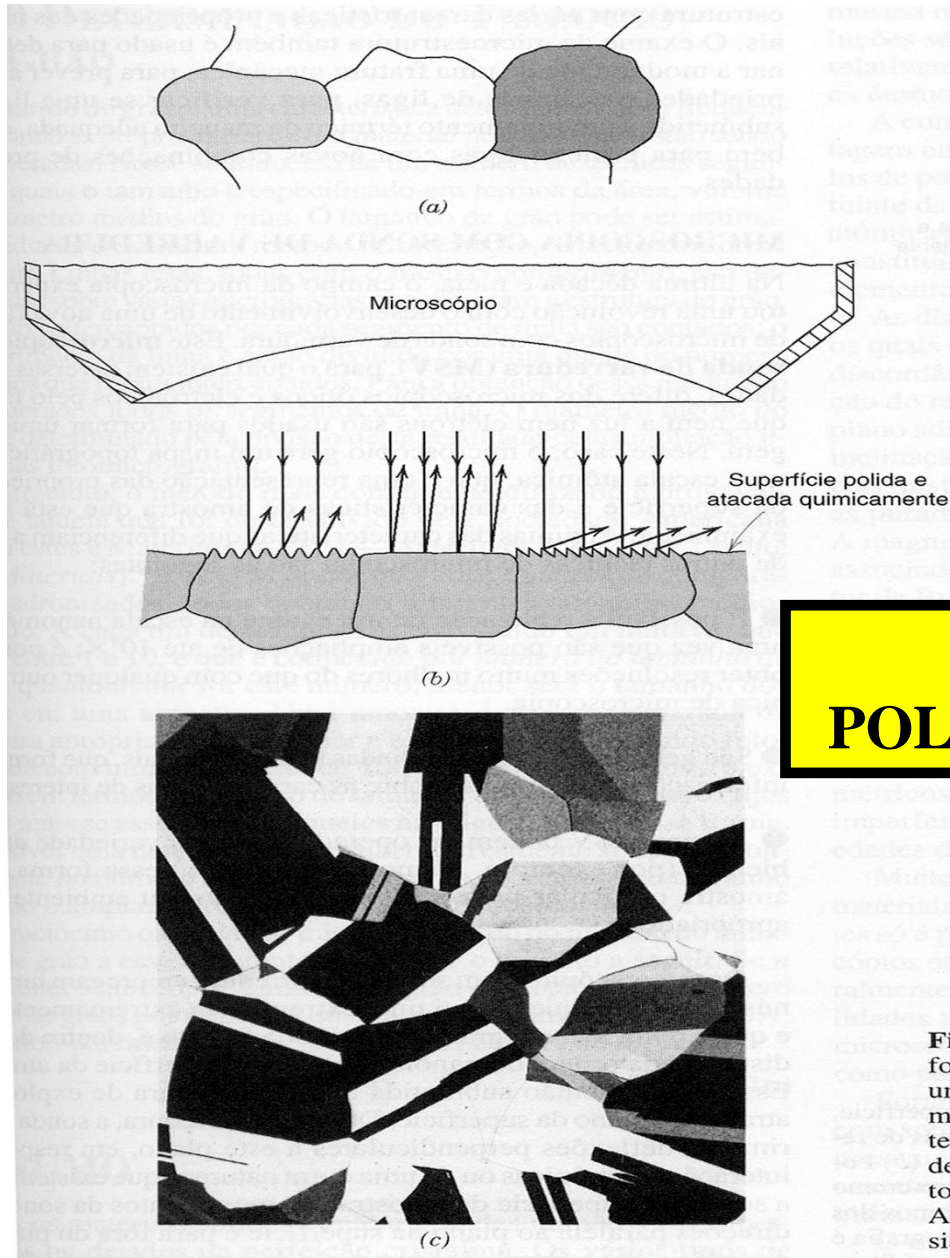
(Callister, cap.3)



(Apostila Prof.Dr. Rubens Caram)

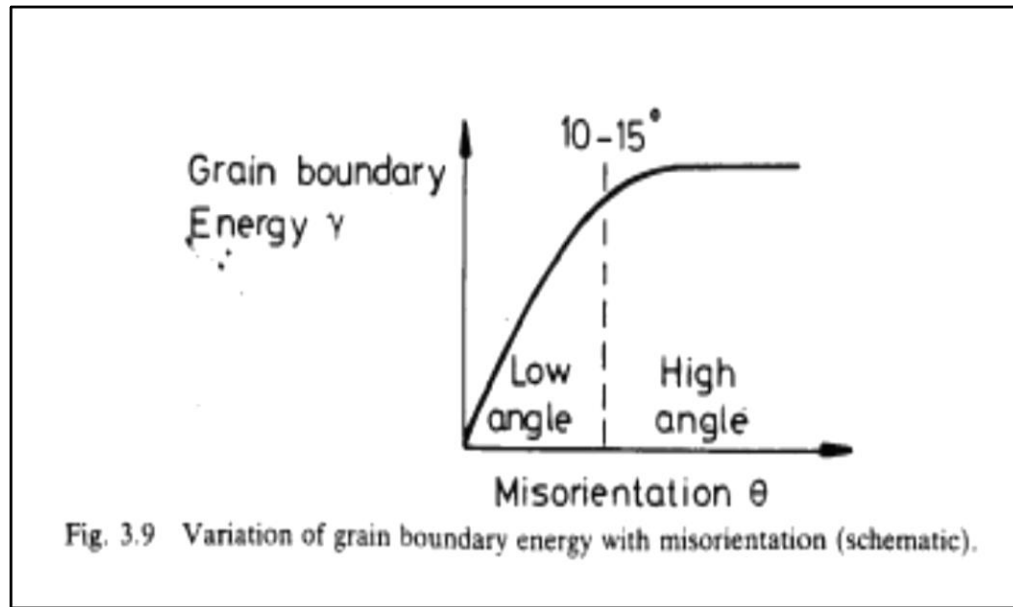
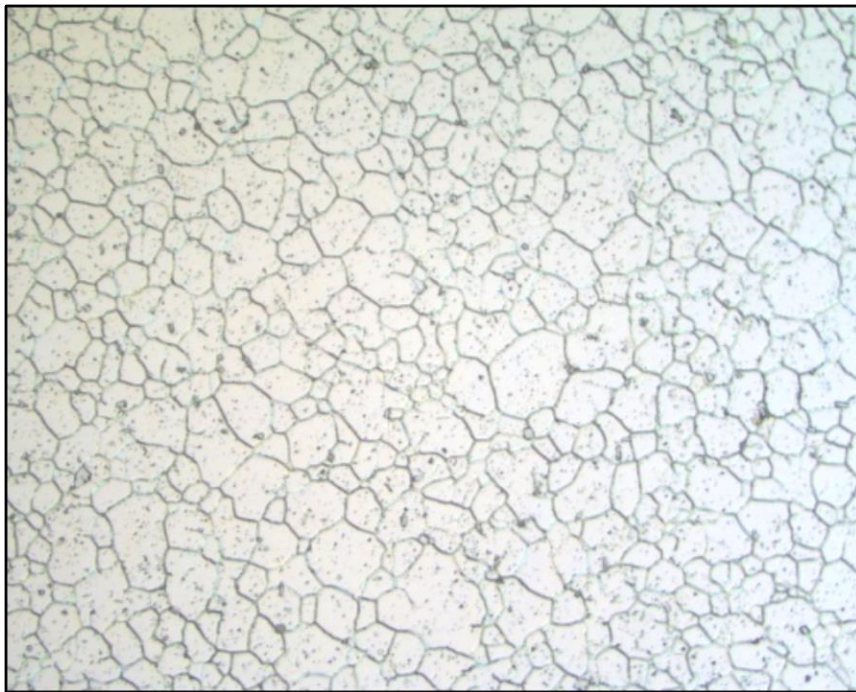


PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

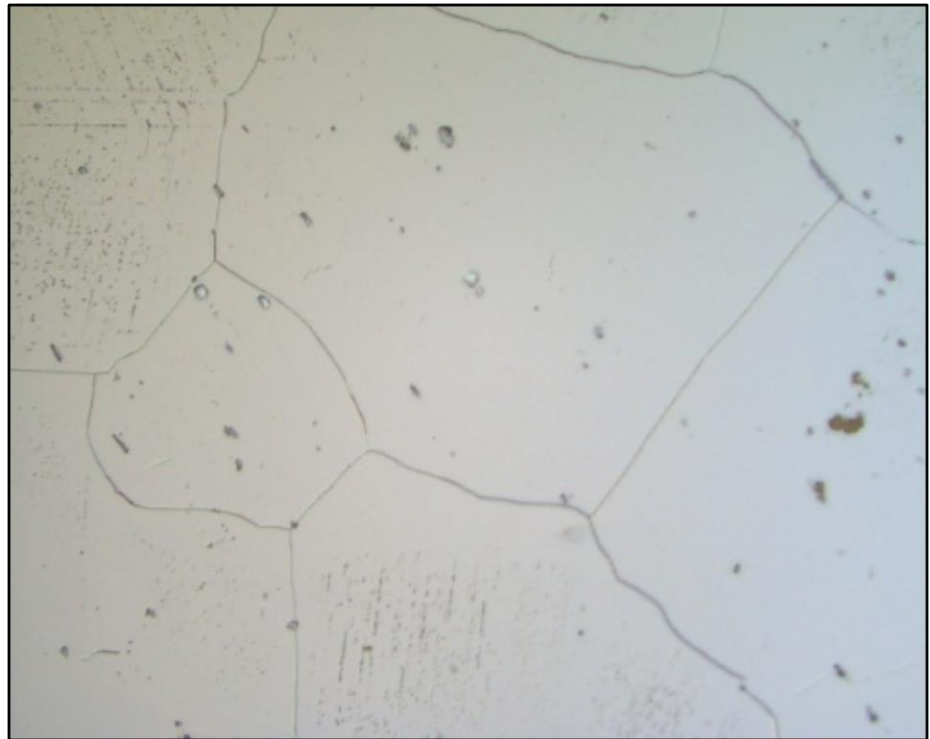


LIXAMENTO, POLIMENTO, ATAQUE

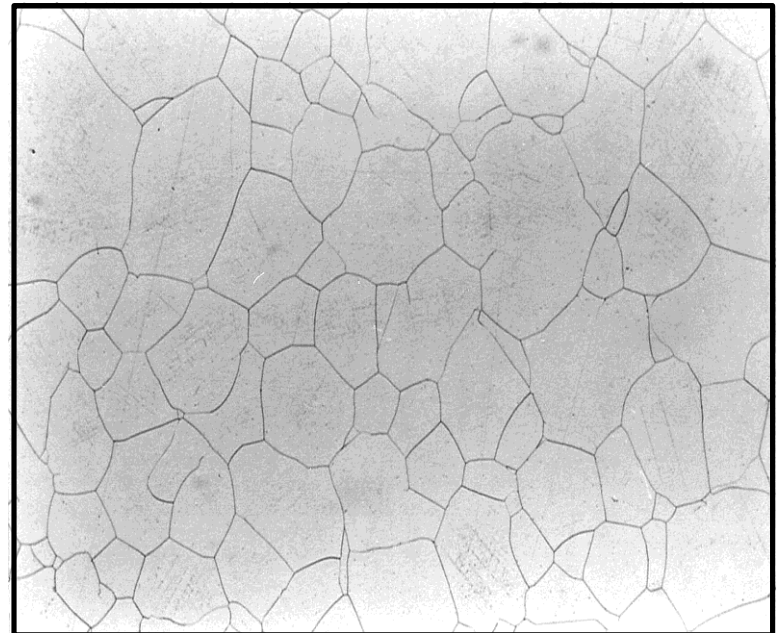
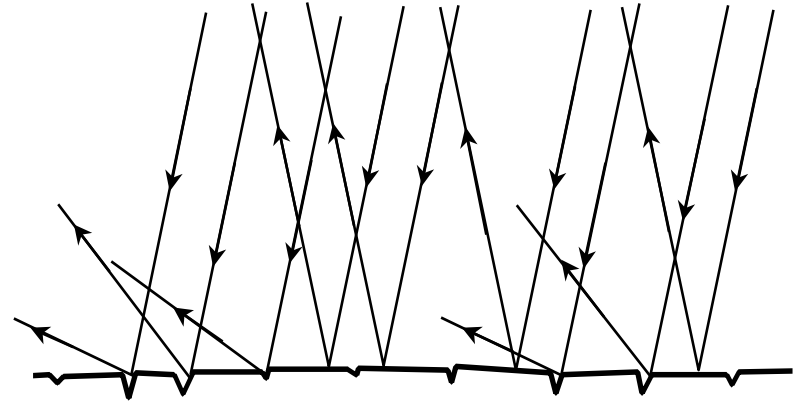
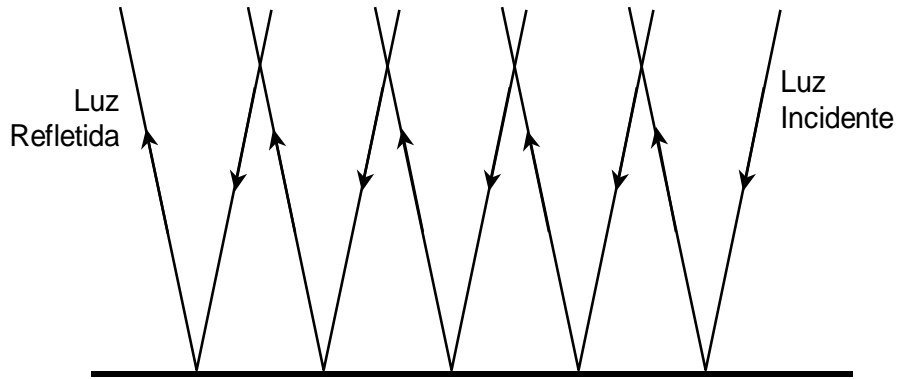
Fig. 4.11 (a) Grãos polidos e atacados quimicamente da forma como eles aparecem quando são vistos através de um microscópio ótico. (b) Seção feita através desses grãos mostrando como as características do ataque químico e a textura da superfície resultante variam de grão para grão devido a diferenças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



CONTORNO DE GRÃO DE ALTO ÂNGULO



FORMAÇÃO DE IMAGEM NO MICROSCÓPIO ÓPTICO



TAMANHO DE GRÃO (TG)-ASTM E 112

$$N=2^{n-1}$$

N: n° grãos/pol²

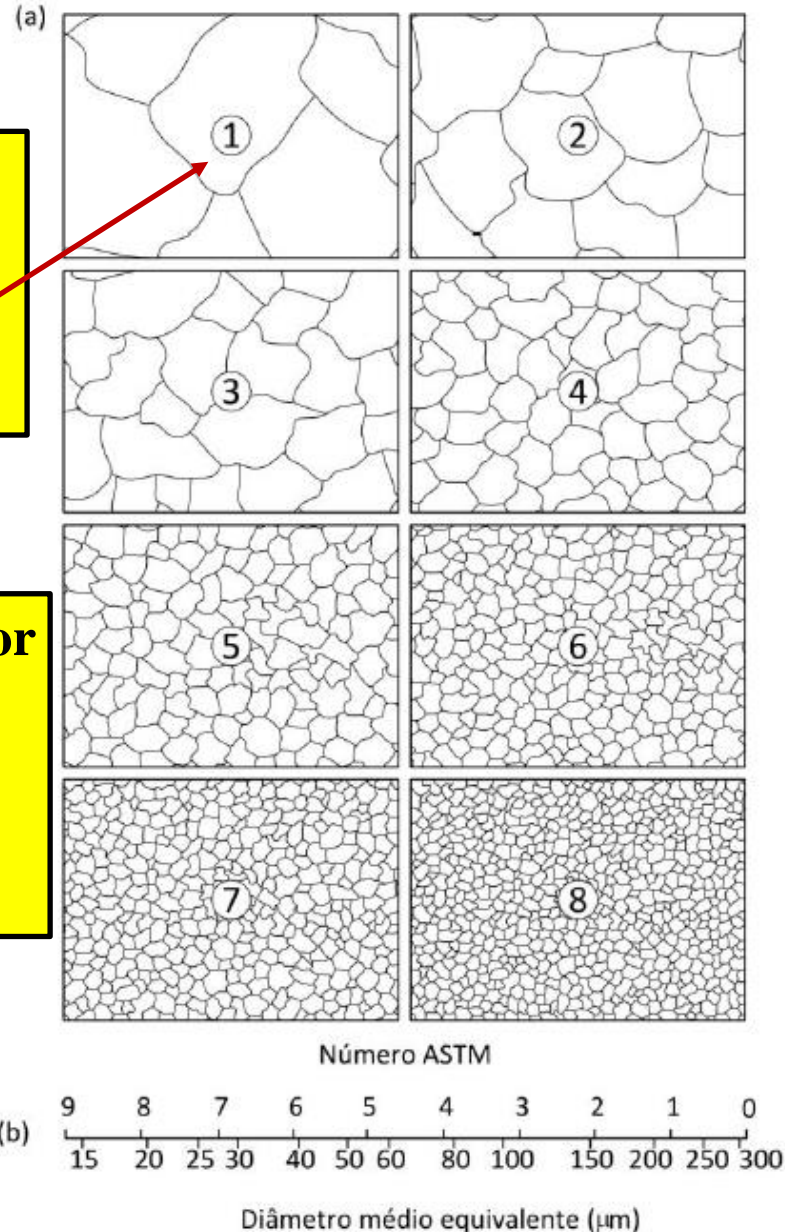
n: tamanho de grão ASTM

Quanto maior o número ASTM menor é o diâmetro médio do grão.

EX:

ASTM 5 – diâmetro médio: 55μm;


ASTM 8 – diâmetro médio: 20μm.





Designation: E112 – 96 (Reapproved 2004)^{ε2}

Standard Test Methods for Determining Average Grain Size¹

 E112 – 96 (2004)^{ε2}

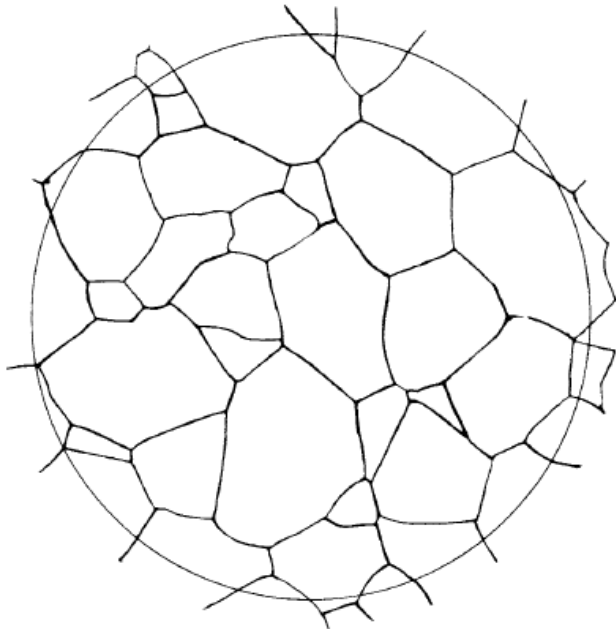


FIG. 1 Example of Untwinned Grains (Flat Etch) from Plate I.
Grain Size No. 3 at 100X

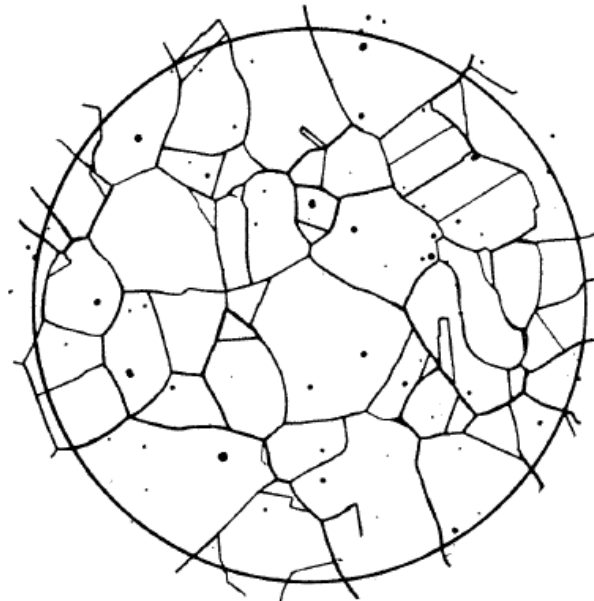
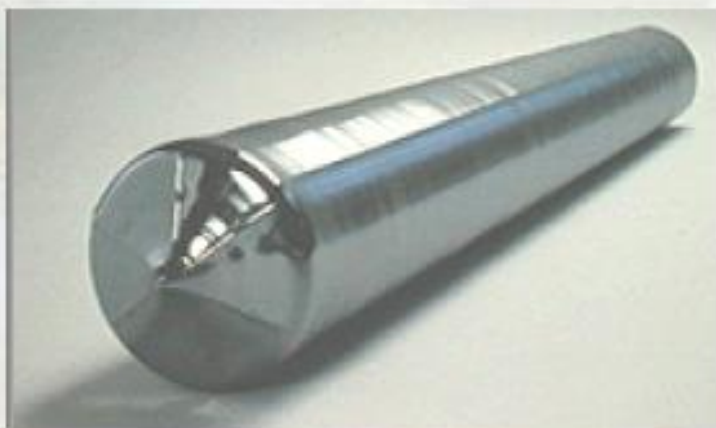
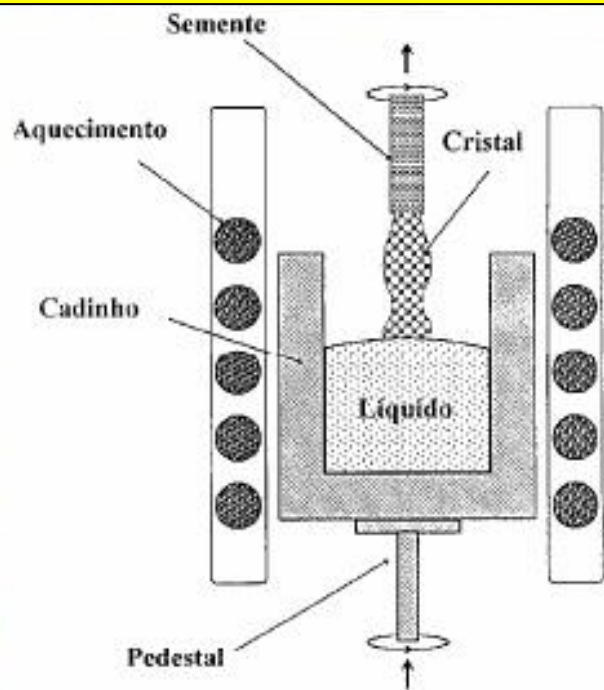
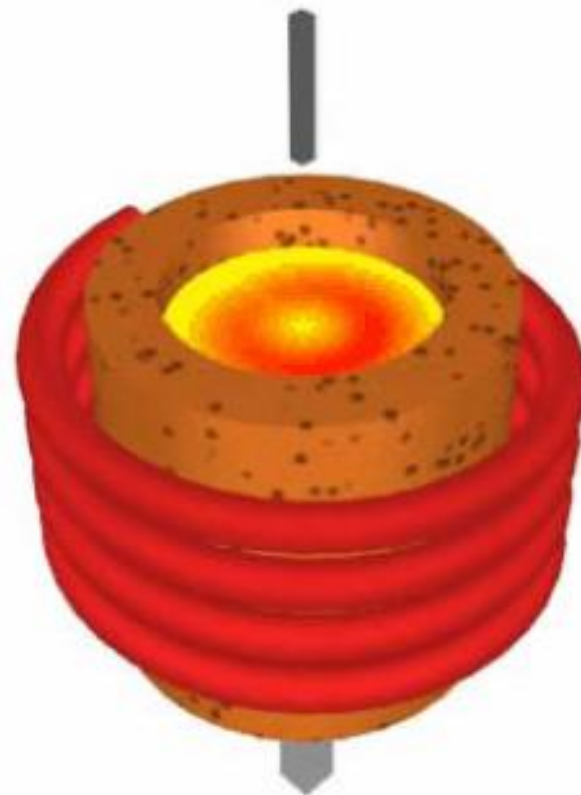


FIG. 2 Example of Twin Grains (Flat Etch) from Plate II. Grain
Size No. 3 at 100X

ALGUNS MATERIAIS NÃO SÃO POLICRISTALINOS: MONOCRISTAIS- PROCESSO CZOCHRALSKI

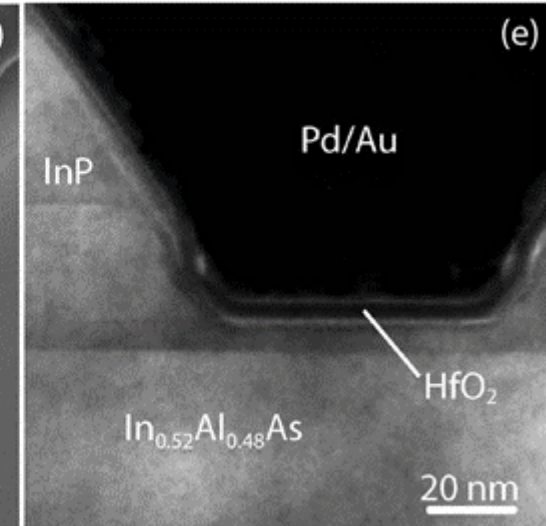
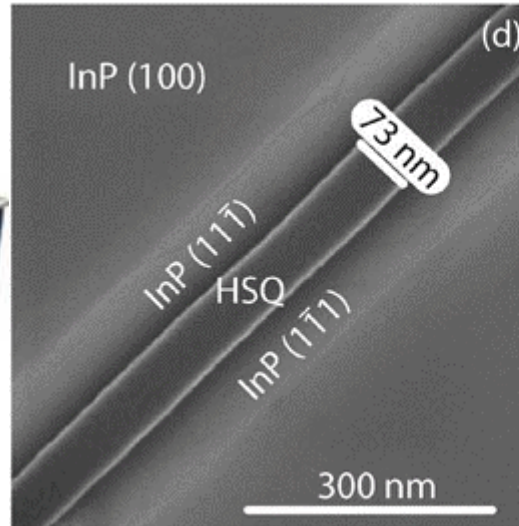
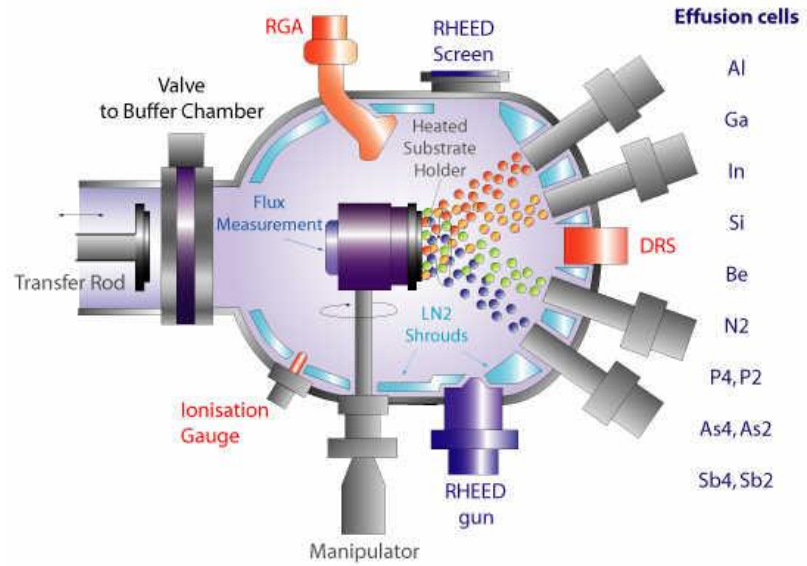
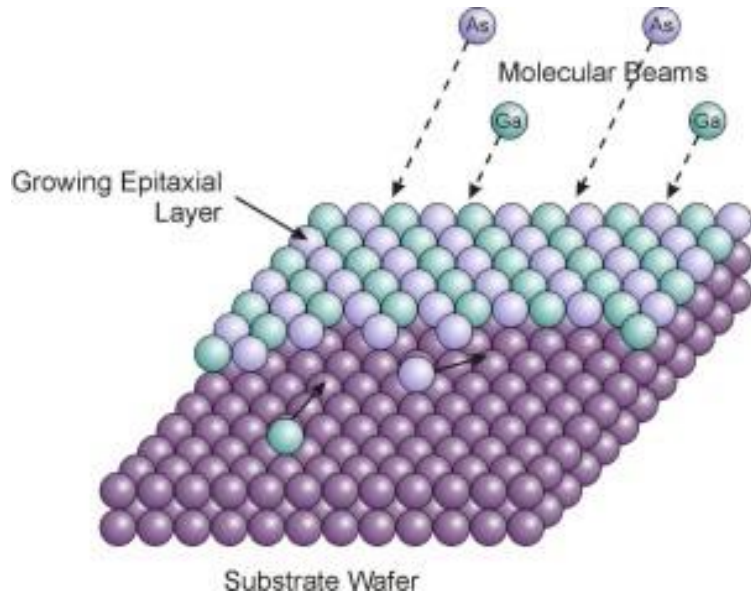


Si Mono-cristalino



PROPRIEDADES ELETRÔNICAS

MONOCRISTAIS - MOLECULAR BEAM EPITAXY - MBE



PROPRIEDADES ELETRÔNICAS

FIM