



# ECM1 2019

Lauralice de C. F. Canale

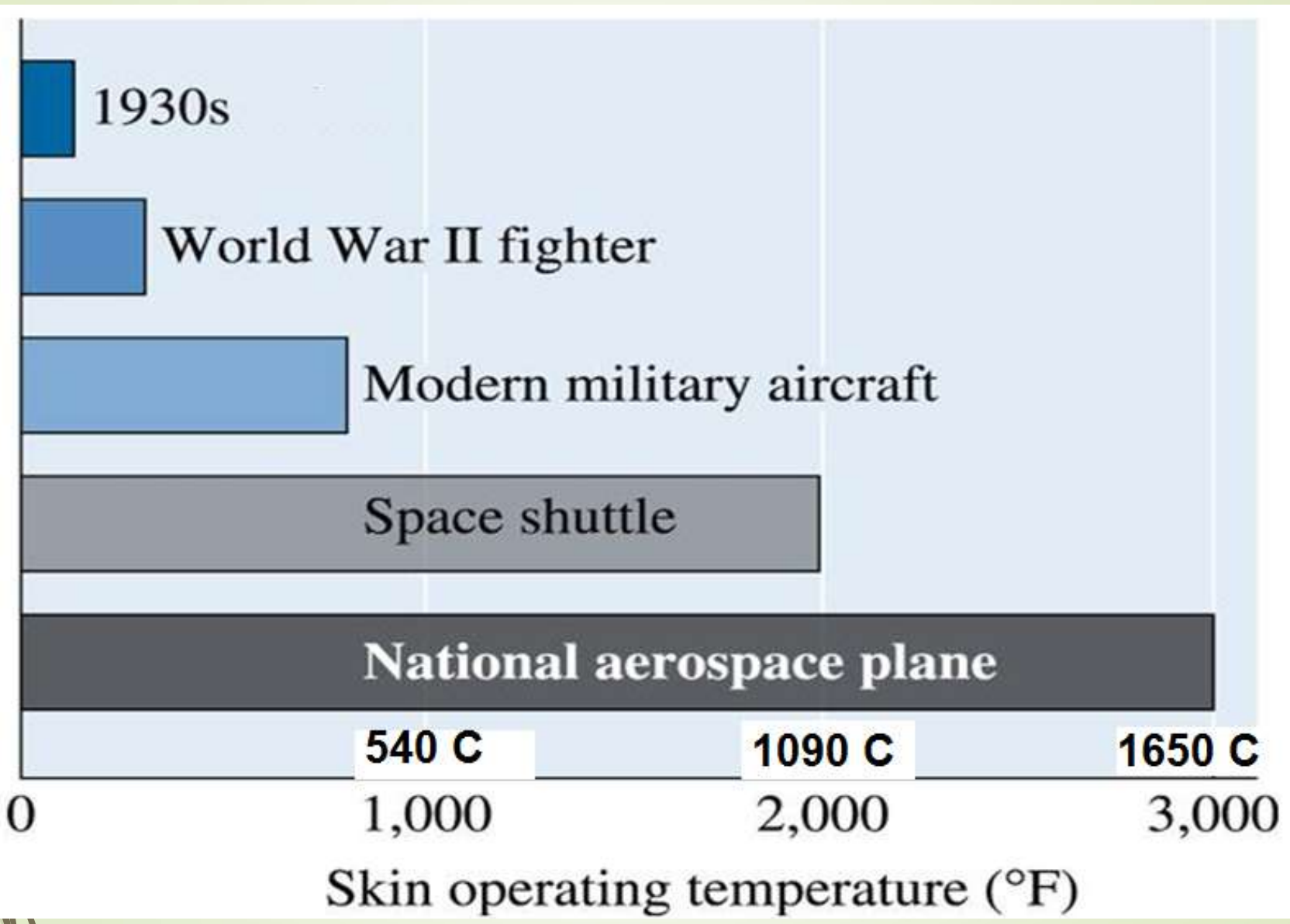
Depto de Eng Materiais

EESC-USP

Os materiais estão praticamente envolvidos em todas as atividades humanas.

A criação de novas tecnologias ou ainda o melhoramento no desenvolvimento de produtos e processos está intimamente relacionada ao surgimento de novas sociedades, que os utiliza em todos os setores: transporte, construção

civil, energia, produção de alimentos, vestuário, etc. O surgimento do automóvel não seria possível se na época o aço não estivesse disponível a baixo custo e com propriedades adequadas a sua aplicação.



1930s

World War II fighter

Modern military aircraft

Space shuttle

**National aerospace plane**

540 C

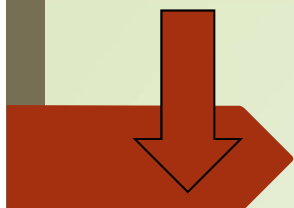
1090 C

1650 C

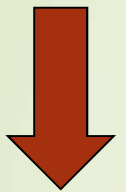
Skin operating temperature (°F)

**Busca-se sempre a produção de materiais mais eficientes , seguros, de menor custo e que preservem o meio ambiente, seja na sua produção, seja na sua utilização.**

**Redução de peso dos veículos com a utilização de ligas de Al nos motores em substituição aos fofos.**



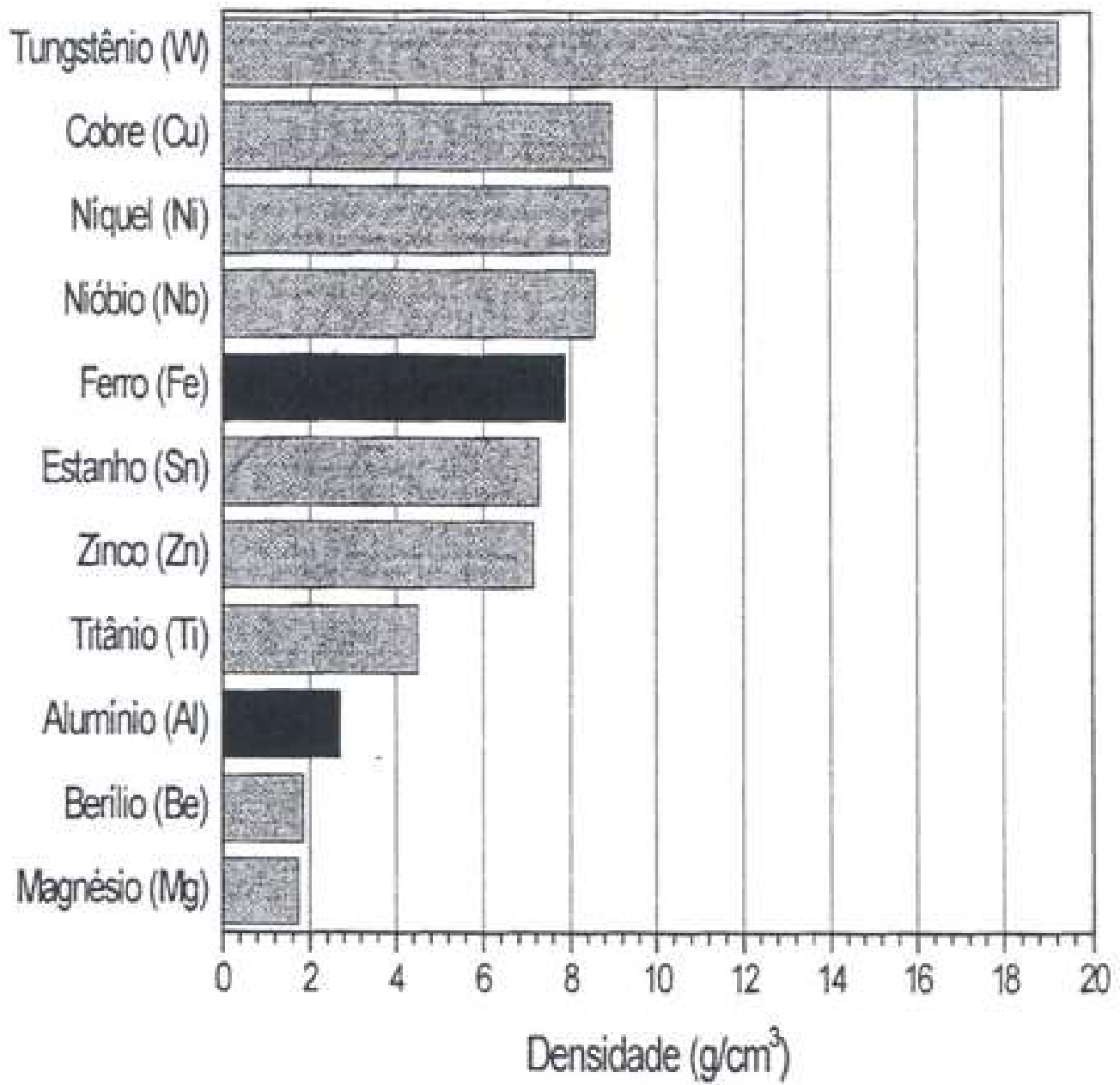
PESO



CONSUMO



EMISSÃO  
DE  
POLUENTES

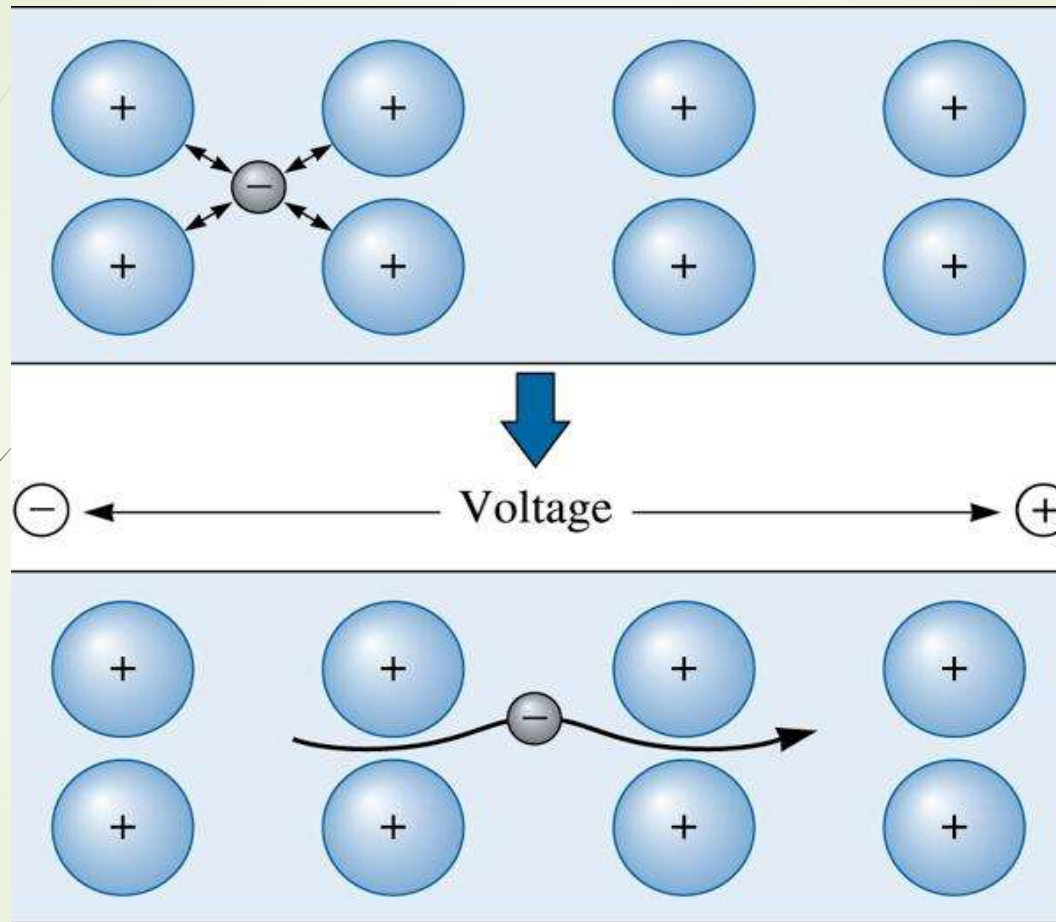


**Materiais metálicos são geralmente constituídos por elementos químicos metálicos.**

**Nesses materiais existem elétrons de grande mobilidade por causa da ligação metálica entre os átomos, o que lhes confere algumas propriedades típicas:**

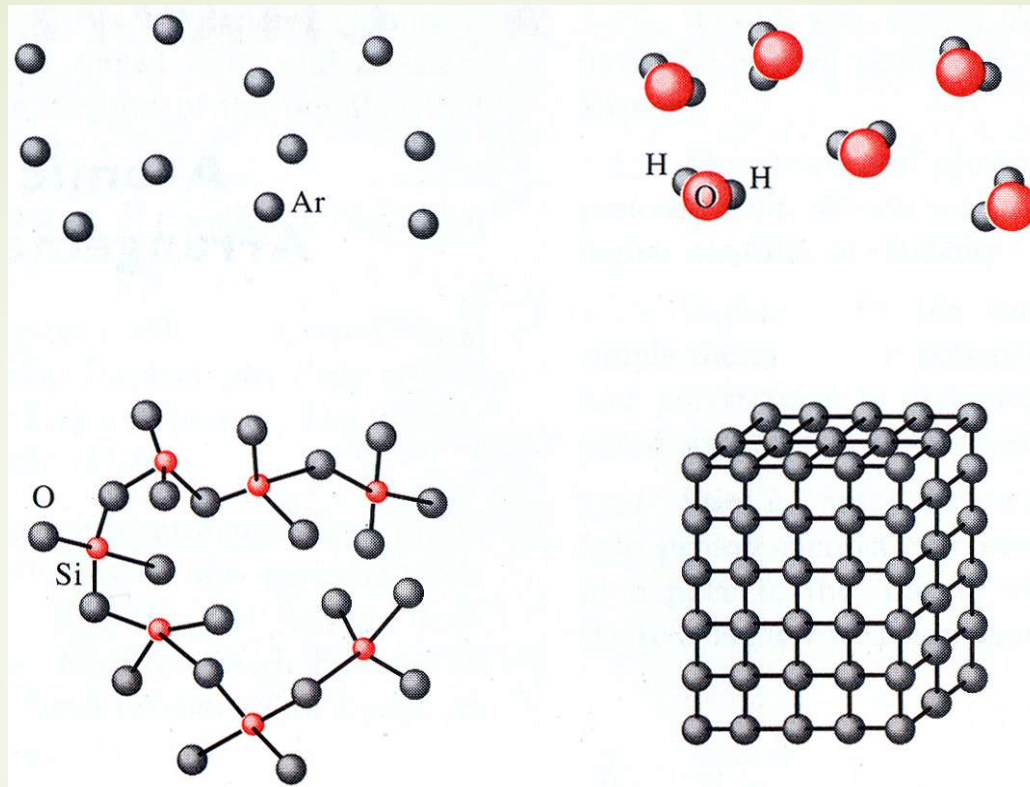
**alta condutividade térmica e elétrica.**

# LIGAÇÃO METÁLICA



**Quando uma voltagem é aplicada ao metal, os elétrons da nuvem comum aos átomos podem mover-se facilmente e criar uma corrente.**

# ESTRUTURA DOS SÓLIDOS CRISTALINOS



## ARRANJOS ATÔMICOS (MOLECULARES)

### ORDENAMENTOS DE CURTO E LONGO ALCANCE

**1 - GASES NOBRES (Ar) = NENHUM ARRANJO ESPACIAL DEFINIDO (PREENCHEM 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 - VIRTUALMENTE TODOS OS METAIS, MUITOS CERÂMICOS E POLÍMEROS = ARRANJO ORDENADO DE LONGO ALCANCE = ESTRUTURA CRISTALINA**





# Arranjos Cristalinos

- Os materiais sólidos podem ser classificados em **cristalinos ou não-cristalinos** de acordo com a regularidade na qual os átomos ou íons se dispõem em relação à seus vizinhos.
- **Material cristalino** é aquele no qual os átomos encontram-se ordenados sobre longas distâncias atômicas formando uma estrutura tridimensional que se chama de **rede cristalina**
- Todos os metais, muitas cerâmicas e alguns polímeros formam estruturas cristalinas sob condições normais de solidificação



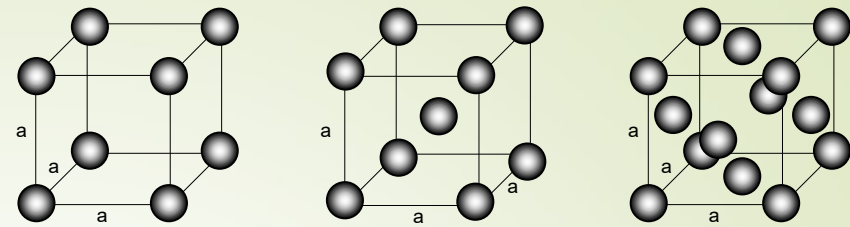
# CÉLULA UNITÁRIA

(unidade básica repetitiva da estrutura tridimensional)

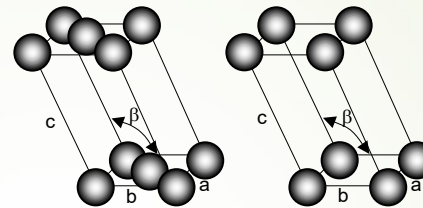
- ▶ Consiste num pequeno grupos de átomos que formam um modelo repetitivo ao longo da estrutura tridimensional (analogia com elos da corrente)
- ▶ **A célula unitária é escolhida para representar a simetria da estrutura cristalina**

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. Em meados do século passado, o cientista francês Bravais descreveu 14 células unitárias, as quais englobariam qualquer tipo de estrutura cristalina conhecida. Na figura são apresentados as células unitárias de Bravais.

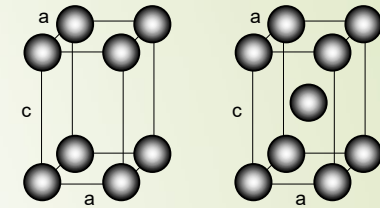
Uma avaliação mais aprofundada dos arranjos cristalinos de Bravais revela que as estruturas cúbica de corpo centrado (CCC), cúbica de face centrada (CFC) e hexagonal compacta (HC) são aquelas que permitem maior grau de empacotamento atômico.



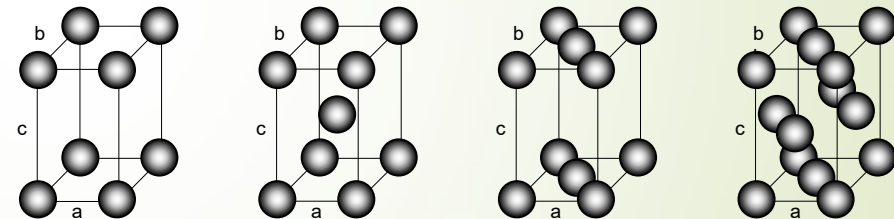
**CÚBICO**



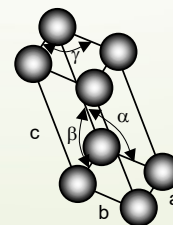
**MONOCLÍNICO**



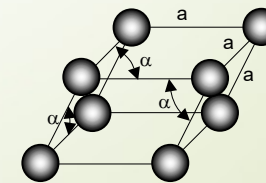
**TETRAGONAL**



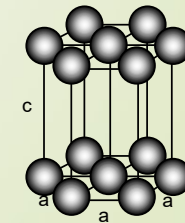
**ORTORRÔMBICO**



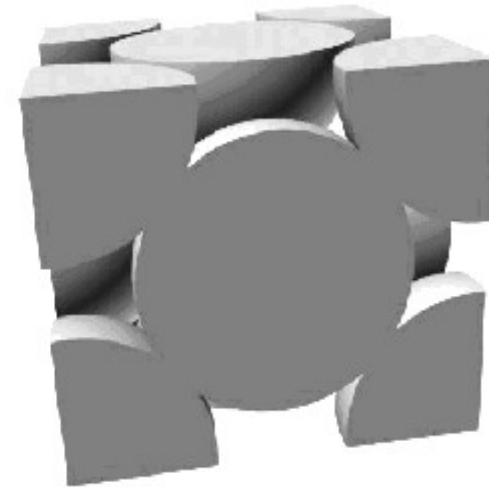
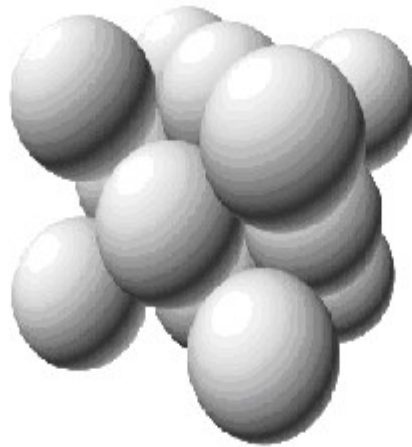
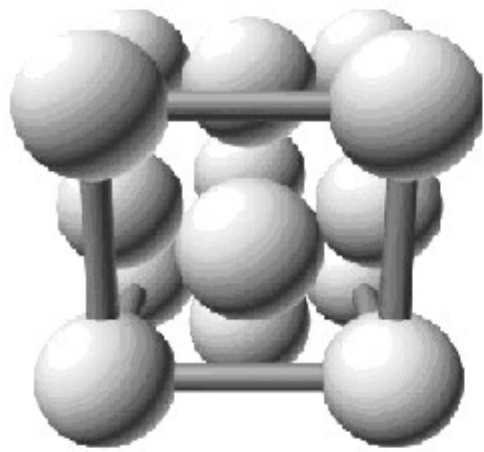
**TRICLÍNICO**



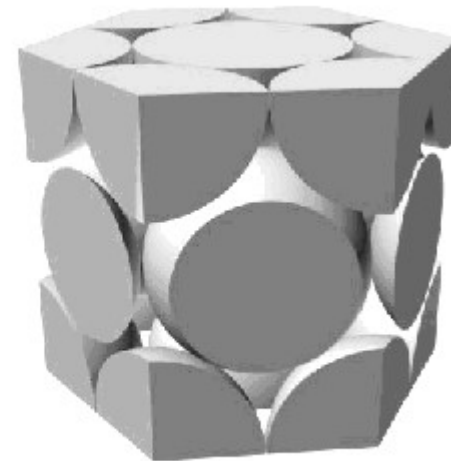
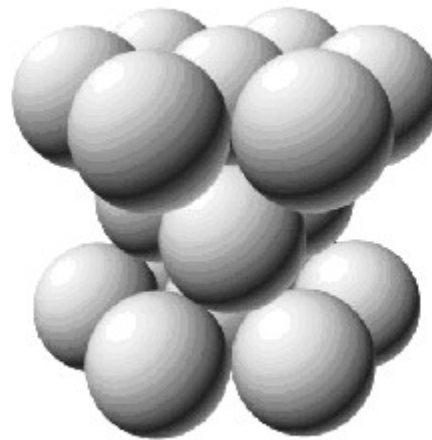
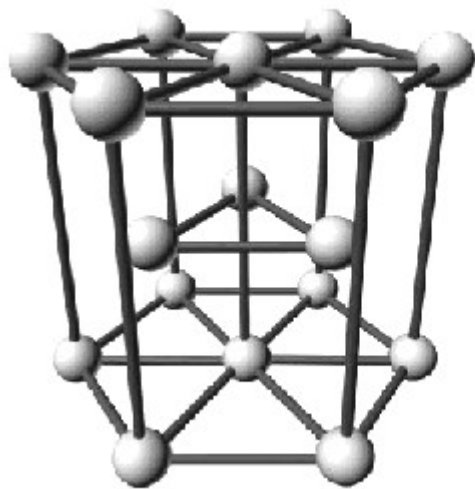
**ROMBOÉDRICO**




**HEXAGONAL**



Representação esquemática de uma célula unitária CFC: (a) posições atômicas; (b) arranjo atômico; (c) átomos dentro da célula unitária.





| Elemento   | Símbolo | Número Atômico | Massa Atômica (g/mol) | Densidade à 20 °C (g/m <sup>3</sup> ) | Estrutura Cristalina à 20 °C | Raio Atômico (nm) |
|------------|---------|----------------|-----------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------|
| Alumínio   | Al      | 13             | 26,98                 | 2,70                                  | CFC                          | 0,143             |
| 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             |
| Ferro      | Fe      | 26             | 55,85                 | 7,87                                  | CCC                          | 0,124             |
| Magnésio   | Mg      | 12             | 24,30                 | 1,74                                  | HC                           | 0,160             |
| Manganês   | Mn      | 25             | 54,94                 | 7,47                                  | Cúbica                       | 0,112             |
| Merúrio    | Hg      | 80             | 200,59                | 13,55                                 | Romboédrica                  | 0,155             |
| Molibdênio | Mo      | 42             | 95,94                 | 10,22                                 | CCC                          | 0,136             |
| Nióbio     | Nb      | 41             | 92,90                 | 8,57                                  | CCC                          | 0,143             |
| Níquel     | Ni      | 28             | 58,69                 | 8,90                                  | CFC                          | 0,124             |
| Platina    | Pt      | 78             | 195,09                | 21,45                                 | CFC                          | 0,139             |
| 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             |

Estrutura cristalina e propriedades de alguns elementos.



# SISTEMA CÚBICO

Os átomos podem ser agrupados dentro do sistema cúbico em 3 diferentes tipos de repetição

Cúbico simples

Cúbico de corpo centrado

Cúbico de face centrada

# ESTRUTURA CRISTALINA DOS METAIS

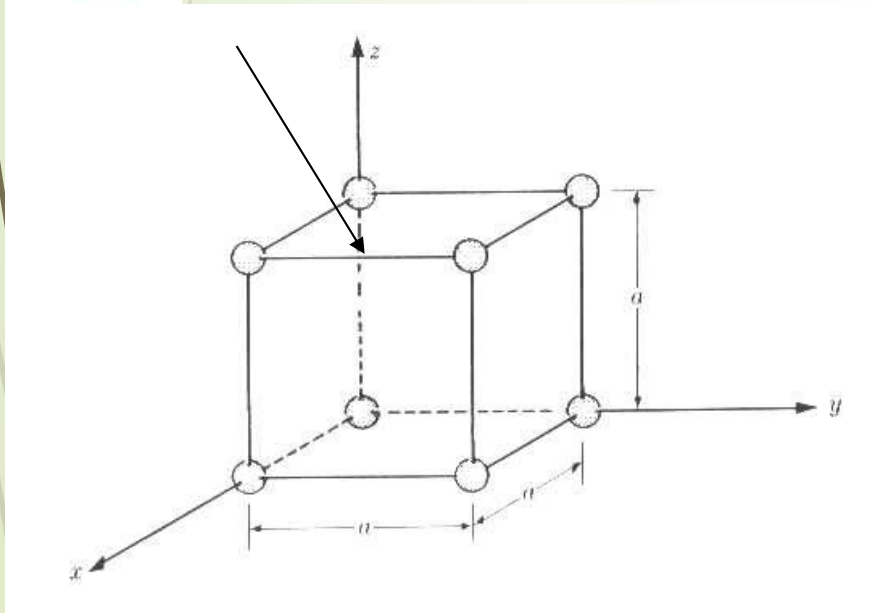
Três são as estruturas cristalinas mais comuns em metais:

Cúbica de corpo centrado

cúbica de face centrada

hexagonal compacta

# ESTRUTURA CRISTALINA DOS METAIS



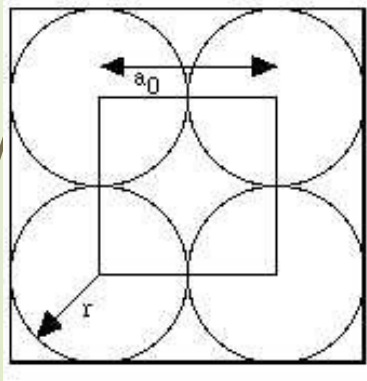
Parâmetro de rede

- ◆ Apenas  $1/8$  de cada átomo cai dentro da célula unitária, ou seja, a célula unitária contém apenas 1 átomo.
- ◆ Essa é a razão que os metais não cristalizam na estrutura cúbica simples (devido ao baixo empacotamento atômico)



# RELAÇÃO ENTRE O RAIÃO ATÔMICO (R) E O PARÂMETRO DE REDE (a) PARA O SISTEMA CÚBICO SIMPLES

- ◆ No sistema cúbico simples os átomos se tocam na face
- ◆  $a = 2 R$



# FATOR DE EMPACOTAMENTO ATÔMICO PARA CÚBICO SIMPLES

Fator de empacotamento =  $\frac{\text{Número de átomos} \times \text{Volume dos átomos}}{\text{Volume da célula unitária}}$

Vol. dos átomos = número de átomos  $\times$  Vol. Esfera ( $\frac{4\pi R^3}{3}$ )

Vol. Da célula = Vol. Cubo =  $a^3$

- ♦ Fator de empacotamento =  $\frac{4\pi R^3/3}{(2R)^3}$

O FATOR DE EMPACOTAMENTO PARA A EST. CÚBICA SIMPLES É 0,52

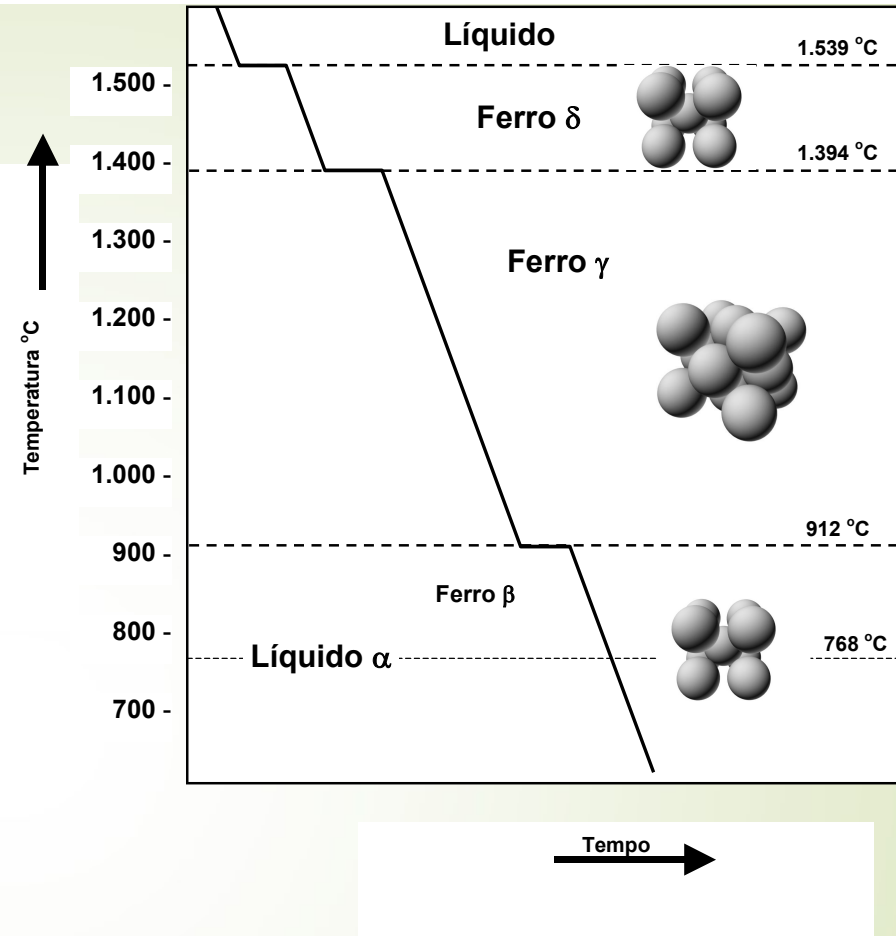
**ANALOGAMENTE:**

**CCC: 0,68**

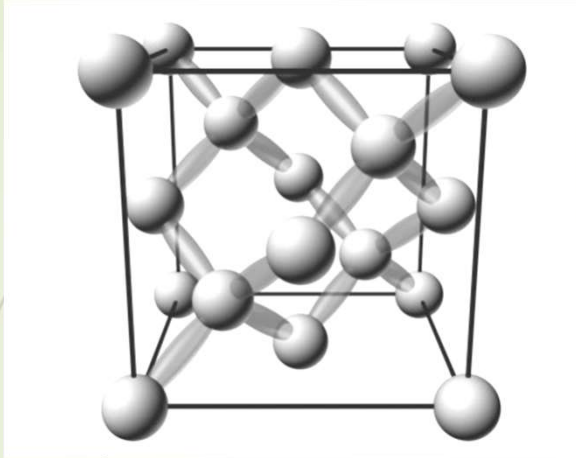
**CFC: 0,74**

## ALOTROPIA OU POLIMORFISMO

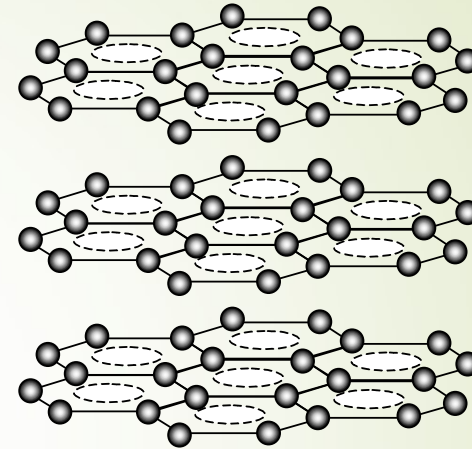
- ◆ Alguns metais e não-metais podem ter mais de uma estrutura cristalina dependendo da temperatura e pressão. Esse fenômeno é conhecido como polimorfismo.
- ◆ Geralmente as transformações polimórficas são acompanhadas de mudanças na densidade e mudanças de outras propriedades físicas.



diamante e do grafite.



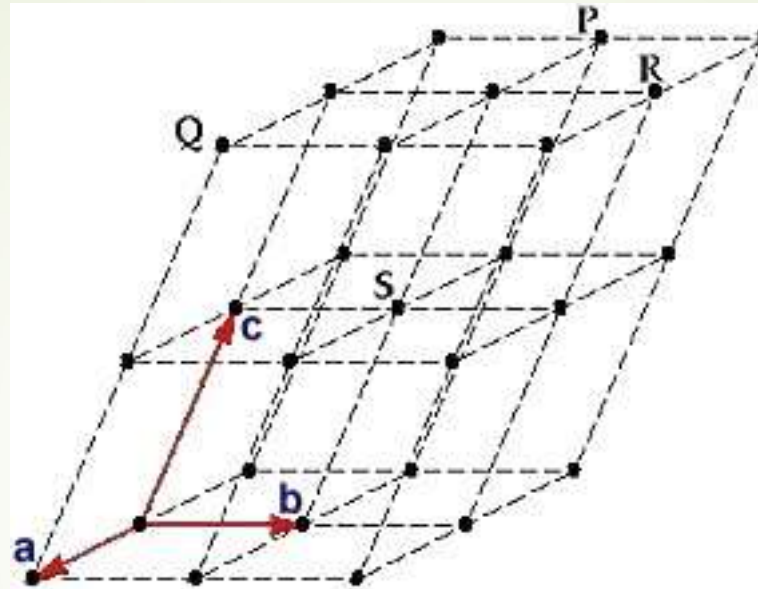
(a) Diamante



(b) Grafite

Figura 3.9. Estruturas cristalinas do carbono nas variações alotrópicas "diamante" e "grafite".

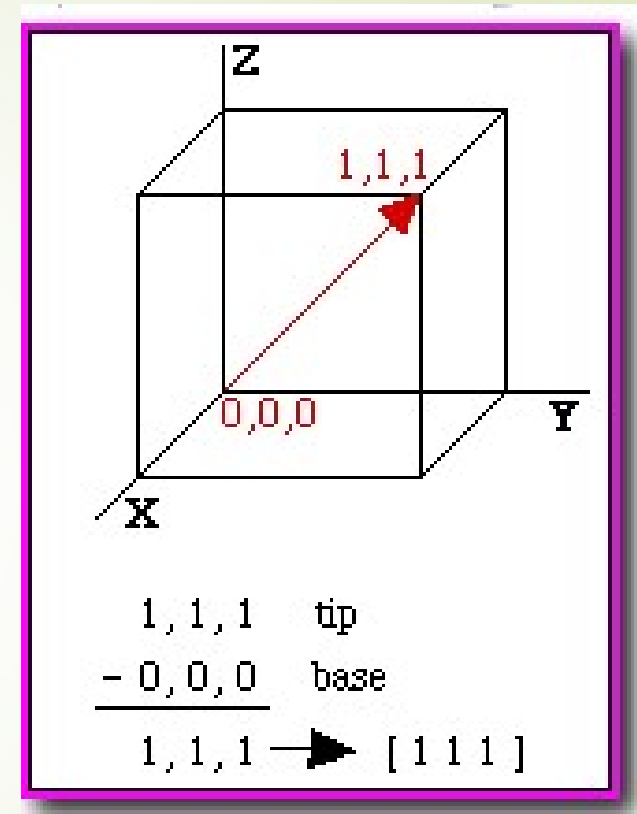
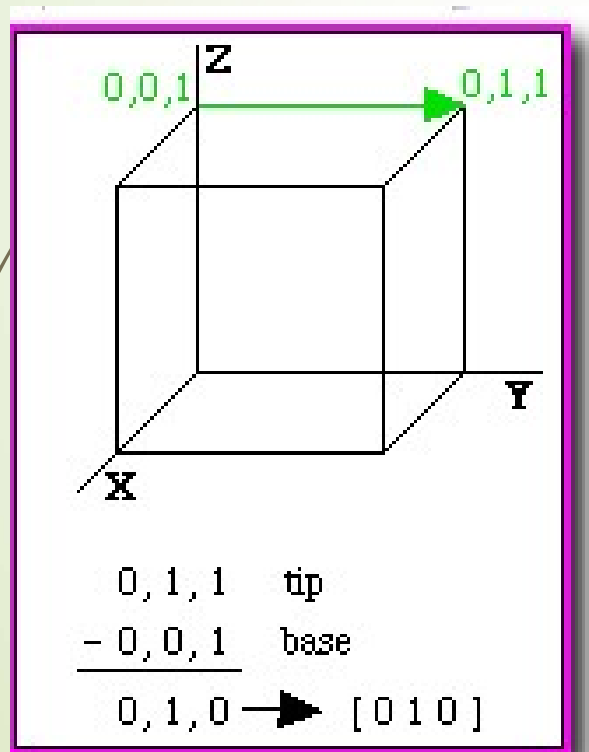
# DIREÇÕES NOS CRISTAIS



a, b e c definem os eixos de um sistema de coordenadas em 3D. Qualquer linha (ou direção) do sistema de coordenadas pode ser especificada através de dois pontos: · um deles sempre é tomado como sendo a origem do sistema de coordenadas, geralmente (0,0,0) por convenção;

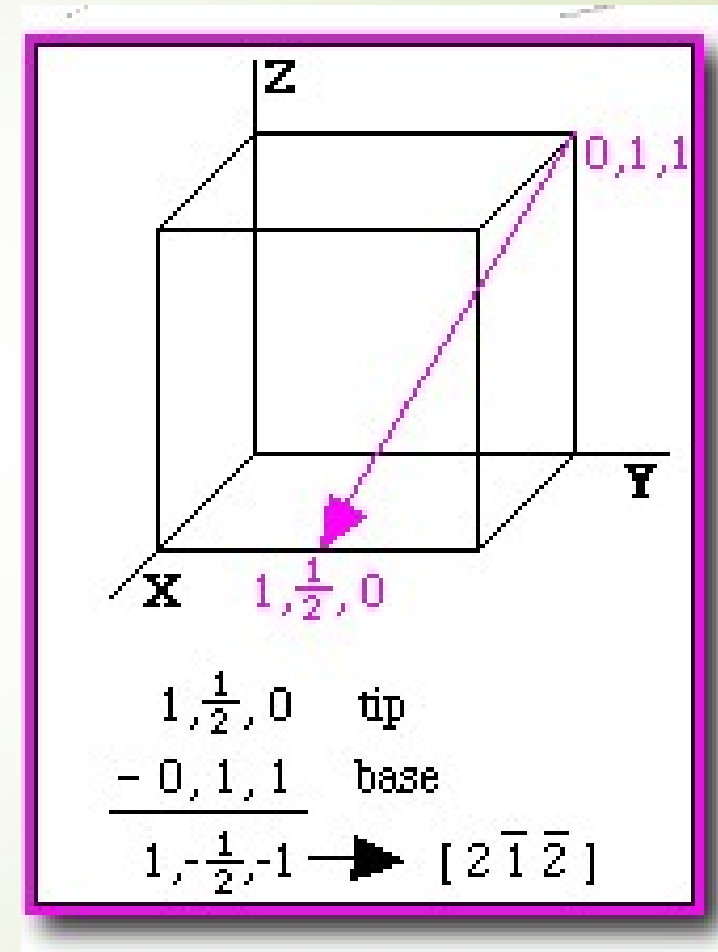
# DIREÇÕES NOS CRISTAIS

São representadas entre colchetes =  $[hkl]$   
Quando passa pela origem



# DIREÇÕES NOS CRISTAIS

Os números devem ser divididos ou multiplicados por um fator comum para dar números inteiros



# PLANOS CRISTALINOS

Por que são importantes?

- **Para a deformação plástica**

A deformação plástica (permanente) dos metais ocorre pelo deslizamento dos átomos, escorregando uns sobre os outros no cristal. Este deslizamento tende a acontecer preferencialmente ao longo de planos direções específicos do cristal.



# PLANOS CRISTALINOS

## Por que são importantes?

- **Para as propriedades de transporte**

Em certos materiais, a estrutura atômica em determinados planos causa o transporte de elétrons e/ou acelera a condução nestes planos, e, relativamente, reduz a velocidade em planos distantes destes.

**Exemplo : supercondutores a base de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$**

Alguns planos contêm somente Cu e O. Estes planos conduzem pares de elétrons (chamados pares de cobre) que são os responsáveis pela supercondutividade. Estes supercondutores são eletricamente isolantes em direções perpendiculares as dos planos Cu-O.

# PLANOS CRISTALINOS

São representados de maneira similar às direções

São representados pelos índices de Miller = (hkl)

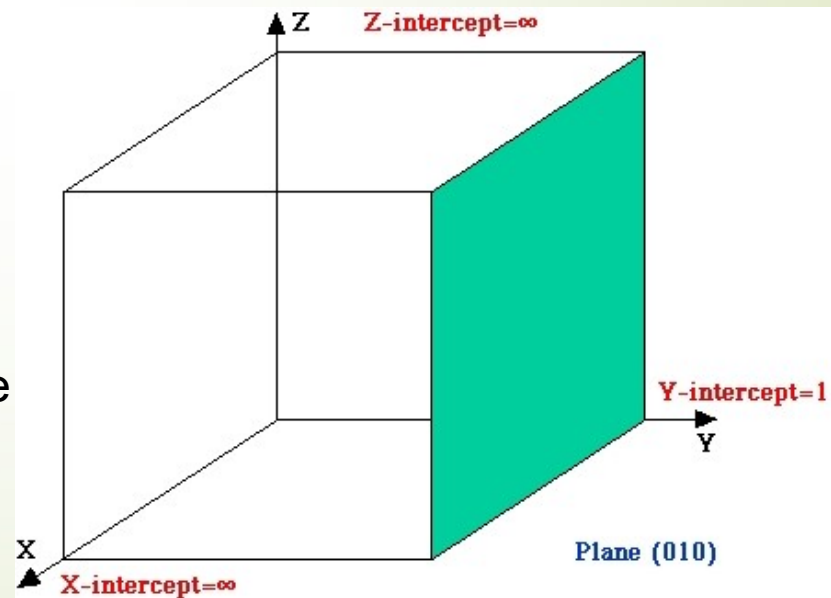
Planos paralelos são equivalentes tendo os mesmos índices

## Planos (010)

São paralelos aos eixos x e z (paralelo à face)

Cortam um eixo (neste exemplo: y em 1 e os eixos x e z em  $\infty$ )

$1/\infty, 1/1, 1/\infty = (010)$



# PLANOS CRISTALINOS

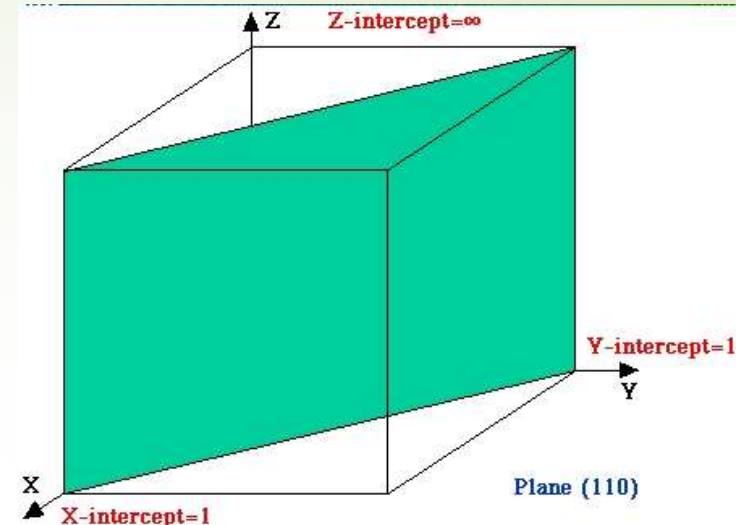
## Planos (110)

São paralelos a um eixo  
(z)

Cortam dois eixos

(x e y)

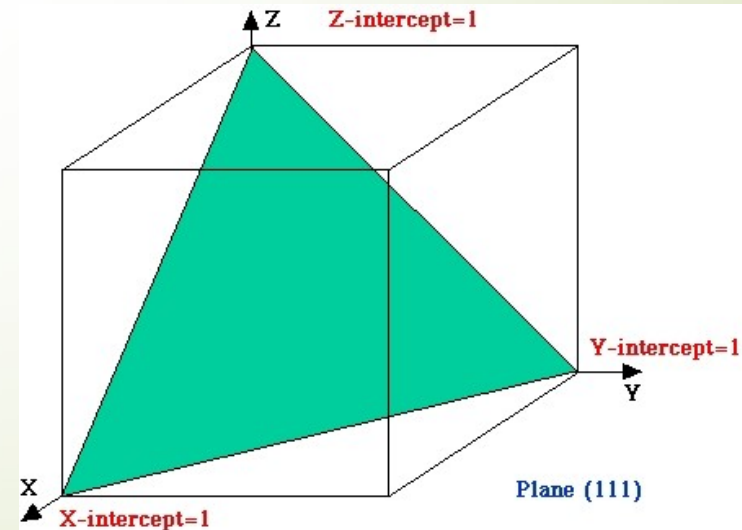
$$1/1, 1/1, 1/\infty = (110)$$



## Planos (111)

Cortam os 3 eixos  
cristalográficos

$$1/1, 1/1, 1/1 = (111)$$





# PLANOS NO SISTEMA CÚBICO

Deformação em metais envolve deslizamento de planos atômicos. O deslizamento ocorre mais facilmente nos planos e direções de maior densidade atômica



**Os materiais metálicos podem ser classificados em metais puros e ligas metálicas.**

**Existem aproximadamente 80 elementos metálicos puros e mais de 40.000 ligas metálicas, cada uma apresentando diferentes propriedades e naturalmente diferentes custos.**

# Aços C



**Vergalhões para  
construção civil**


**Propriedades  
mecânicas elevadas  
conseguidas com  
baixo custo**

# Aços Inoxidáveis



**Utensílios de cozinha**

**Resistência à  
corrosão**



# **Ferros fundidos**



**Base de máquinas**

**Amortecimento das  
vibrações**





# Ligas de Alumínio



**Pistões automotivos**

**Baixa densidade e  
facilidade de fabricação**



# Cobre



**Fios elétricos**


**Alta condutividade elétrica**

# Superligas de Ni



**Palhetas de turbina**

**Propriedade mecânicas  
elevadas a alta  
temperatura**




# Ligas de Ti



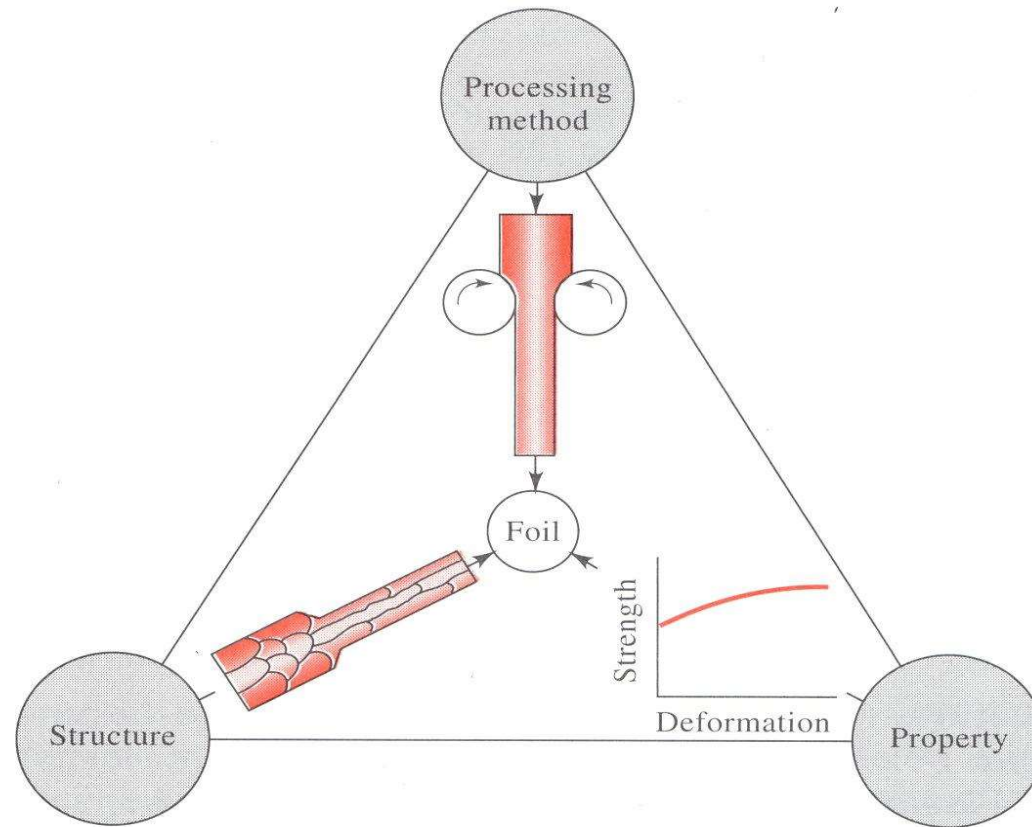
**Implantes ósseos**

**Biocompatibilidade,  
resistência à corrosão e  
baixa densidade**



Nos materiais metálicos existe uma complexa relação entre

estrut  
proce



**Quando o engenheiro muda qualquer um desses 3 aspectos, 1 ou ambos os outros também se modificam.**

**A estrutura pode ser modificada por mudanças na composição química ou no processamento gerando propriedades diferentes.**

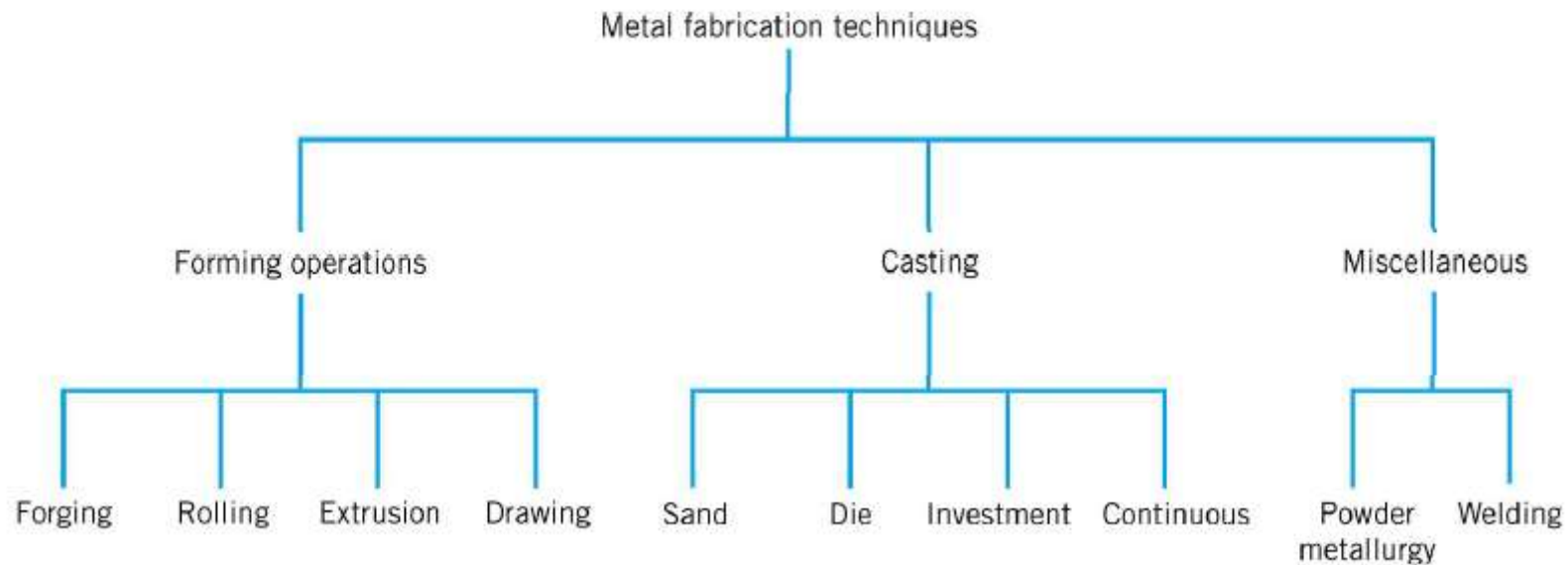
**Propriedades são avaliadas por ensaios mecânicos (dureza, tração, fadiga, desgaste).**

**Processamento é o conjunto de processos utilizados na fabricação dos componentes.**

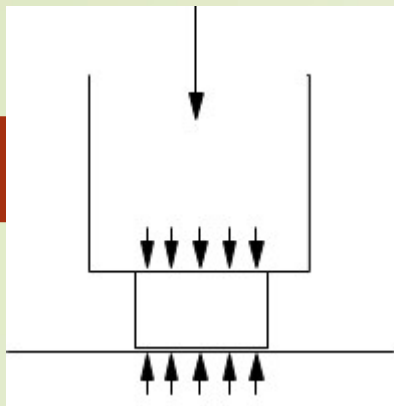
**Processos: fundição, forjamento, soldagem, usinagem, tratamentos térmicos, etc**

# Fabrication of Metals

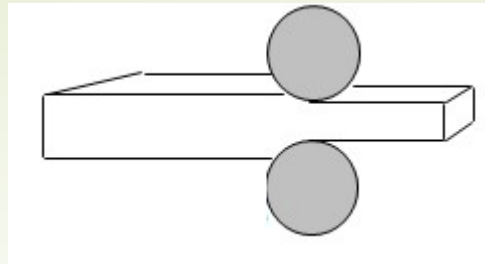
- Fabrication methods chosen depend on:
  - properties of metal
  - size and shape of final piece
  - cost



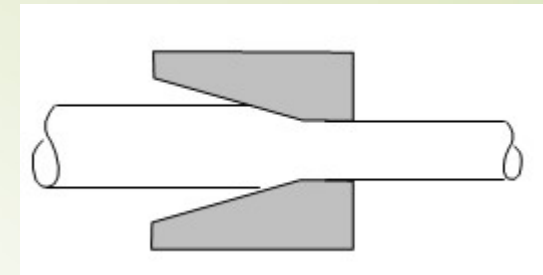




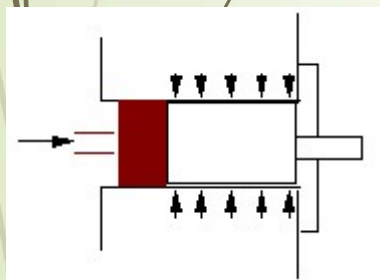
**Forjamento**



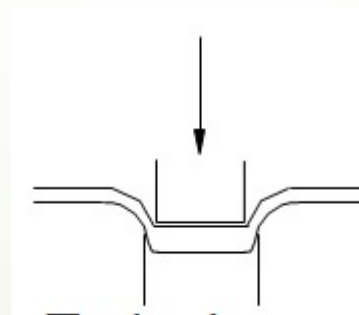
**Laminação**



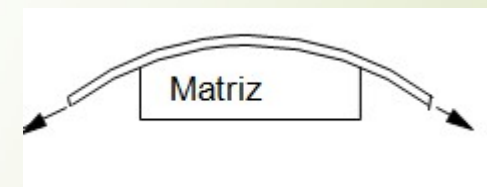
**Trefilação**



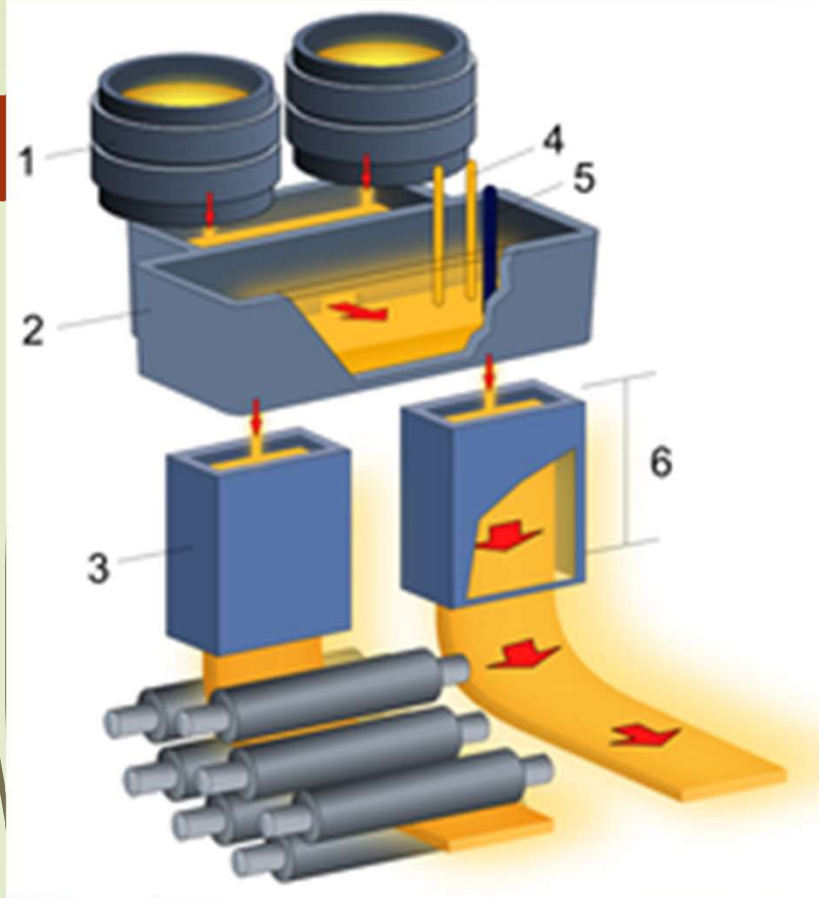
**Extrusão**



**Embutimento  
Profundo**

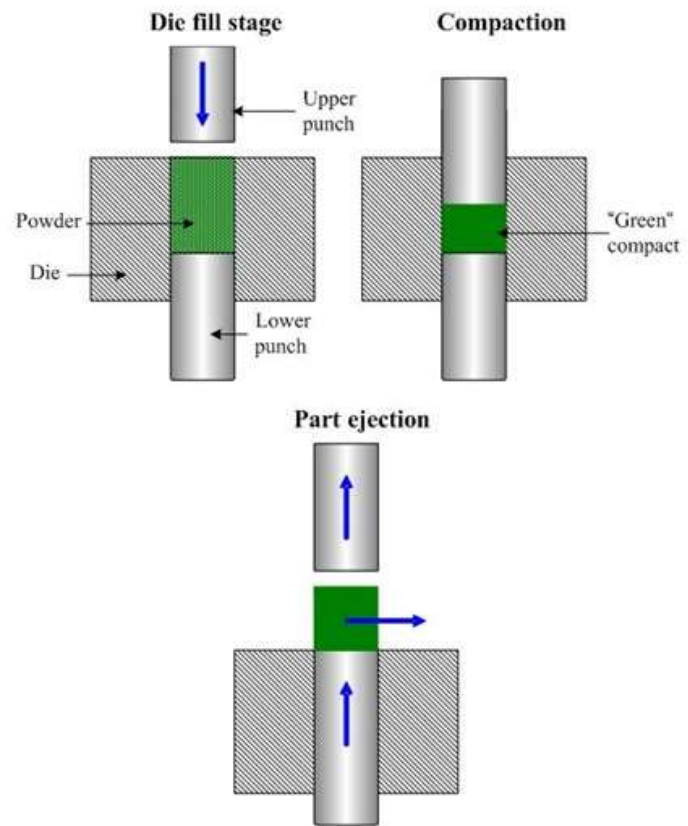


**Estiramento**





## Powder pressing






Quer entender melhor isso?



Olha pro slide e presta  
atenção!!!!



# IMPERFEIÇÕES EM SÓLIDOS




- Ao estudar os materiais cristalinos, tem-se admitido que existe uma perfeita ordem em escala atômica

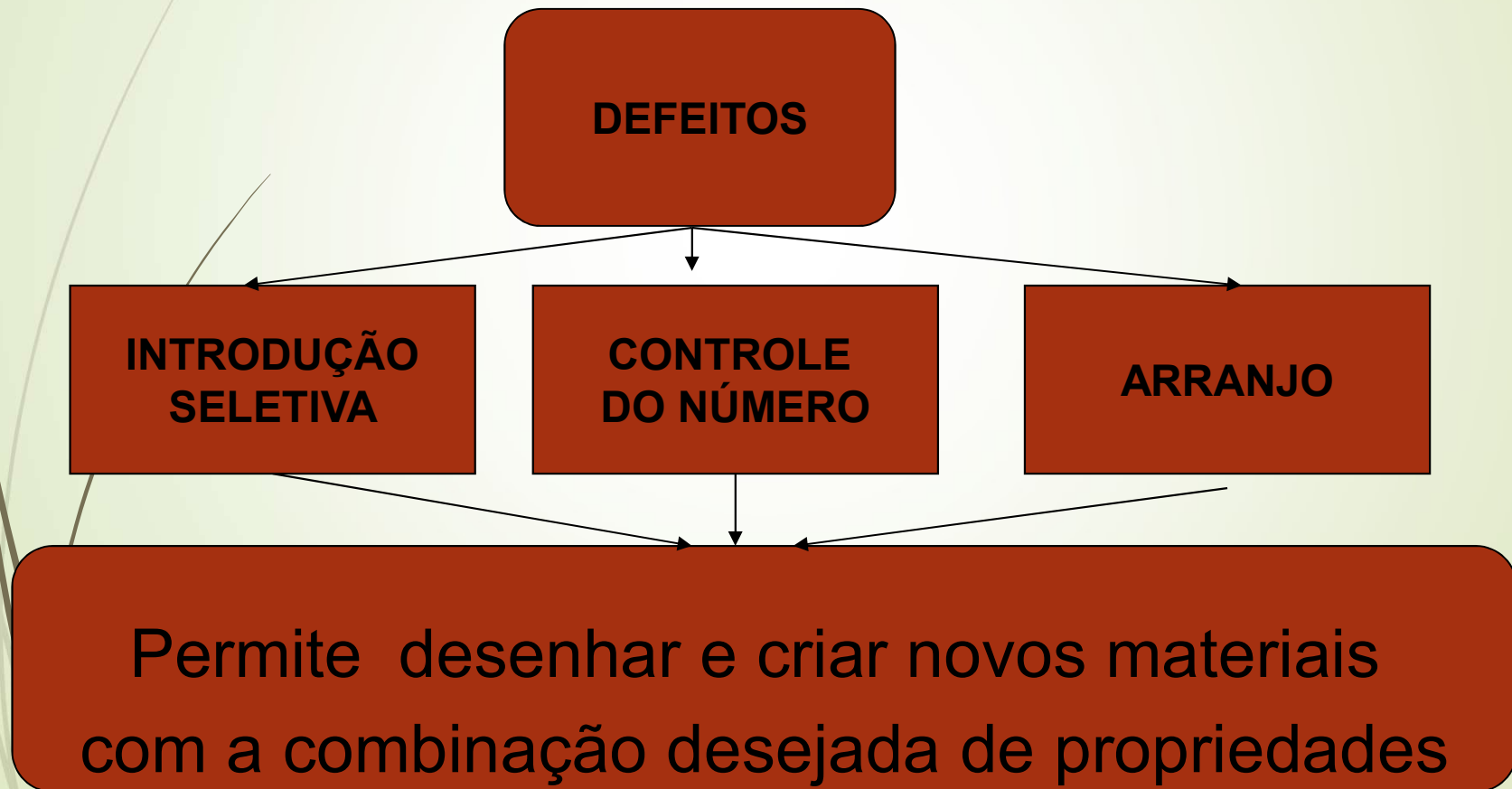
- Contudo esse tipo de **sólido idealizado** não existe, todos os materiais contém grandes números de uma **variedade de defeitos e imperfeições.**

- As propriedades de alguns materiais são profundamente influenciadas pela presença de imperfeição no sólido cristalino
- Por “defeito cristalino” é designada uma irregularidade na rede cristalina



- 
- O tipo e o número de defeitos dependem do material, do meio ambiente, e das circunstâncias sob as quais o cristal é processado
  - Mesmo sendo poucos eles influenciam muito nas propriedades dos materiais e nem sempre de forma negativa

# IMPERFEIÇÕES ESTRUTURAIS - IMPORTÂNCIA-



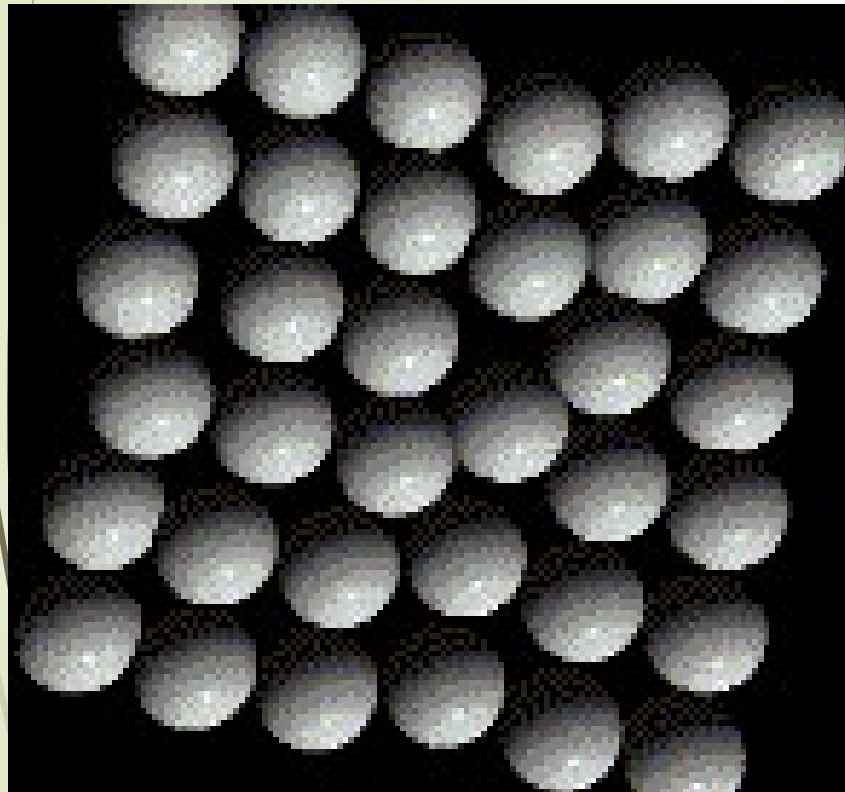


# 1- DEFEITOS PONTUAIS

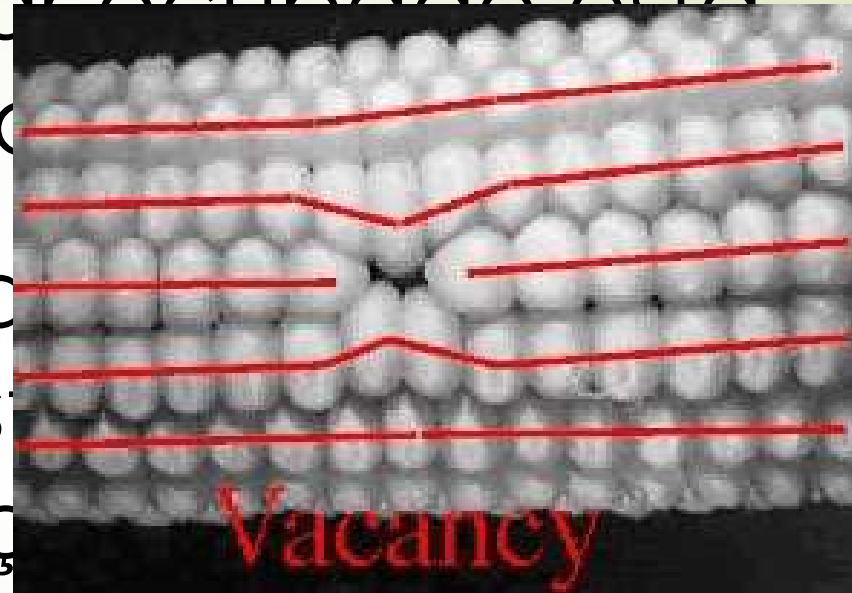
- Lacunas ou vacâncias ou vazios
- Átomos Intersticiais
- Impurezas

# LACUNAS (vacâncias)

- Envolve a falta de um átomo, onde



posições normais)



-se de suas

- Não é possível criar um material isento desse tipo de defeito

- A presença de impurezas promove a formação de defeitos pontuais e atua proporcionando modificações nas propriedades.
- Exemplo: prata de lei é uma liga composta por 92,5% de prata e 7,5% de cobre (a prata pura é resistente à corrosão, mas é muito macia).

# IMPUREZAS EM SÓLIDOS

- A adição de impurezas pode formar: SOLUÇÕES SÓLIDAS
- Existem vários termos relacionado a impurezas e soluções sólidas. Com relação às ligas os termos normalmente empregados são: SOLUTO E SOLVENTE

- **SOLVENTE**: átomo ou composto presente em maior quantidade.
- **SOLUTO**: é usado para indicar um elemento ou composto presente em menor concentração

# SOLUÇÕES SÓLIDAS

Nas soluções sólidas a estrutura cristalina do material que impurezas podem ser mantida e não formam-se novas estruturas

- Intersticial

As soluções sólidas formam-se mais facilmente quando o elemento de liga (impureza) e matriz apresentam estrutura cristalina e dimensões eletrônicas semelhantes

- Substitucional



# SOLUÇÕES SÓLIDAS SUBSTITUCIONAIS

- Os átomos do soluto ou átomos de impureza tomam o lugar dos átomos hospedeiros ou os substituem


- **Fatores que influem na formação de soluções sólidas substitucionais (REGRA DE HUME-ROTHERY)**

# SOLUÇÕES SÓLIDAS INTERSTICIAIS

Os átomos de impureza dos elementos de liga ocupam os espaços interstícios.

Como os materiais metálicos tem geralmente fator de empacotamento alto as posições intersticiais são relativamente pequenas.





Conseqüentemente ocorre quando a impureza apresenta raio atômico bem menor que o hospedeiro

Geralmente, no máximo 10% de impurezas são incorporadas nos interstícios

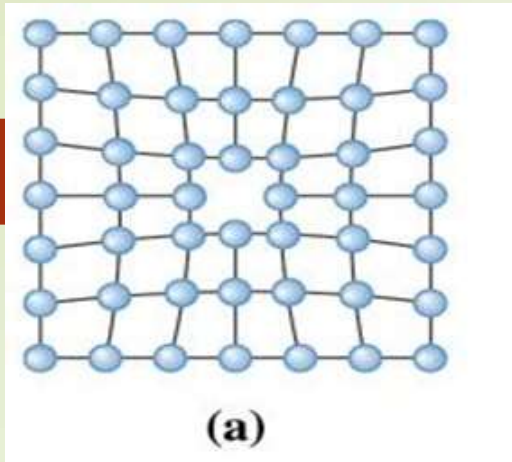
## EXEMPLO DE SOLUÇÃO SÓLIDA INTERSTICIAL

Fe + C → solubilidade máxima do C  
no Fe é 2,1% a 910 C (Fe CFC)

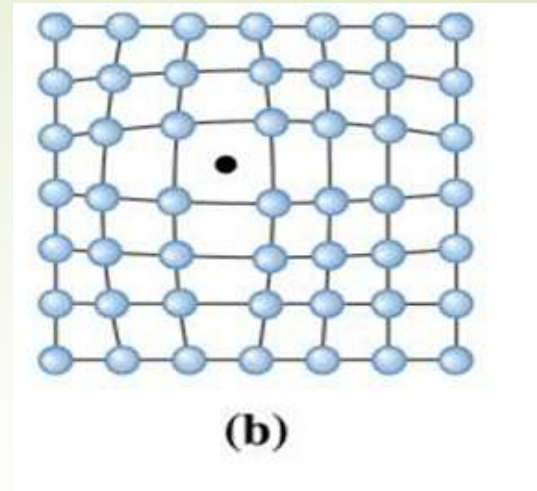
O C tem raio atômico bastante pequeno se comparado com o Fe

$$r_C = 0,071 \text{ nm} = 0,71 \text{ \AA}$$

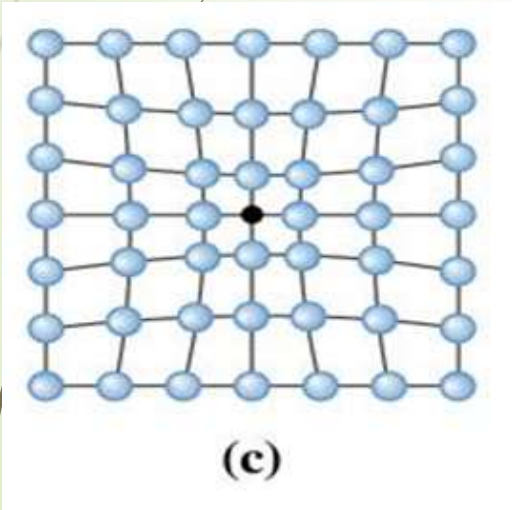
$$r_{Fe} = 0,124 \text{ nm} = 1,24 \text{ \AA}$$



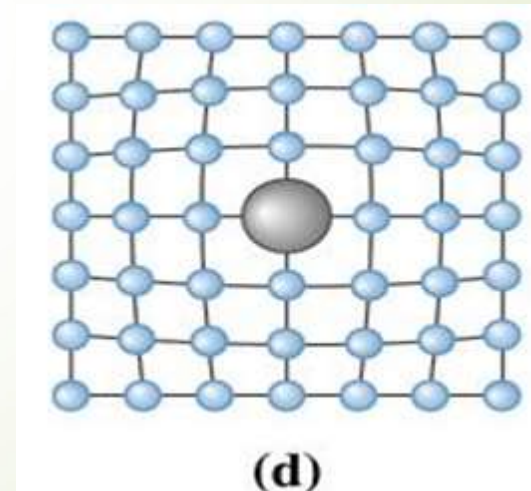
**(a) vacância**



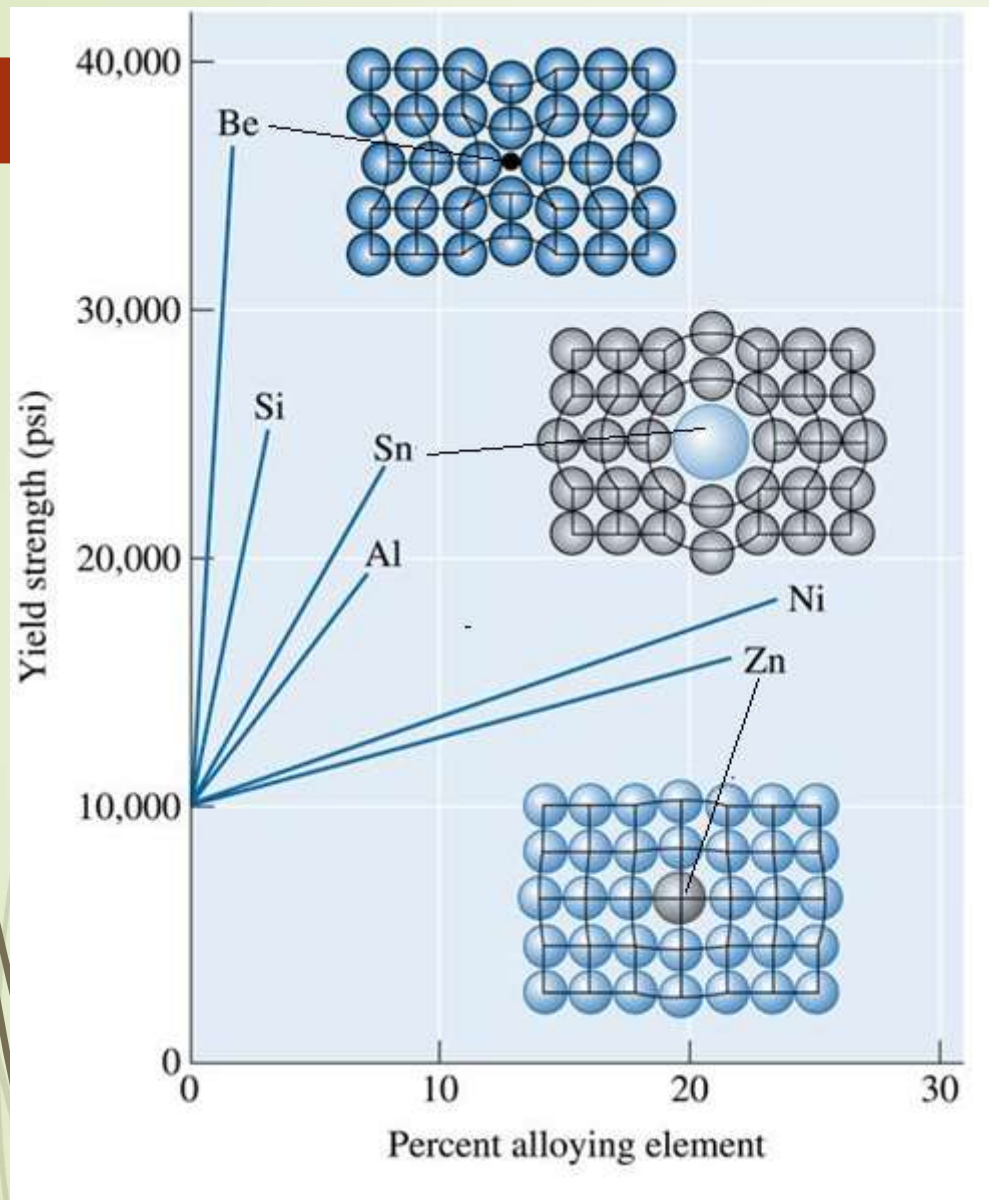
**(b) átomo intersticial**



**(c) pequeno átomo  
sustitucional**



**(d) grande átomo  
sustitucional**



Efeitos do tamanho do átomo na solução sólida tendo Cu como solvente



## 2- DEFEITOS LINEARES: DISCORDÂNCIAS

- É um defeito linear ou unidimensional em torno do qual alguns dos átomos estão desalinhados
- Podem ser:
  - Aresta
  - Espiral
  - Mista

Wiskers de ferro (sem imperfeições do tipo discordâncias) apresentam resistência maior que **70GPa**, enquanto o ferro comum rompe-se a aproximadamente **270MPa**.

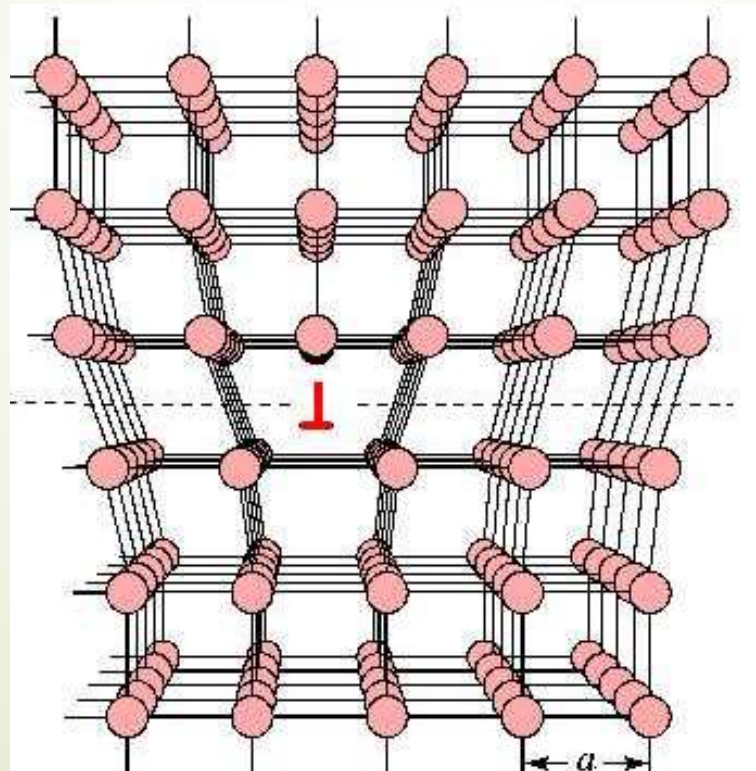
Ligas: adiciona-se átomos de impureza para aumentar a resistência mecânica e a resistência à corrosão

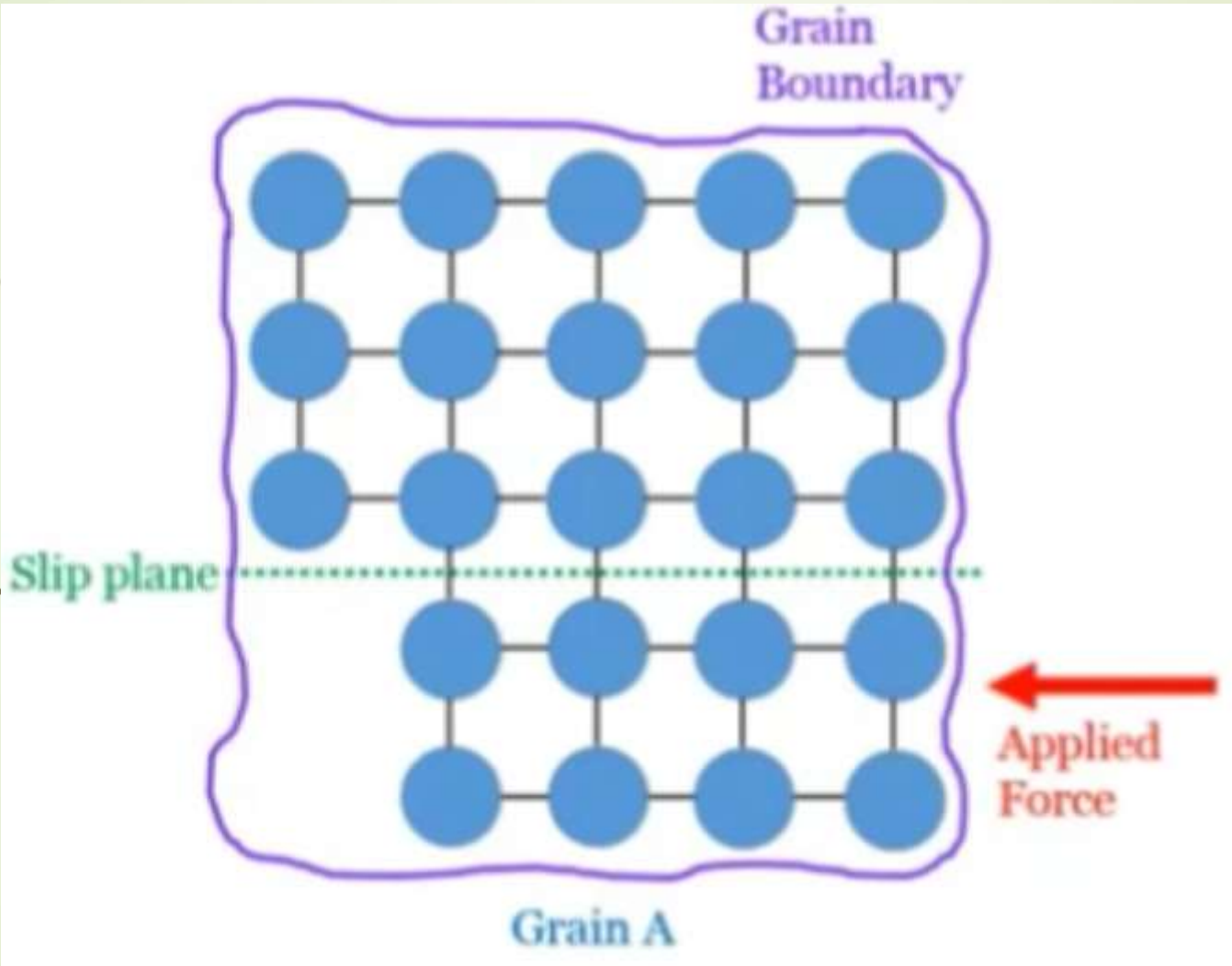
**pascal** (símbolo: **Pa**) é a unidade padrão de **pressão** e **tensão** no **Sistema Internacional de Unidades** (SI). Equivale à força de 1 **N** aplicada uniformemente sobre uma superfície de 1 **m<sup>2</sup>**.

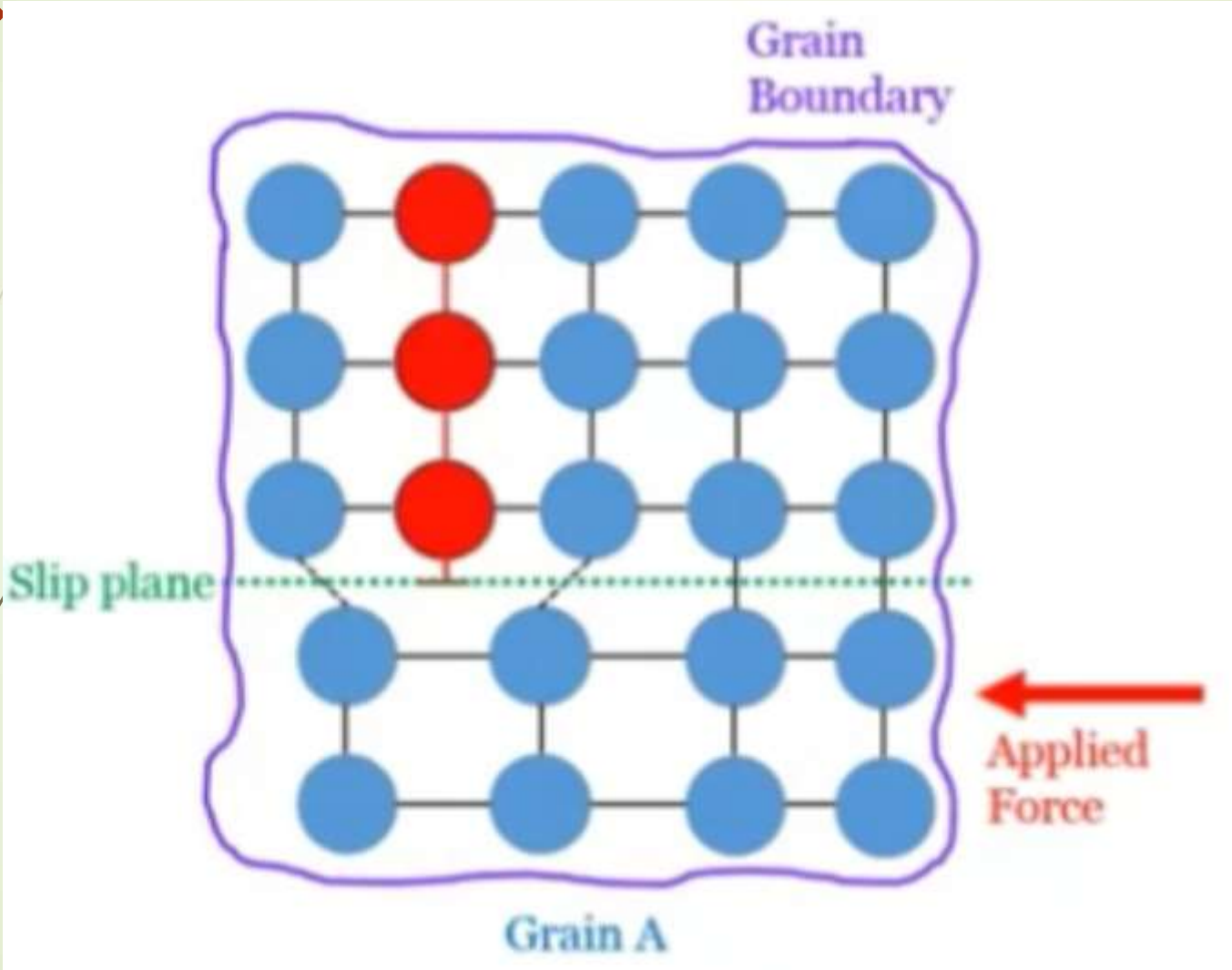


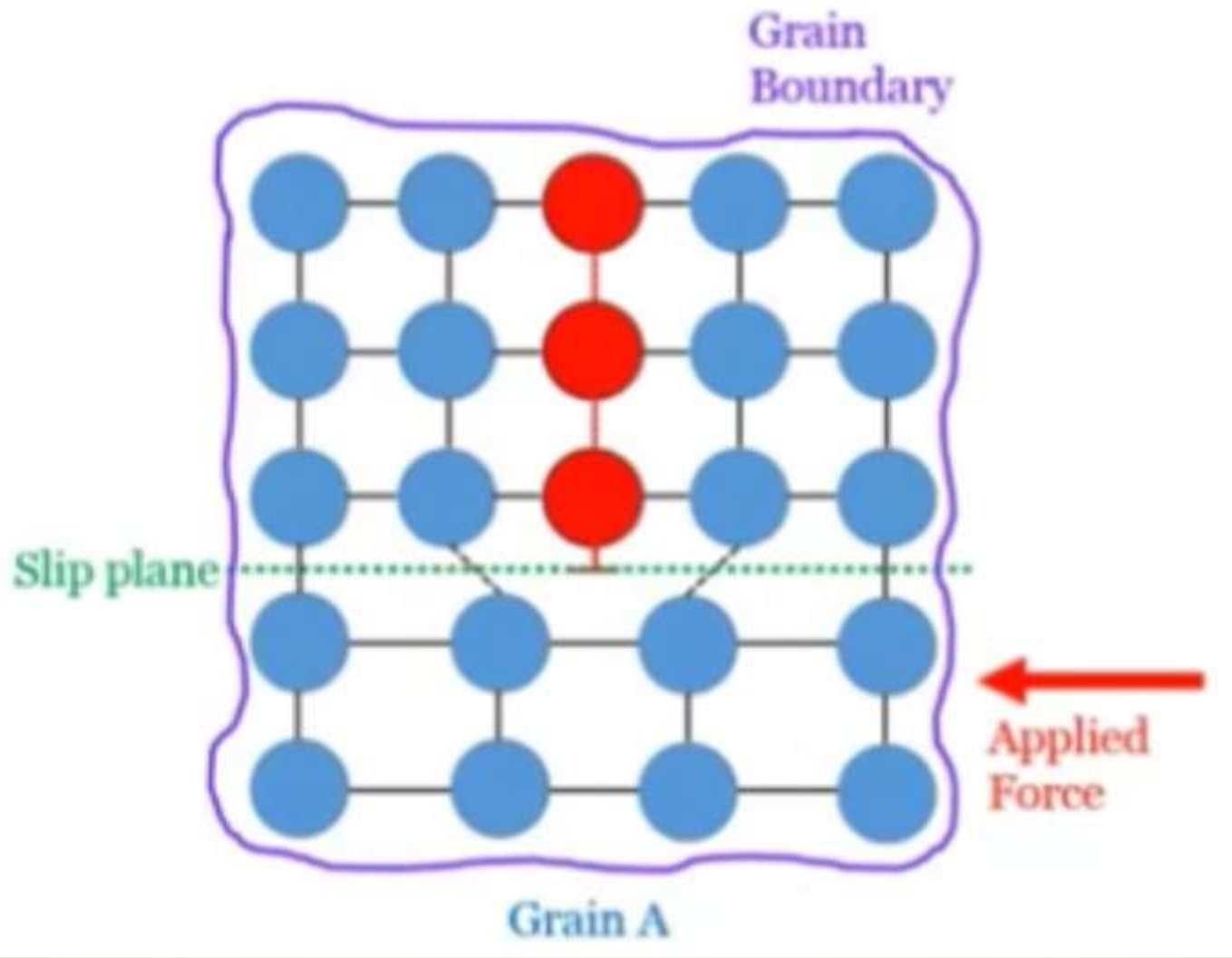
# DISCORDÂNCIAS EM ARESTA

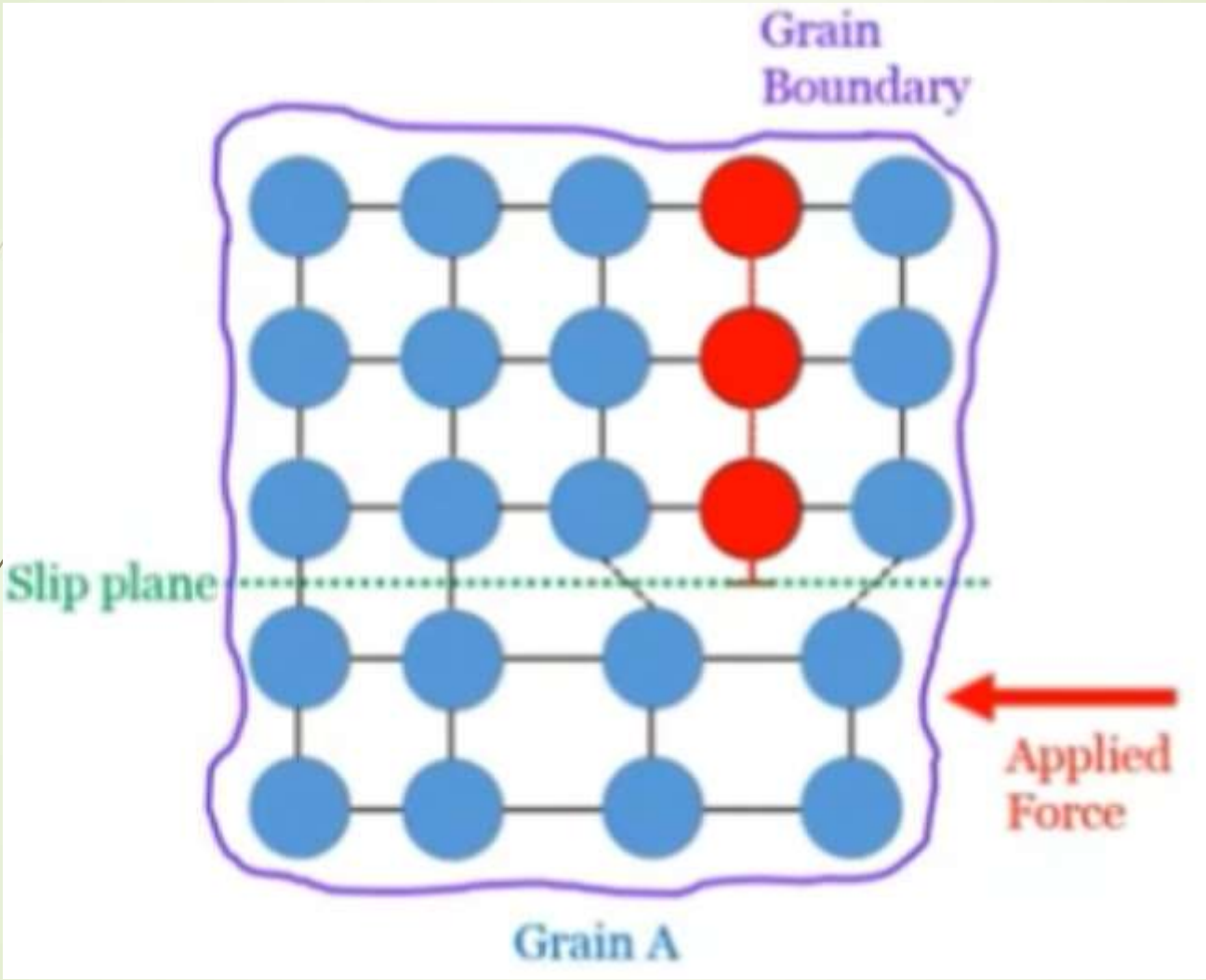
- Uma porção extra de um plano de átomos, ou semi-plano, cuja aresta termina no interior do cristal

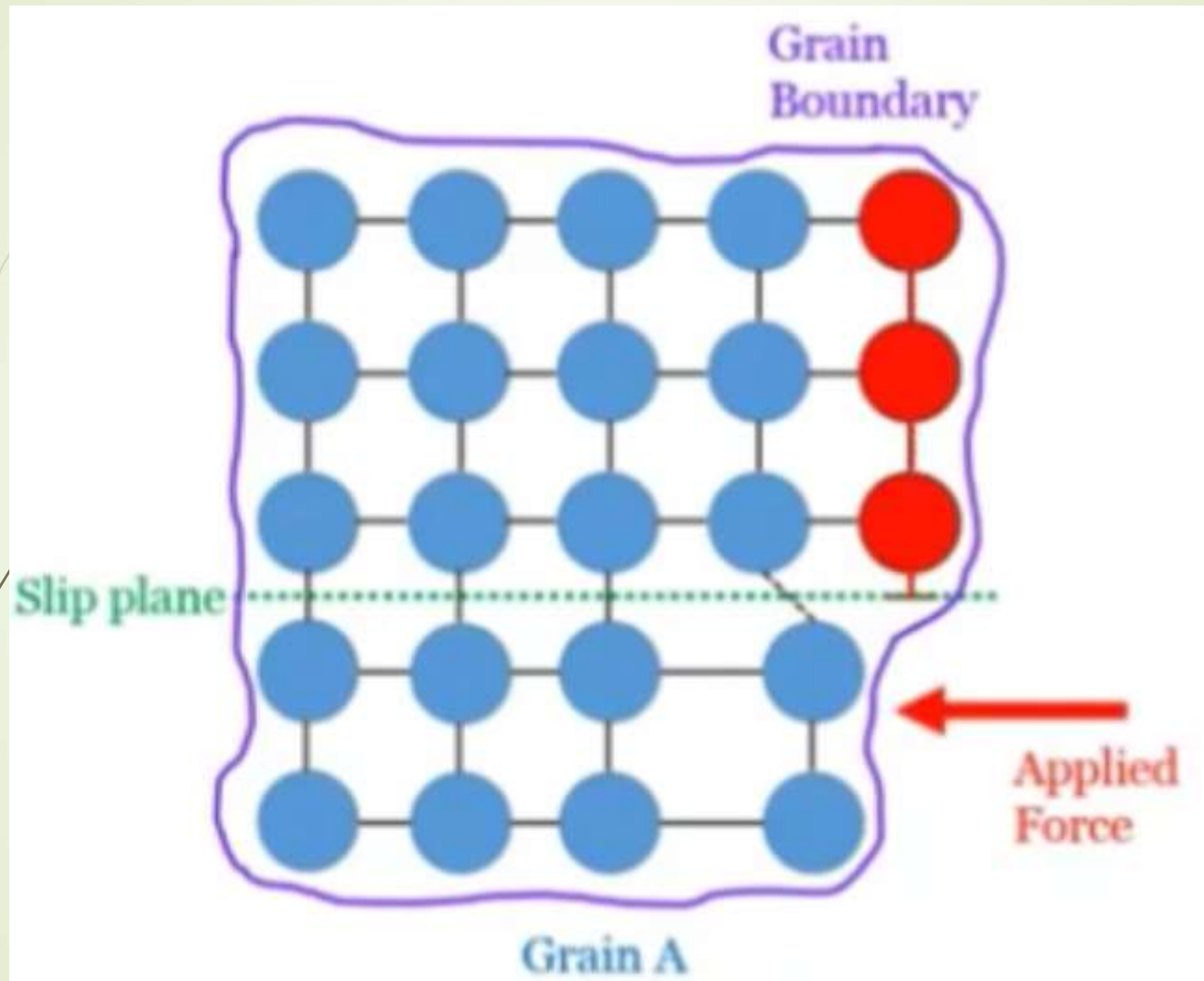


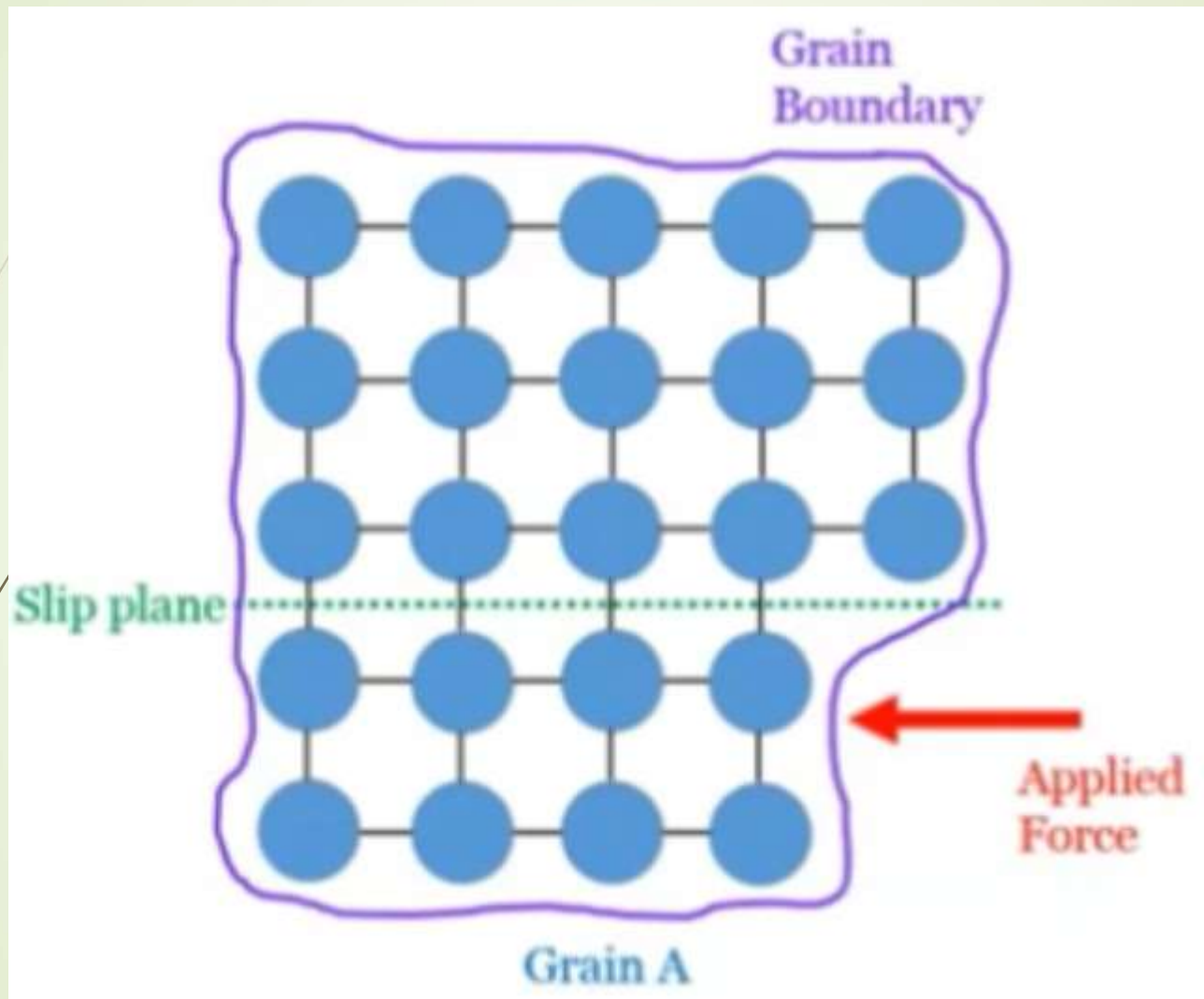


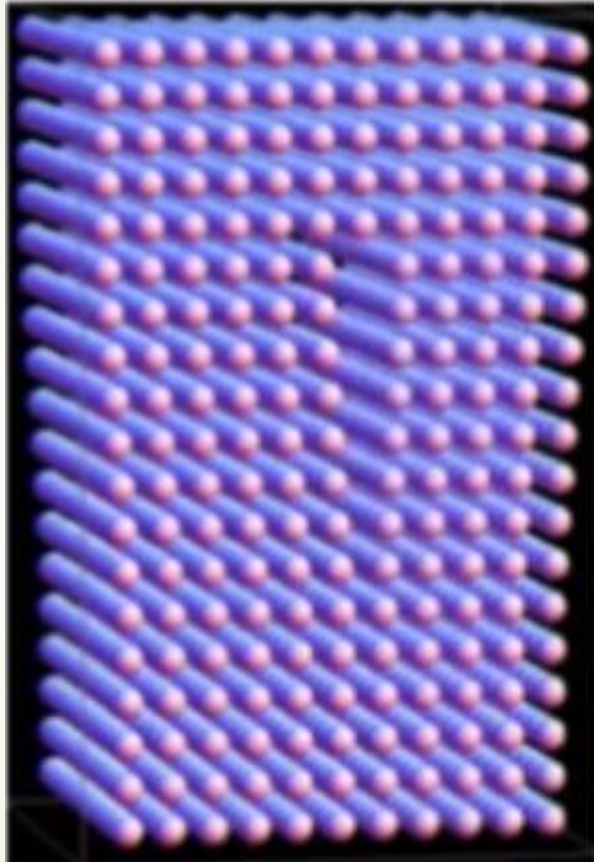




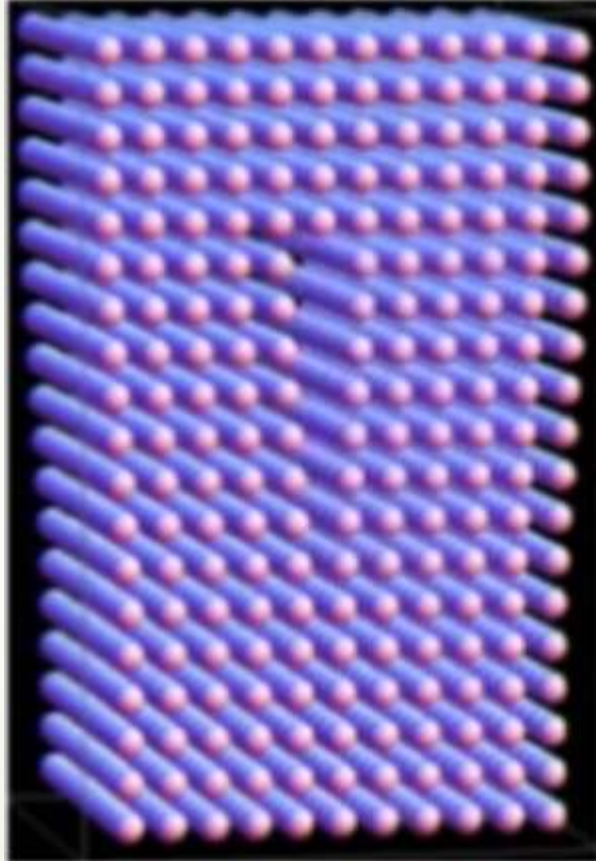


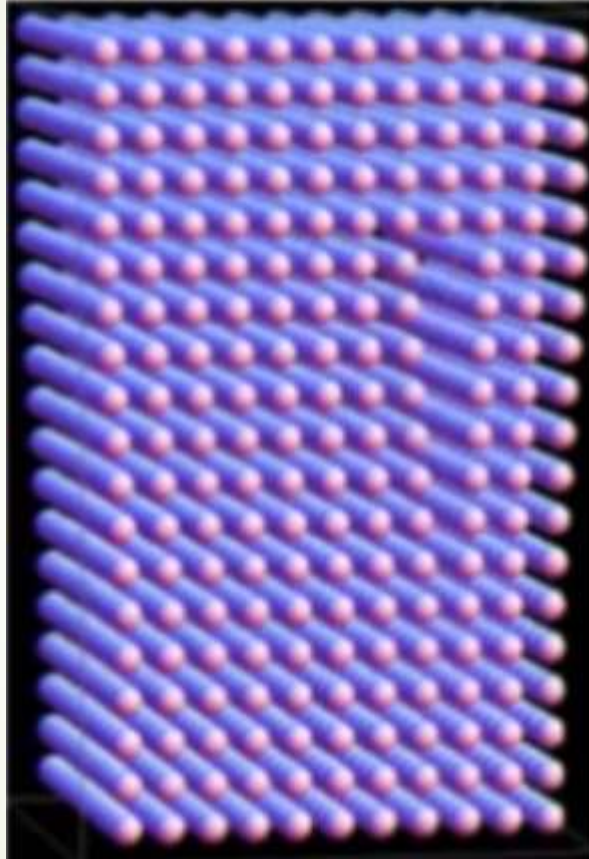


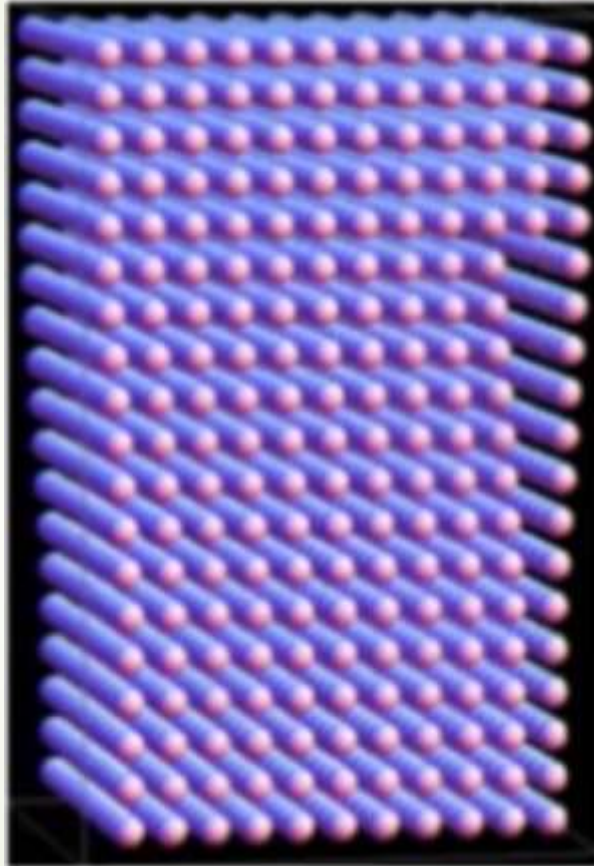


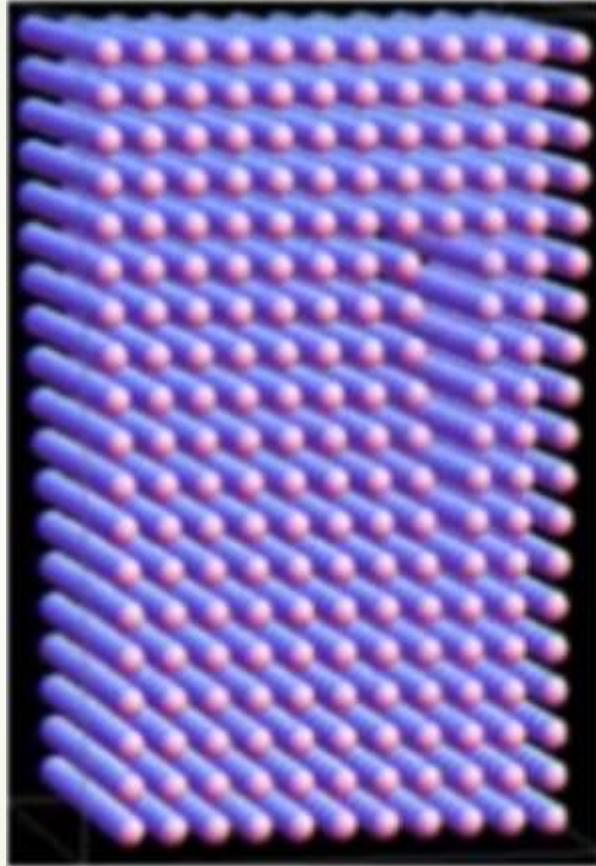


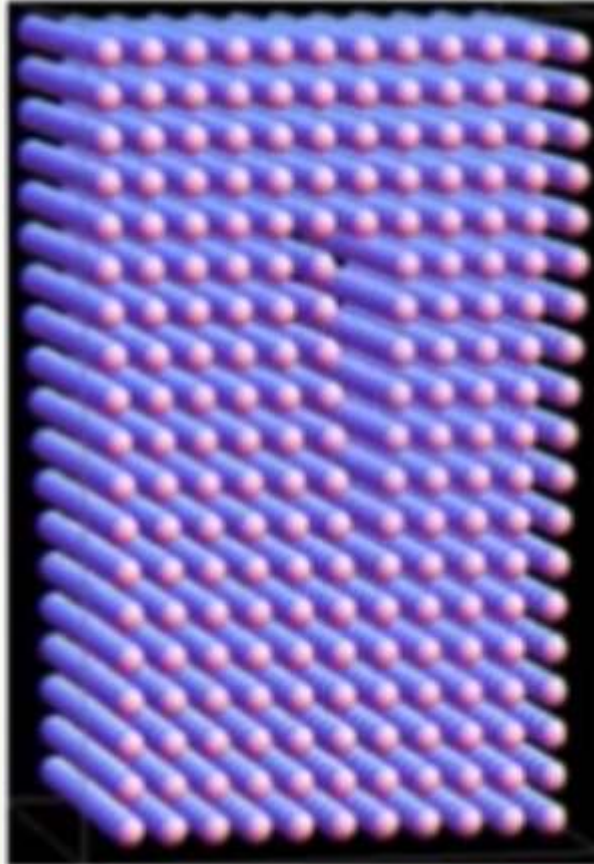


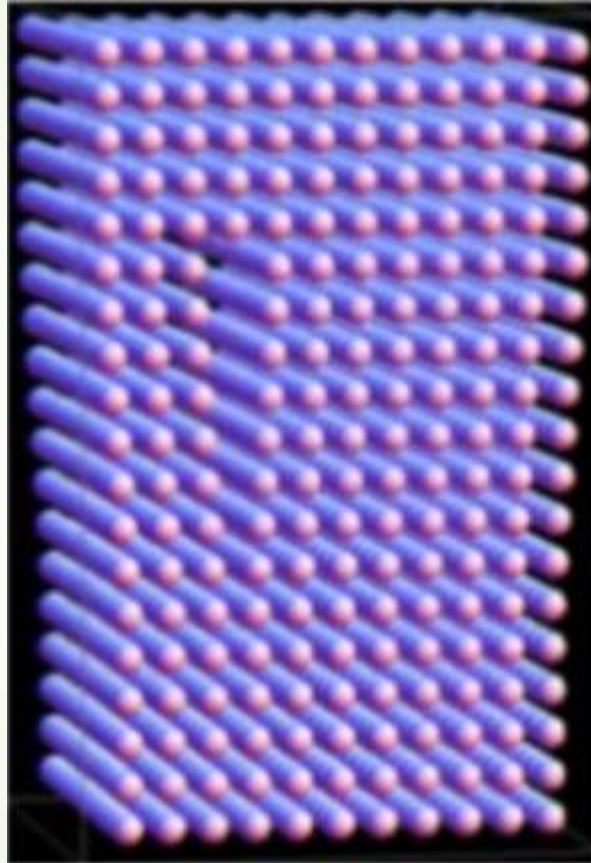


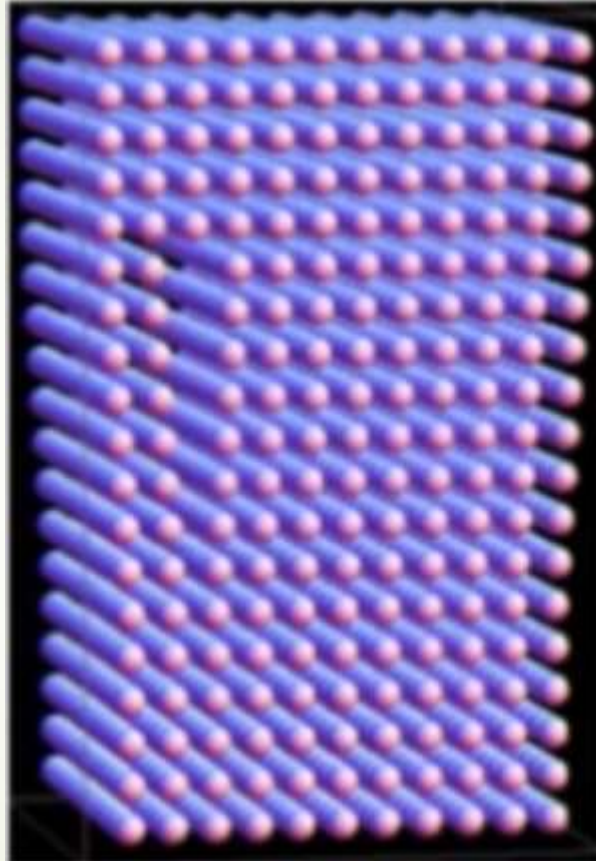


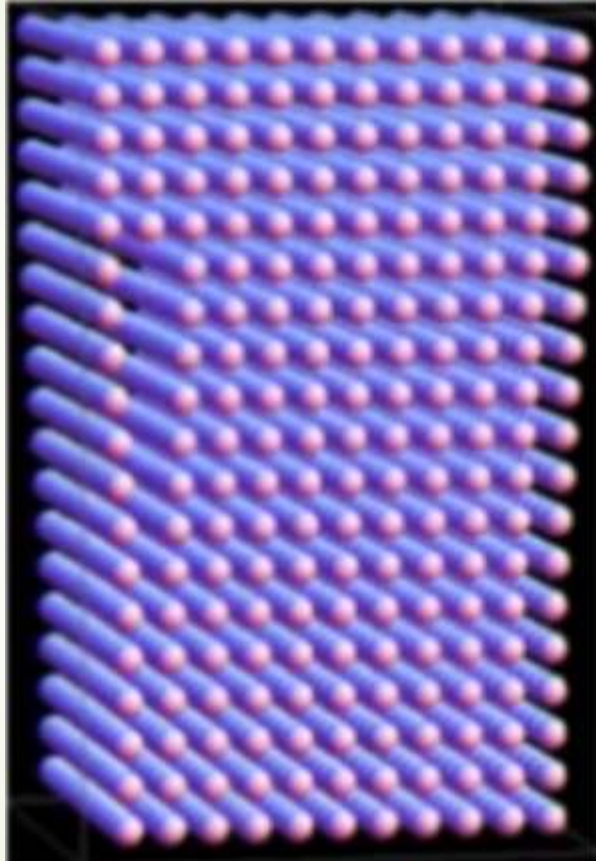








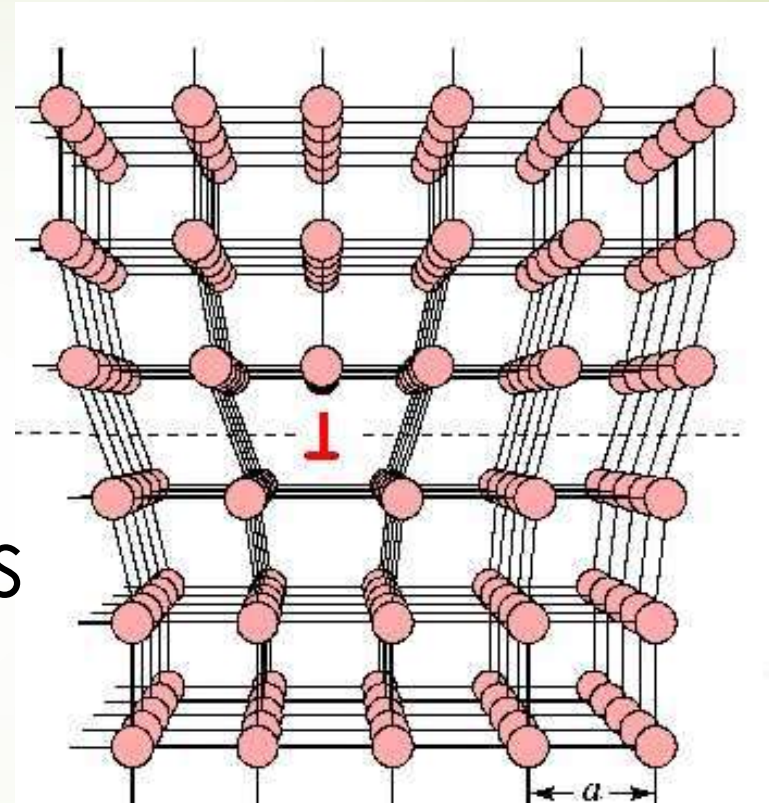






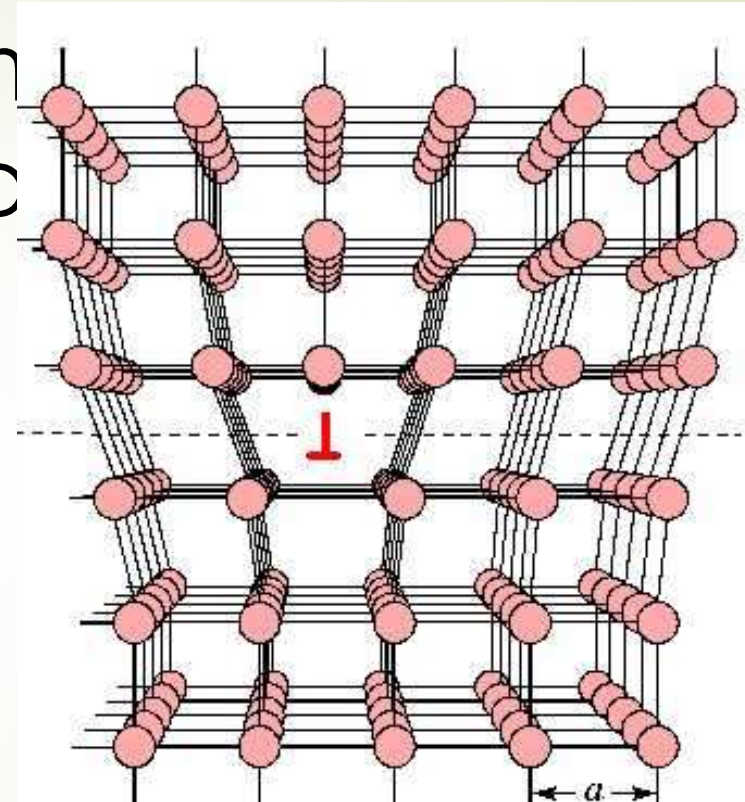
# DISCORDÂNCIAS EM ARESTA

- Os átomos acima da linha de discordância são pressionados uns contra os outros, e, os átomos abaixo são puxados um para longe do outro (envolve zonas de tração e



• Os planos de átomos verticais se curvam em torno deste semi-plano adicional

- A magnitude dessa distorção diminui com a distância de afastamento da linha de discordância

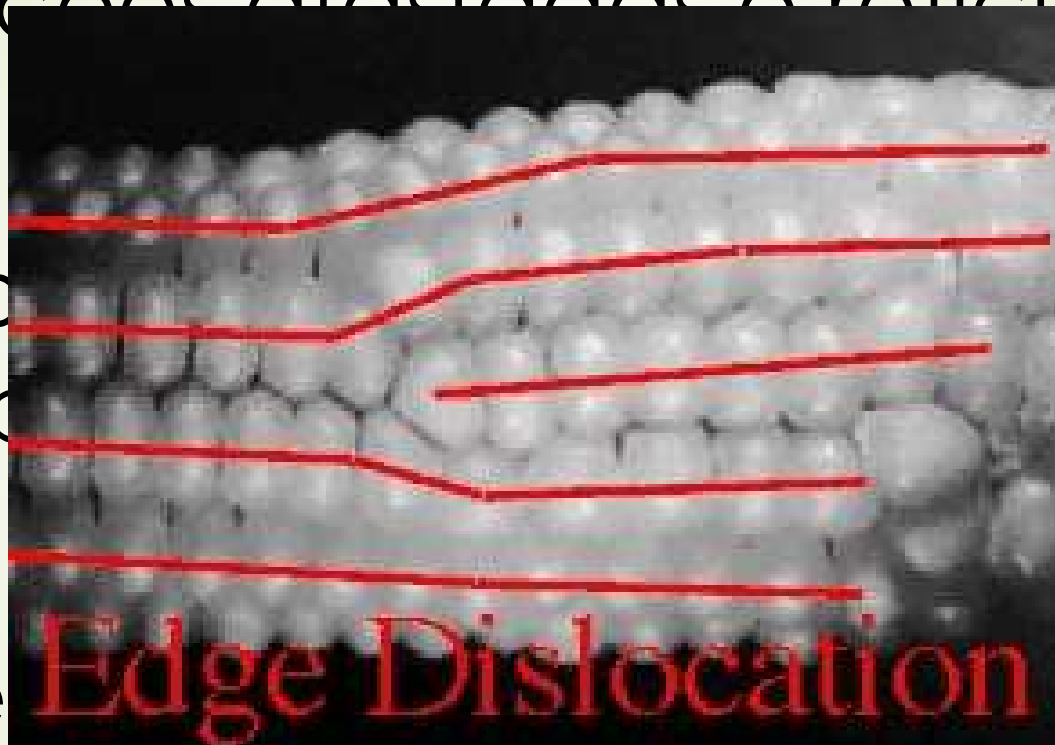


# DISCORDÂNCIAS EM ARESTA

- Em posições afastadas o retículo cristalino

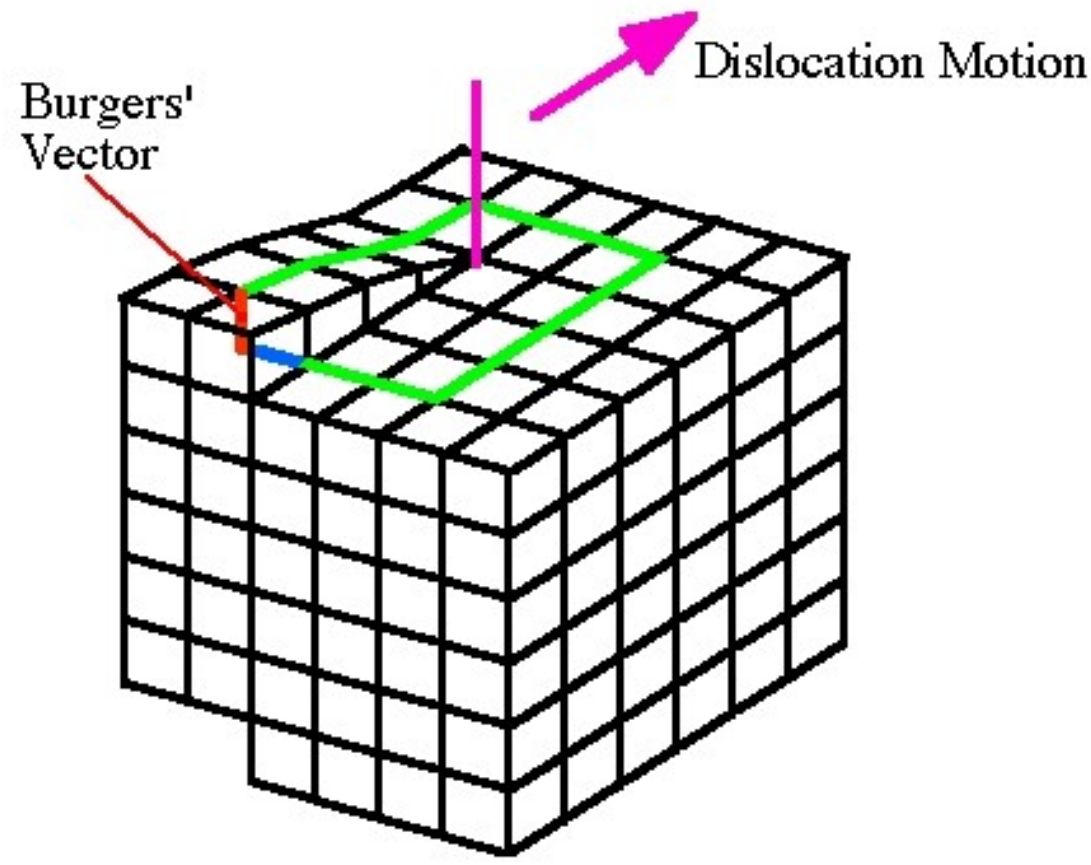
- A discordância é representada pelo símbolo da linha

- Se o símbolo adicional estiver incluído na fração inferior do cristal a discordância será representado por: T



# DISCORDÂNCIAS EM ESPIRAL

- Pode ser considerada como sendo formada por uma única dislocação que é a distorção permanente da rede cristalina.
- A região deslocada para cima é a região anterior à dislocação e a região deslocada para baixo é a região posterior à dislocação.

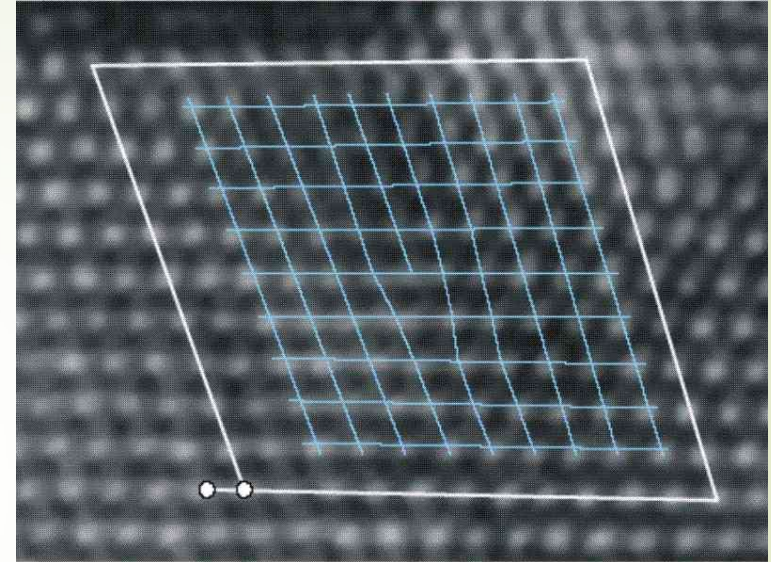


# DISCORDÂNCIAS MISTA

- A maioria das discordâncias encontrada em materiais cristalinos não é provavelmente nem uma discordância puramente aresta nem uma discordância puramente espiral, porém exibe componentes que são característicos de ambos os tipos; essas são conhecidas por discordâncias mistas.

# DISCORDÂNCIAS

- As discordâncias podem ser observadas em materiais cristalinos mediante o uso de técnicas de microscopia eletrônica



As discordâncias estão envolvidas na deformação plástica de materiais cristalinos, como será visto posteriormente

# 3- DEFEITOS PLANOS OU INTERFACIAIS

- Essas imperfeições incluem:
  - Possuem duas dimensões e normalmente separam as regiões superficiais externas dos materiais que possuem contornos de grão e/ou diferentes estruturas cristalinas e/ou orientações cristalográficas.
  - contornos de grão
  - contornos de macla
  - falhas de empilhamento
  - contornos de fases

# DEFEITOS NA SUPERFÍCIE EXTERNA

- É o mais óbvio
- Na superfície os átomos não estão completamente ligados ao número máximo de vizinhos
- Então o estado energia dos átomos na superfície é maior que no interior do cristal
- Os materiais tendem a minimizar esta energia



# CONTORNOS DE GRÃO



**Monocristal:** Material com apenas uma orientação cristalina, ou seja, que contém apenas um

grão

**Policristal:** Material com mais de uma orientação cristalina, ou seja, que contém vários grãos

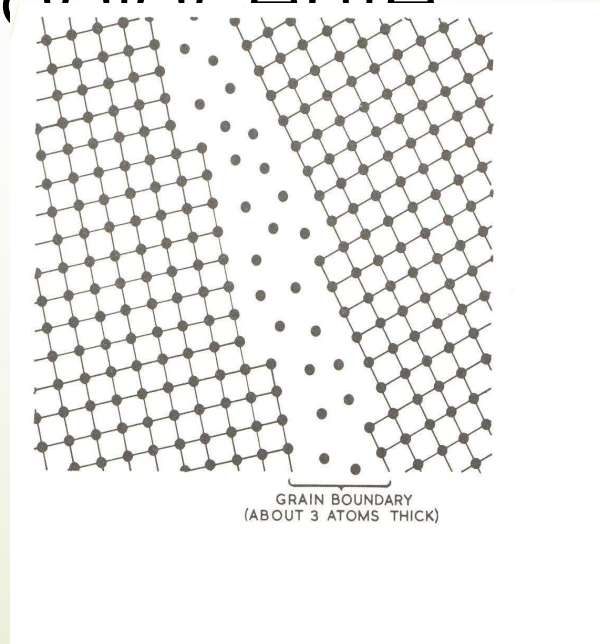
Contorno que separa dois pequenos grãos ou cristais que possuem diferentes orientações

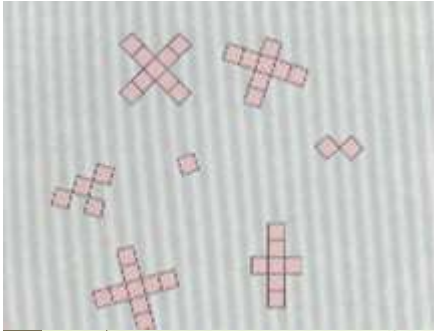
cristalográficas em materiais policristalinos .

um cristal = um

# CONTORNOS DE GRÃO

- Dentro da região do contorno, que possui provavelmente a largura equivalente a distancia de apenas alguns átomos, existem alguns desencontros atômicos na transição da orientação cristalina de um grão para aquela de outro adjacente





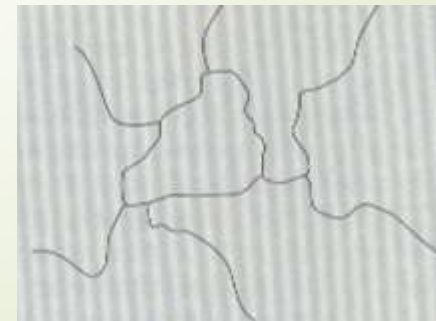
Formação de pequenos núcleos de cristalização (cristalitos)

Crescimento dos cristalitos



Formação de Grãos, com formatos irregulares, após completada a solidificação.

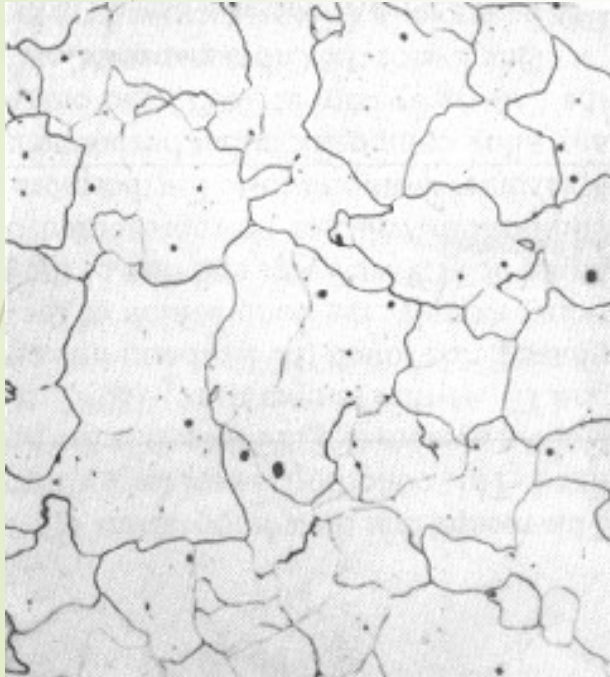
Vista, num microscópio, da estrutura de Grãos (as linhas escuras são os contornos dos Grãos)



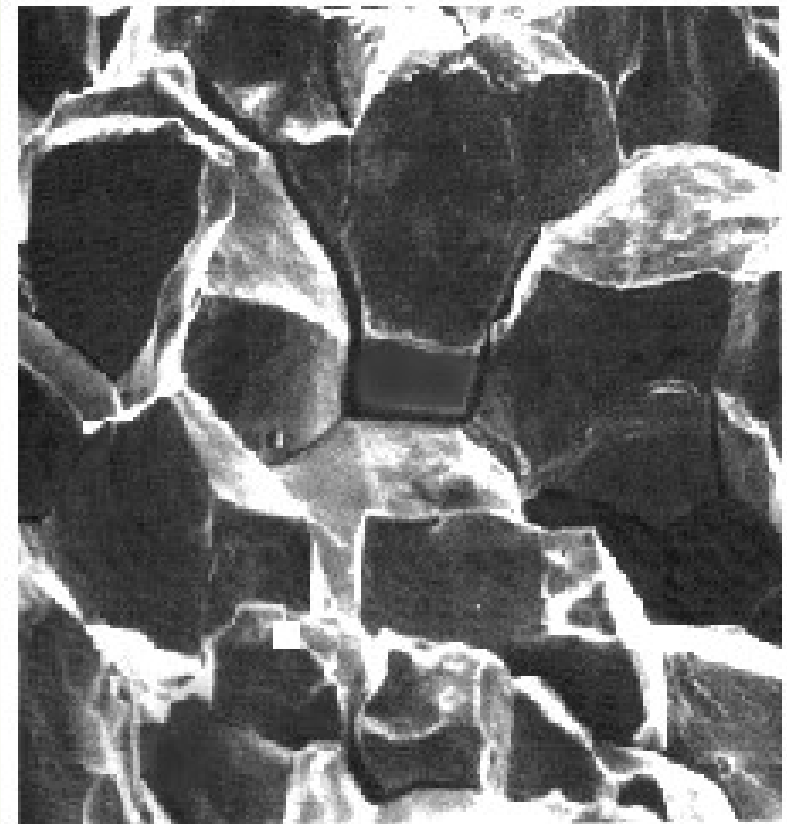
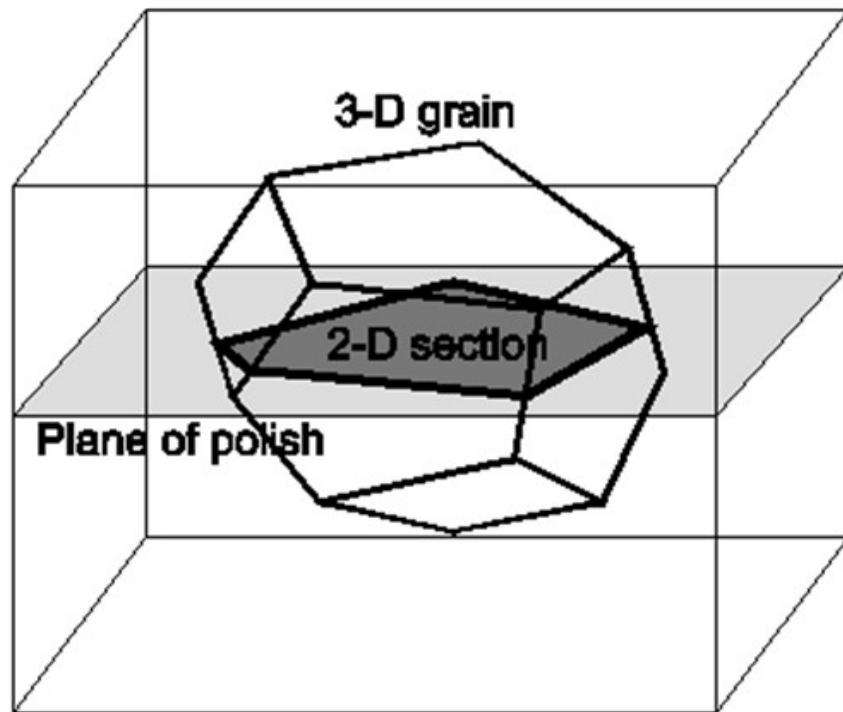
# CONTORNOS DE GRÃO

- Os átomos estão ligados de maneira menos regular ao longo de um contorno de grão;
- Conseqüentemente existe uma energia interfacial ou de contorno de grão que é semelhante à energia de superfície;

Como  
conseqüência, os  
contornos de grão  
são quimicamente  
mais reativos.

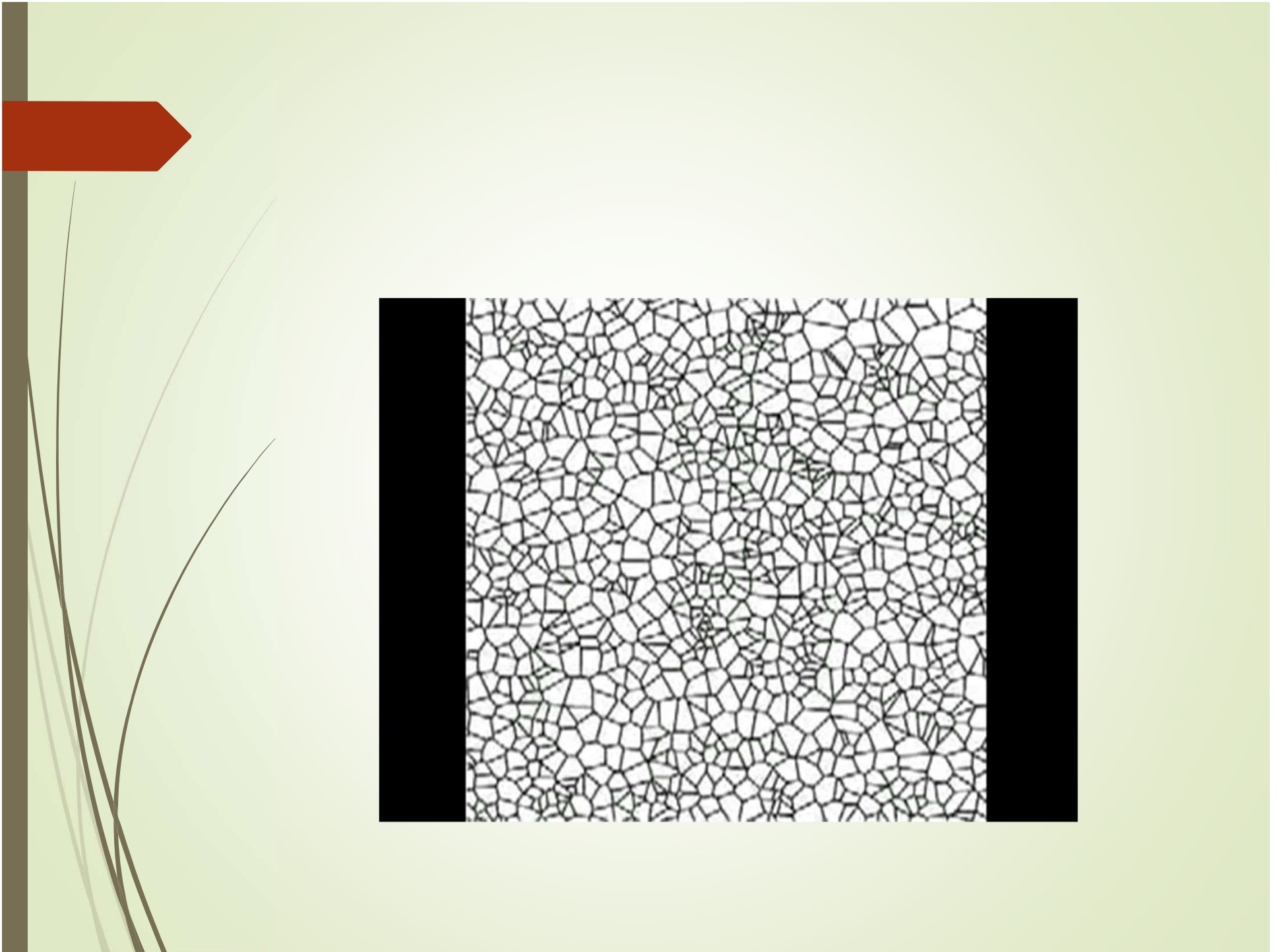


Além disso os  
átomos de impureza  
com freqüência se  
segregam  
preferencialmente  
ao longo desses



# CONTORNOS DE GRÃO

- A energia interfacial total é menor em materiais com grãos grandes ou grosseiros do que em materiais com grãos mais finos, uma vez que existe menos área de contorno nos primeiros;  
Os grãos crescem quando se encontram a temperaturas elevadas, a fim de reduzir a energia de contorno total;

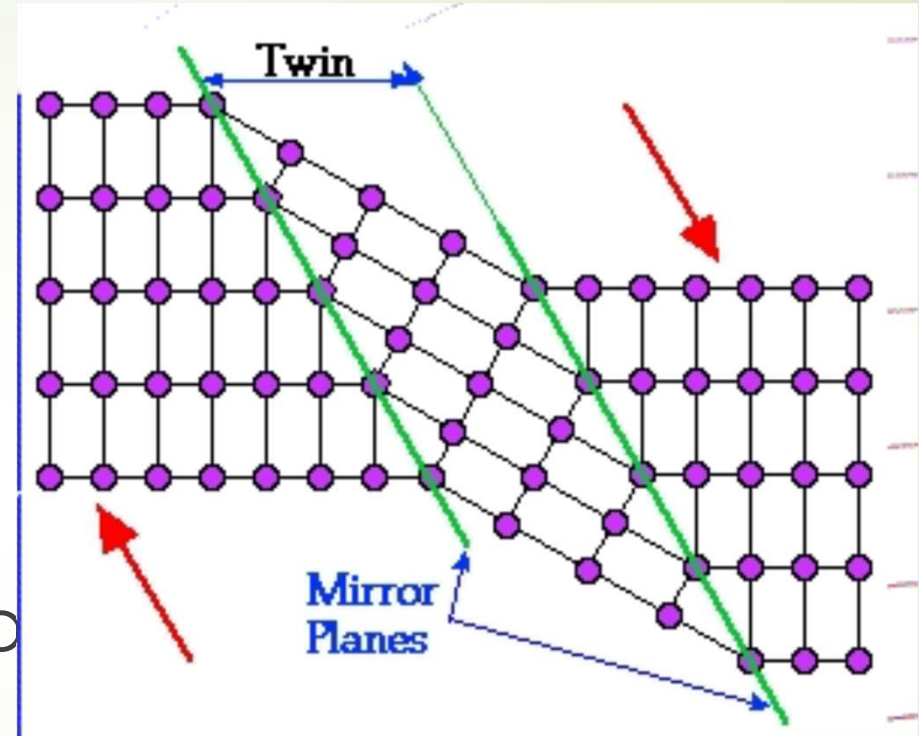




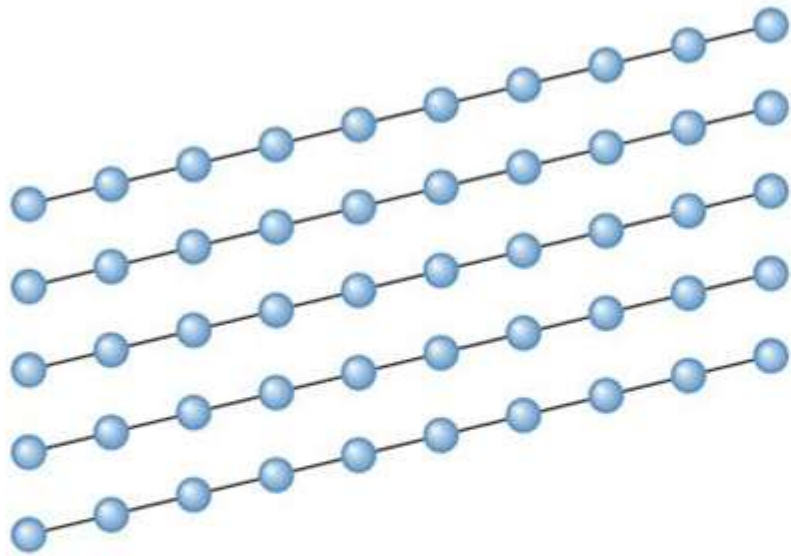
- Materiais com grãos menores apresentarão maior resistência, pois a diferença de orientação resultará em uma descontinuidade de plano de escorregamento;
- Apesar do arranjo desordenado dos átomos e da falta de uma ligação regular ao longo dos contornos de grãos um material policristalino ainda é muito forte.

# CONTORNOS DE MACLA OU TWIN

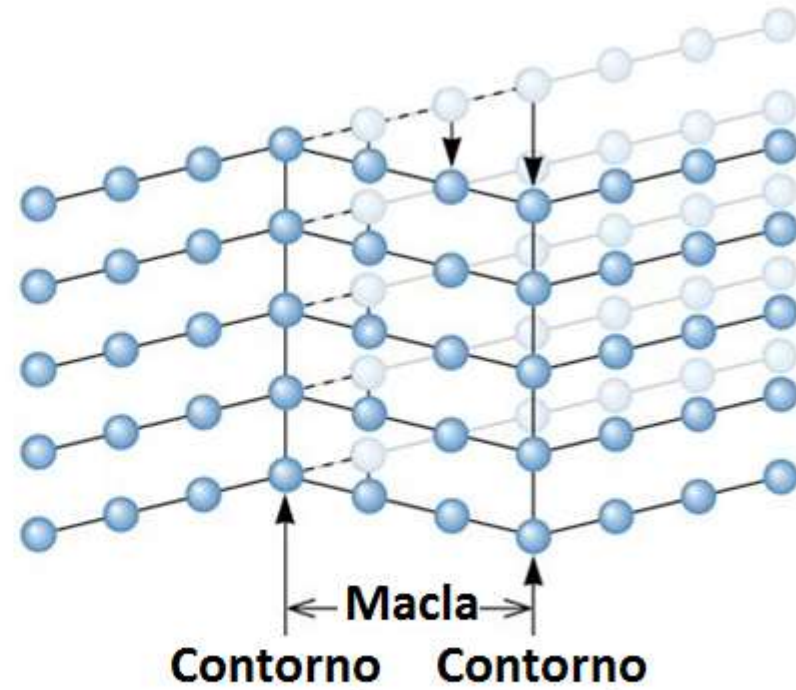
- ➔ É um tipo especial de contorno de grão
- ➔ Os átomos em um dos lados do contorno estão localizados em posições em imagem em espelho dos átomos no outro lado do contorno



Resultam de deslocamentos atômicos que são produzidos a partir de forças mecânicas de cisalhamento aplicadas (maclas de deformação) e também durante tratamentos térmicos de recozimento realizados após deformações (maclas de recozimento)



(a)

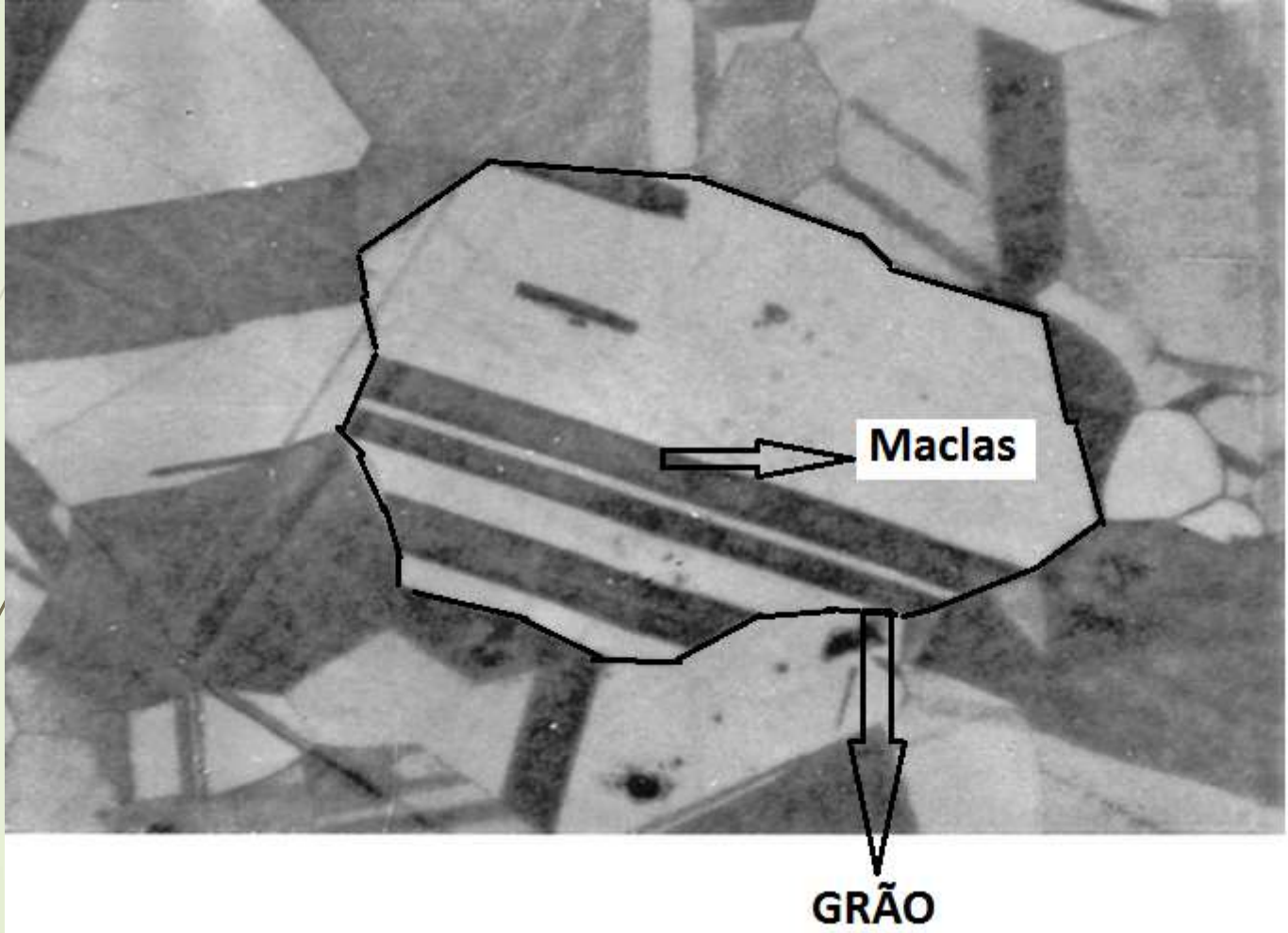


(b)

Application of a stress to the perfect crystal (a) may cause a displacement of the atoms, (b) causing the formation of a twin. Note that the crystal has deformed as a result of twinning.

# CONTORNOS DE MACLA OU TWIN

- ▶ As maclas de recozimento são encontradas tipicamente em metais que possuem uma estrutura cristalina CFC, enquanto as maclas de deformação são observadas em metais com estruturas CCC e HC



Em um estudo metalográfico são utilizados reagentes químicos para se revelar o contorno de grão.

Os átomos de um contorno de grão estão ligados a seu vizinhos de forma menos intensa que os átomos localizados no interior do grão cristalino. Tal fato permite que a região dos contornos de grão sofra mais intensamente a ação de reagentes químicos.

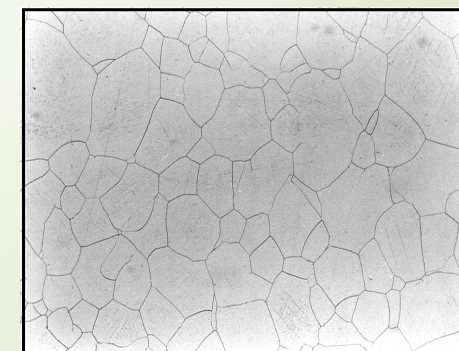
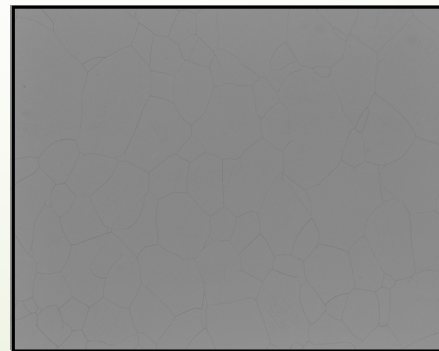
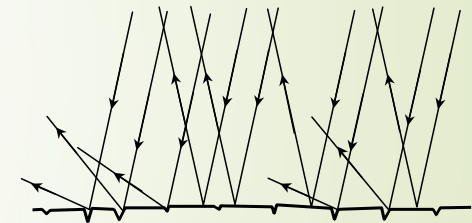
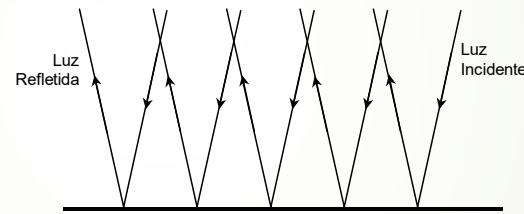
Isso permite revelar os contornos, pois é mais fácil reagir átomos dessa região em comparação com átomos do interior do grão.

Dessa maneira, a região do contorno de grão aparece mais escura no microscópio devido à capacidade menor de refletir a luz em comparação com regiões onde a reação química não foi intensa, como mostra a figura 4.20.

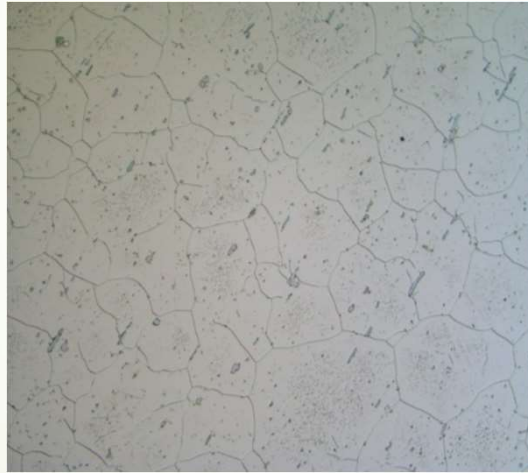
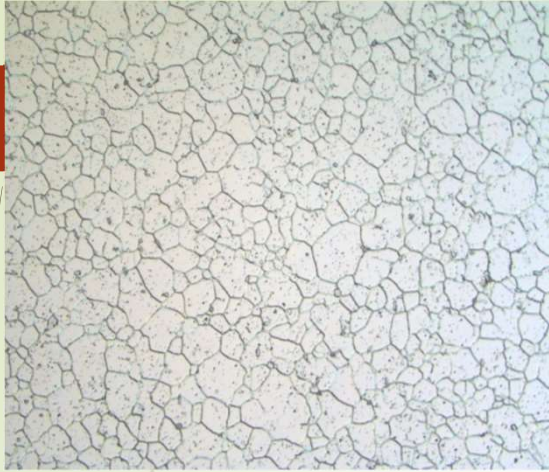
Figura 4.20.

(a) Amostra só polida e  
(b) atacada quimicamente.

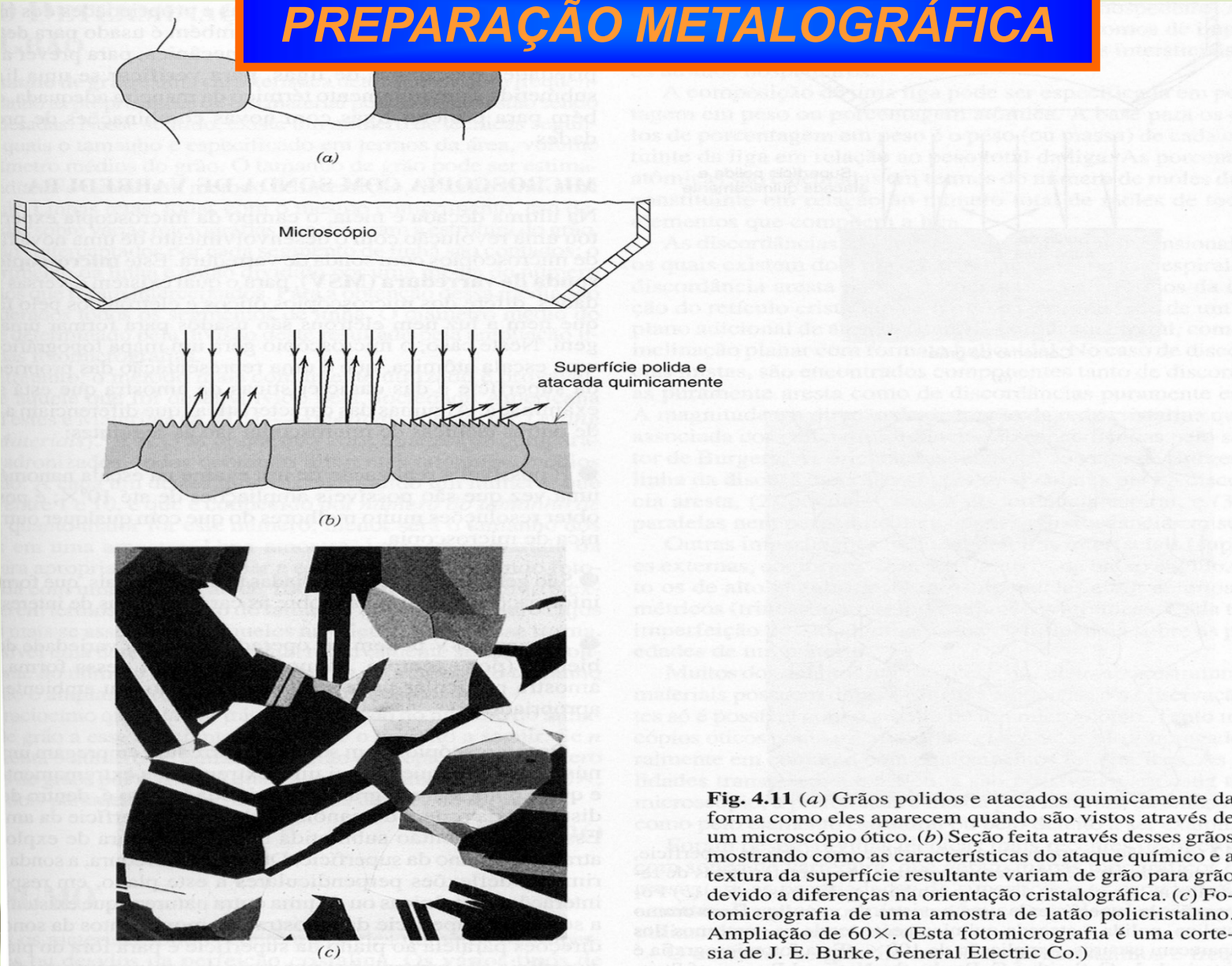
A região do contorno de grão aparece mais escura no microscópio devido à menor capacidade de reflexão de luz da mesma.





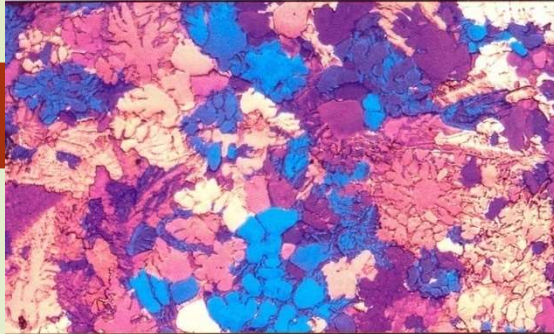


# PREPARAÇÃO METALGRÁFICA

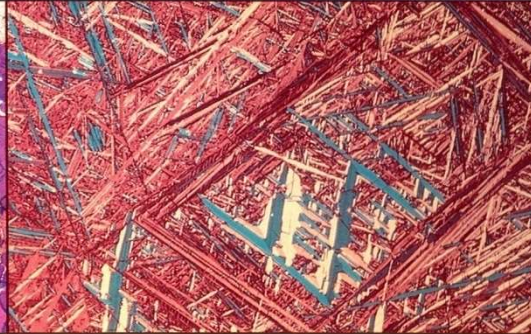


**Fig. 4.11** (a) Grãos polidos e atacados quimicamente da forma como eles aparecem quando são vistos através de um microscópio ótico. (b) Seção feita através desses grãos mostrando como as características do ataque químico e a textura da superfície resultante variam de grão para grão devido a diferenças 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.)

*Non-Ferrous*

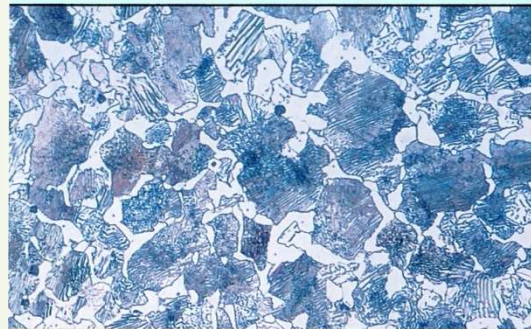


**Aluminum**

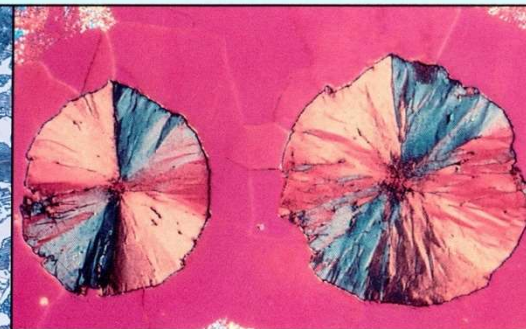


**Aluminum-Bronze**

*Ferrous*



**Medium Carbon Steel**



**Ductile Cast Iron**

*Titanium*



**Titanium 6-4**

*Sintered Carbides*



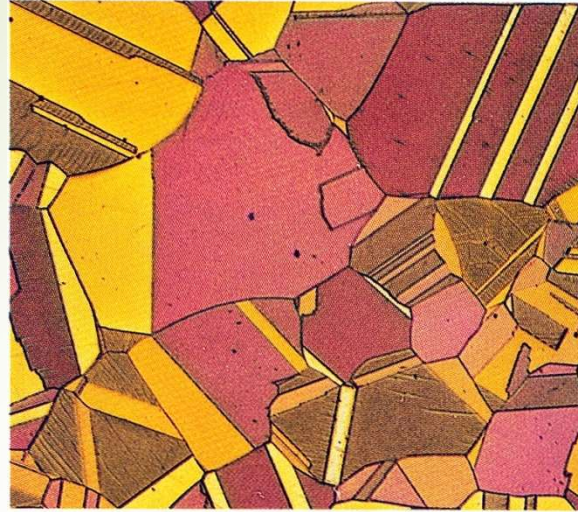
**Tungsten Carbide**



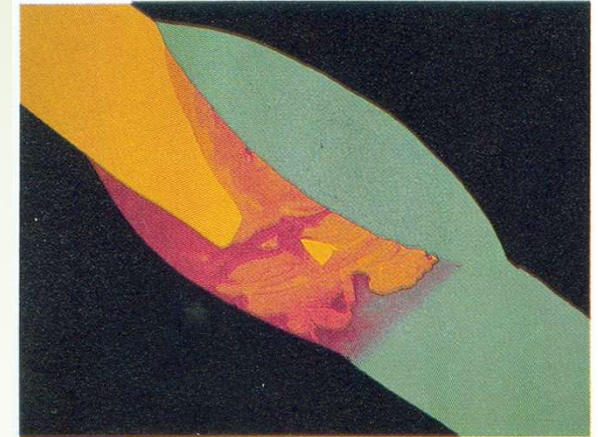
**Fig. 39** Fe-1C alloy etched with acidified 1 g  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  in 100 mL  $\text{H}_2\text{O}$  to color the cathodic cementite. The cementite in the pearlite is blue; grain-boundary cementite is violet. 500 $\times$ . (G.F. Vander Voort)



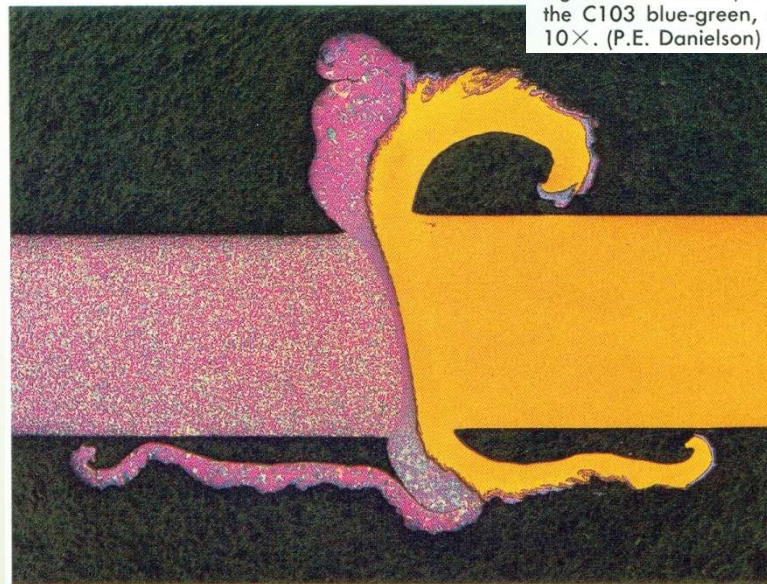
**Fig. 32** Electron beam welded 32-mm (1 $\frac{1}{4}$ -in.) thick C103 plate. The vivid grain color separation is due to heat tinting. See Fig. 31 for specimen preparation. 10 $\times$ . (P.E. Danielson)



**Fig. 42** Alpha-brass (Cu-30Zn), cold worked and annealed. Color etching with Klemm's I reagent, which required approximately 1 h, revealed all the grains and annealing twins. 100 $\times$ . (G.F. Vander Voort)



**Fig. 52** Same weld as shown in Fig. 31, but specimen swab etched in 5 mL lactic acid, 5 mL  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 5 mL  $\text{HNO}_3$ , and 5 mL HF, then anodized (see Fig. 50 for solution) at 115 V. The Ta-10W is yellow, the C103 blue-green, and the alloyed area pink-red. 10 $\times$ . (P.E. Danielson)



**Fig. 51** Friction-welded tubing (zirconium to titanium). Note the small heat-affected zone produced by this weld process. The zirconium is yellow; the titanium, blue-purple. See Fig. 50 for specimen preparation. 10 $\times$ . (P.E. Danielson)



➤ Acabou a aula, acabou a aula