

Materiais Metálicos

Lauralice de C. F. Canale

Depto de Eng Materiais

EESC-USP

Aula T2

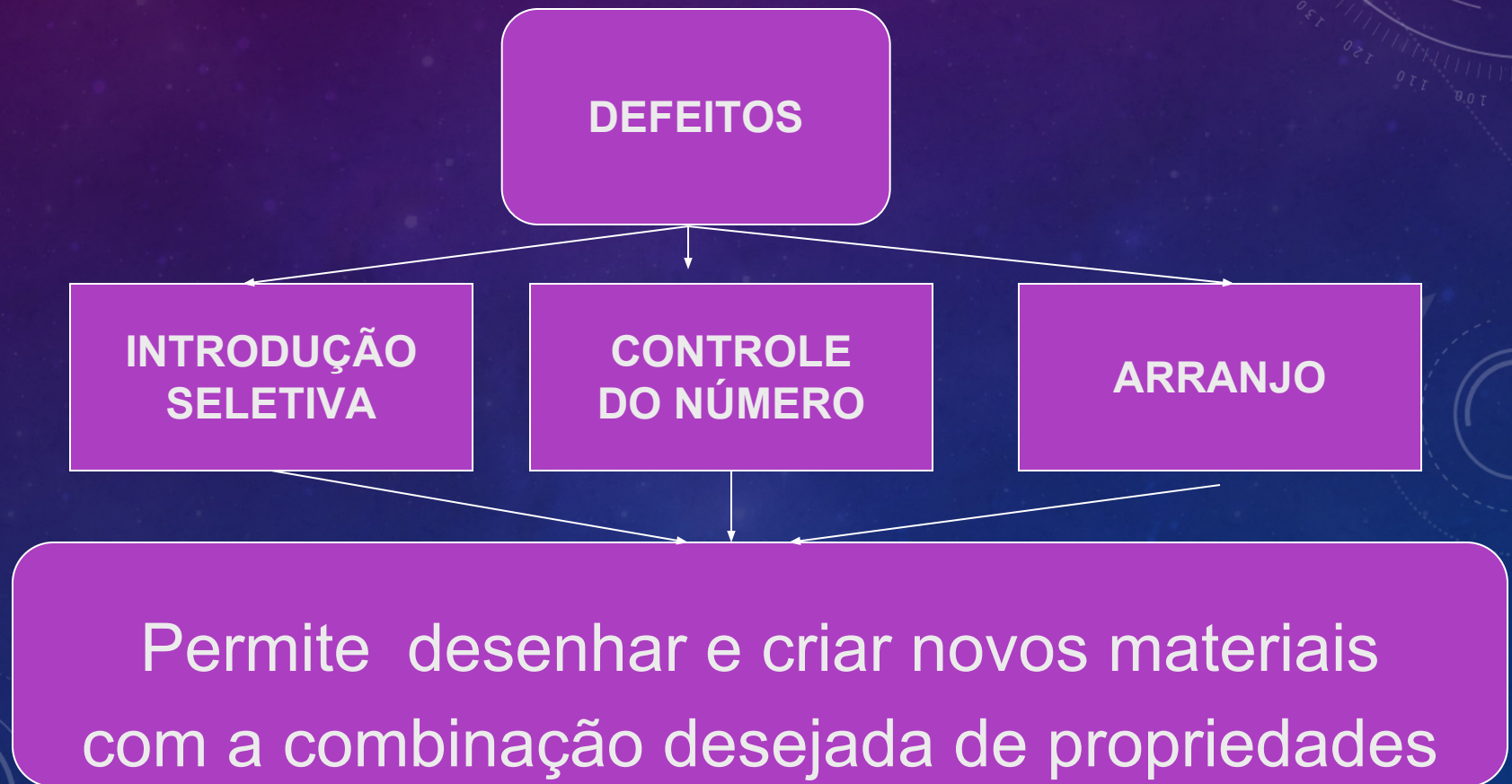
IMPERFEIÇÕES EM SÓLIDOS

The background is a gradient from dark purple at the top to dark blue at the bottom, speckled with white dots resembling a starry sky. In the top right corner, there is a large, semi-circular technical diagram with concentric circles and radial lines, resembling a protractor or a gauge, with numerical markings from 0 to 210. In the bottom right corner, there is a smaller circular diagram with concentric circles and a dashed outer ring, with an arrow indicating a clockwise direction. In the bottom left corner, there is a partial circular diagram with concentric circles and a dashed outer ring, with an arrow indicating a counter-clockwise direction.

- 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 contêm 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-



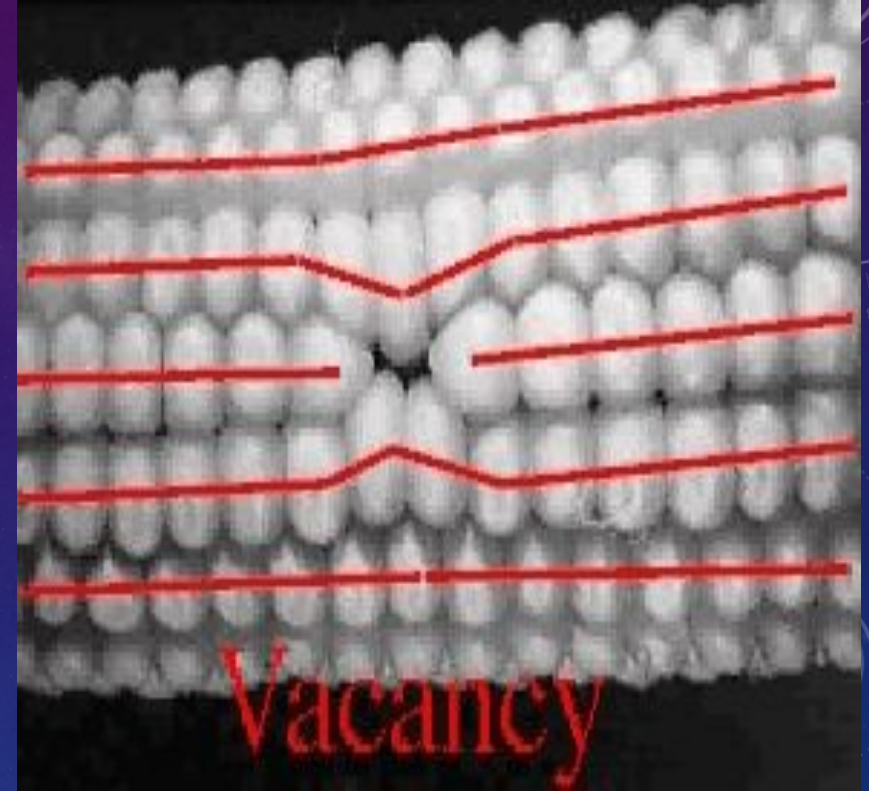
1- DEFEITOS PONTUAIS

- Lacunas ou vacâncias ou vazios
- Átomos Intersticiais
- Schottky
- Frenkel
- Impurezas

Ocorrem em sólidos iônicos, ou seja materiais cerâmicos

LACUNAS (vacâncias)

- Envolve a falta de um átomo, onde um sítio deveria estar ocupado está com um átomo faltando
- São formados durante a solidificação do cristal ou como resultado das vibrações atômicas (os átomos deslocam-se de suas posições normais)
- Não é possível criar um material isento desse tipo de defeito



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

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

- 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).

SOLUÇÕES SÓLIDAS

A estrutura cristalina do material que atua como matriz é mantida e não formam-se novas estruturas

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

Nas soluções sólidas as impurezas podem ser:

- Intersticial**
- Substitucional**

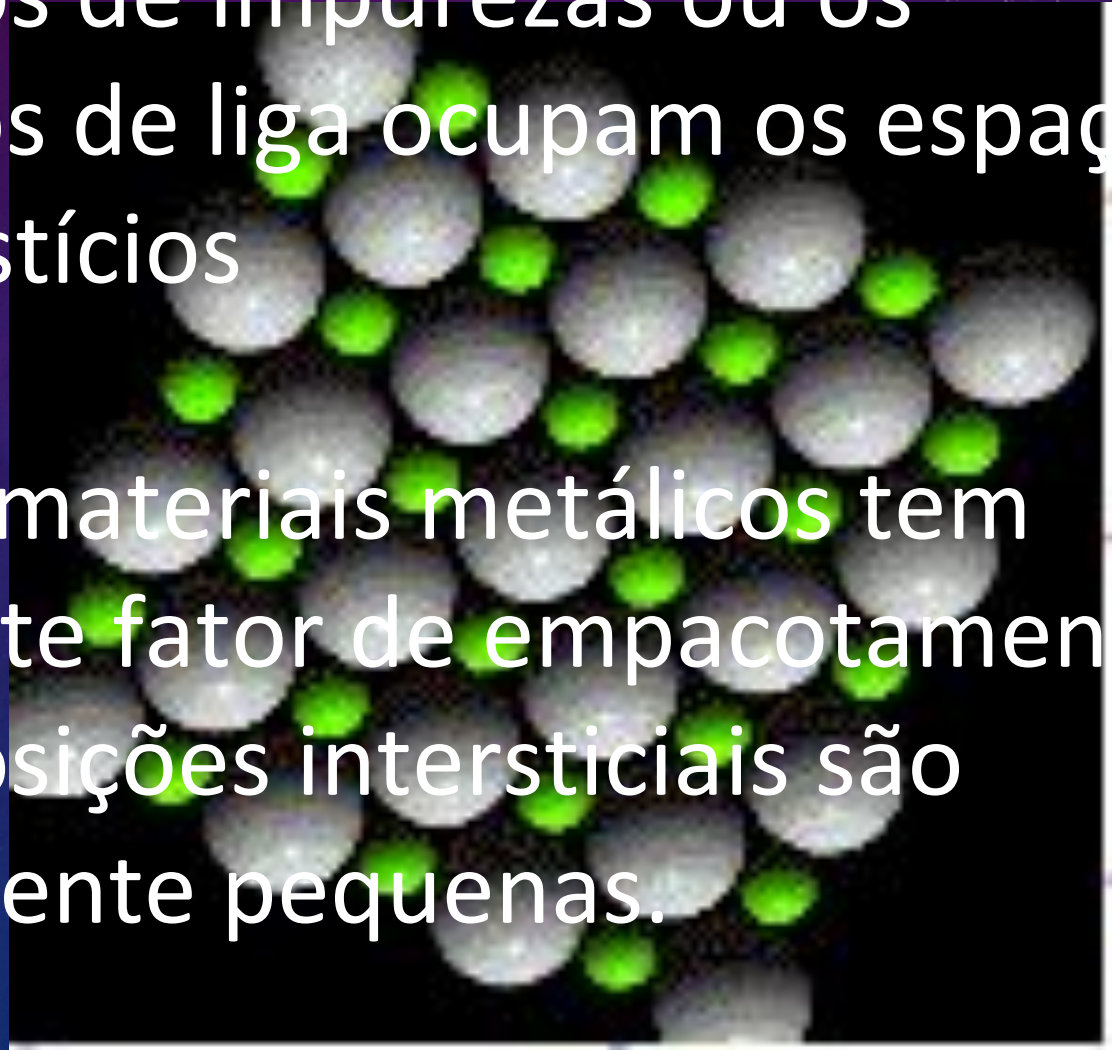
SOLUÇÕES SÓLIDAS SUBSTITUCIONAIS

- 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 impurezas ou os elementos de liga ocupam os espaços dos interstícios

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



Consequentemente 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

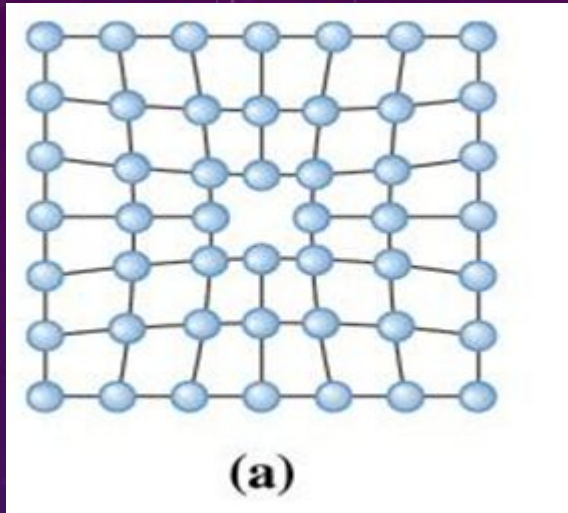
$\text{Fe} + \text{C} \rightarrow$ solubilidade máxima do C no Fe é 2,1% a 910 C (Fe CFC)

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

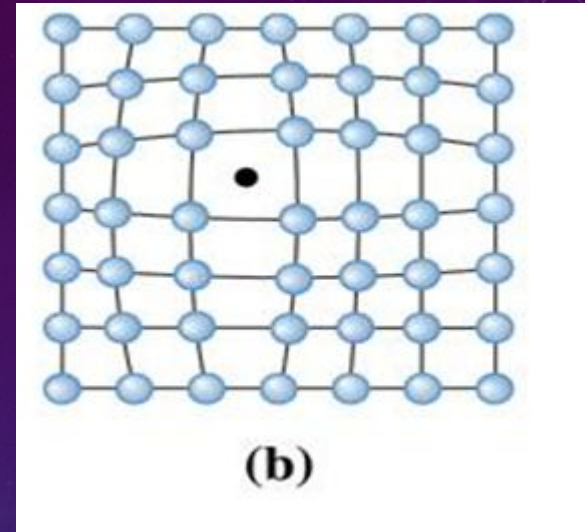


$$r_{\text{C}} = 0,071 \text{ nm} = 0,71 \text{ \AA}$$

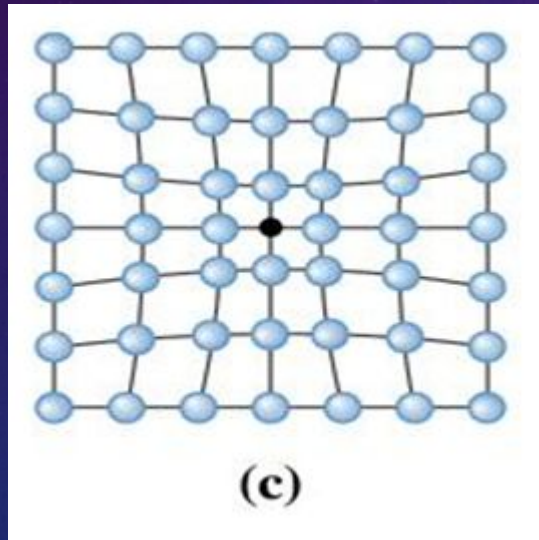
$$r_{\text{Fe}} = 0,124 \text{ nm} = 1,24 \text{ \AA}$$



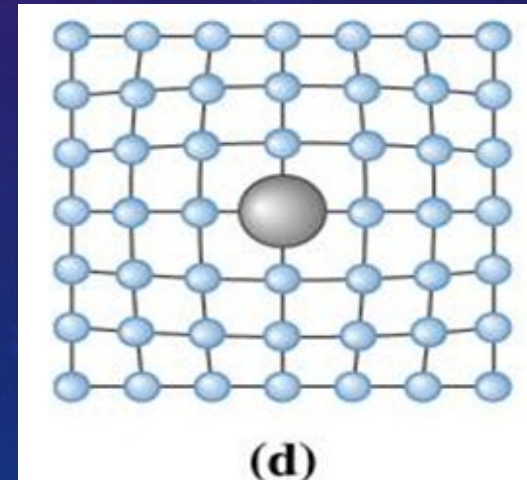
(a) vacância



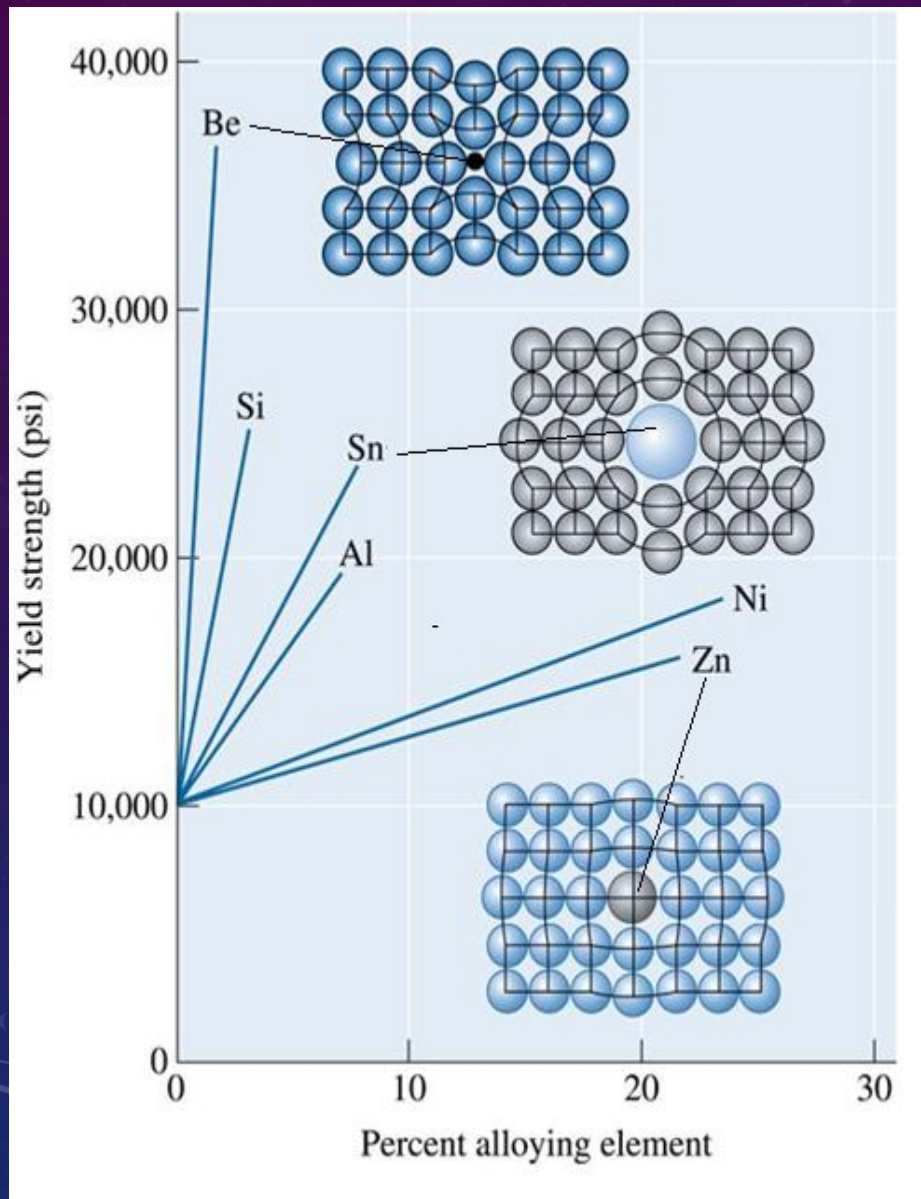
(b) átomo intersticial



**(c) pequeno átomo
sustitucional**



**(d) grande átomo
sustitucional**



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

Aumentando ambos a diferença em tamanho atômico e a quantidade do elemento de liga (soluto), aumenta-se a resistência da solução sólida.

2- DEFEITOS LINEARES: DISCORDÂNCIAS

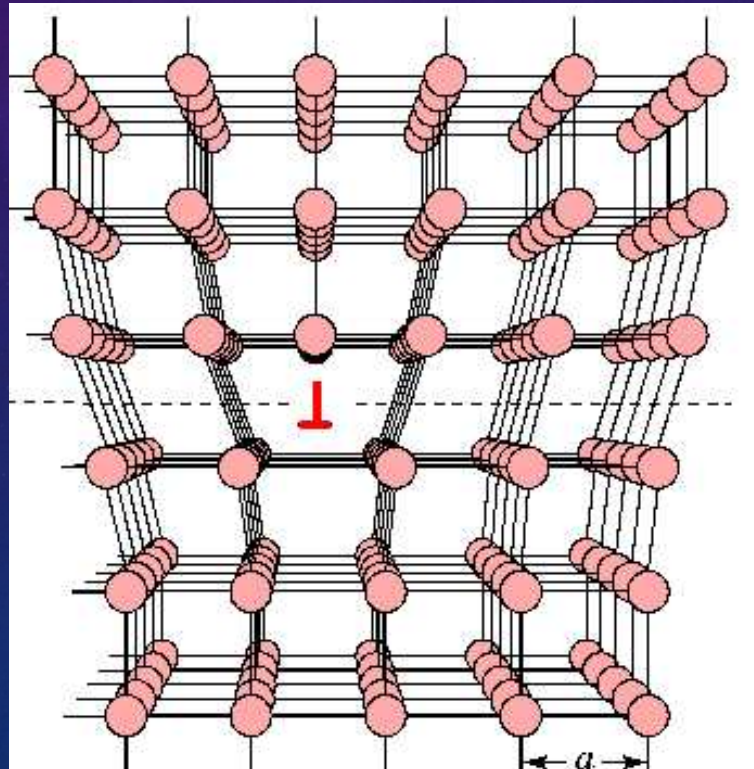
- É um defeito linear ou unidimensional em torno do qual alguns dos átomos estão desalinhados
- Podem ser:
 - Aresta - Espiral - Mista

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

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 m².

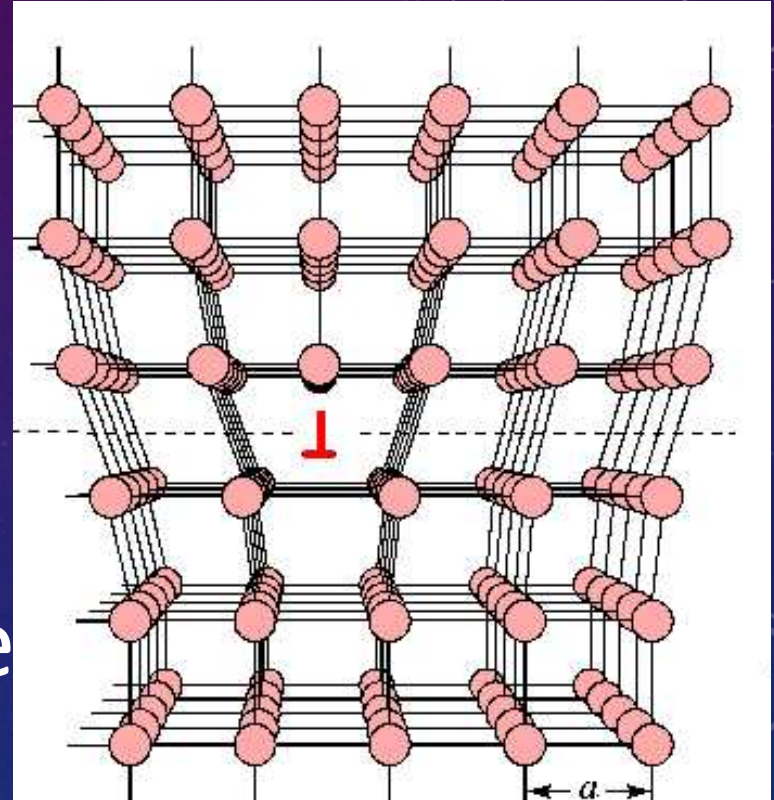
DISCORDÂNCIAS EM ARESTA

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



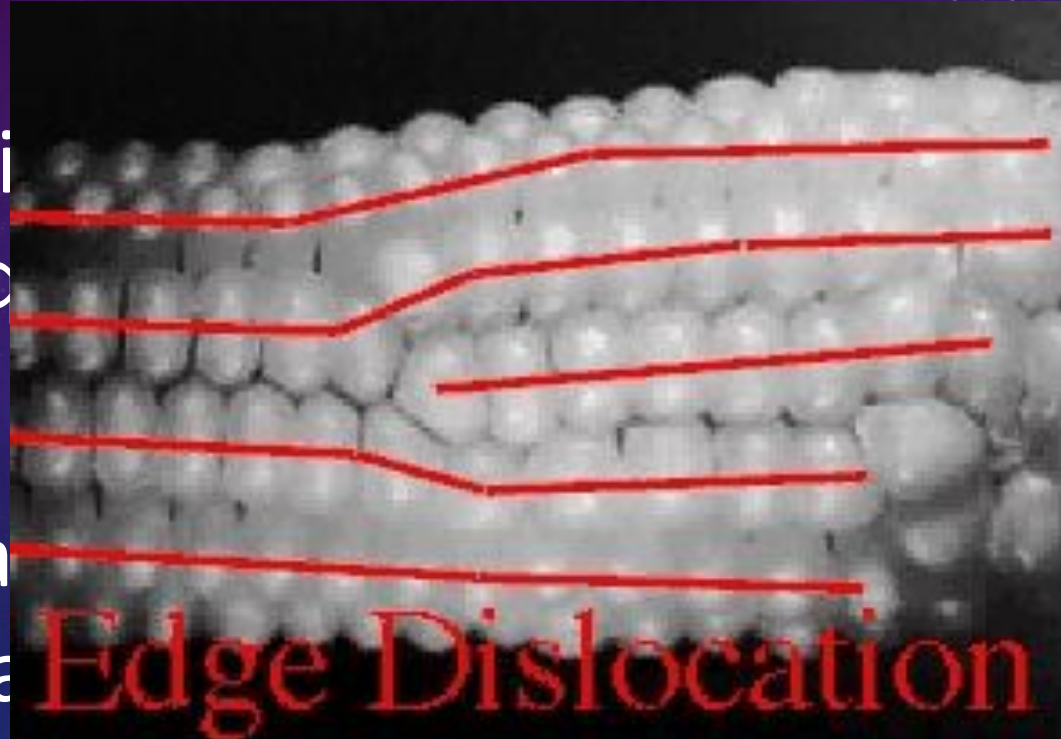
DISCORDÂNCIAS EM ARESTA

- 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 compressão)



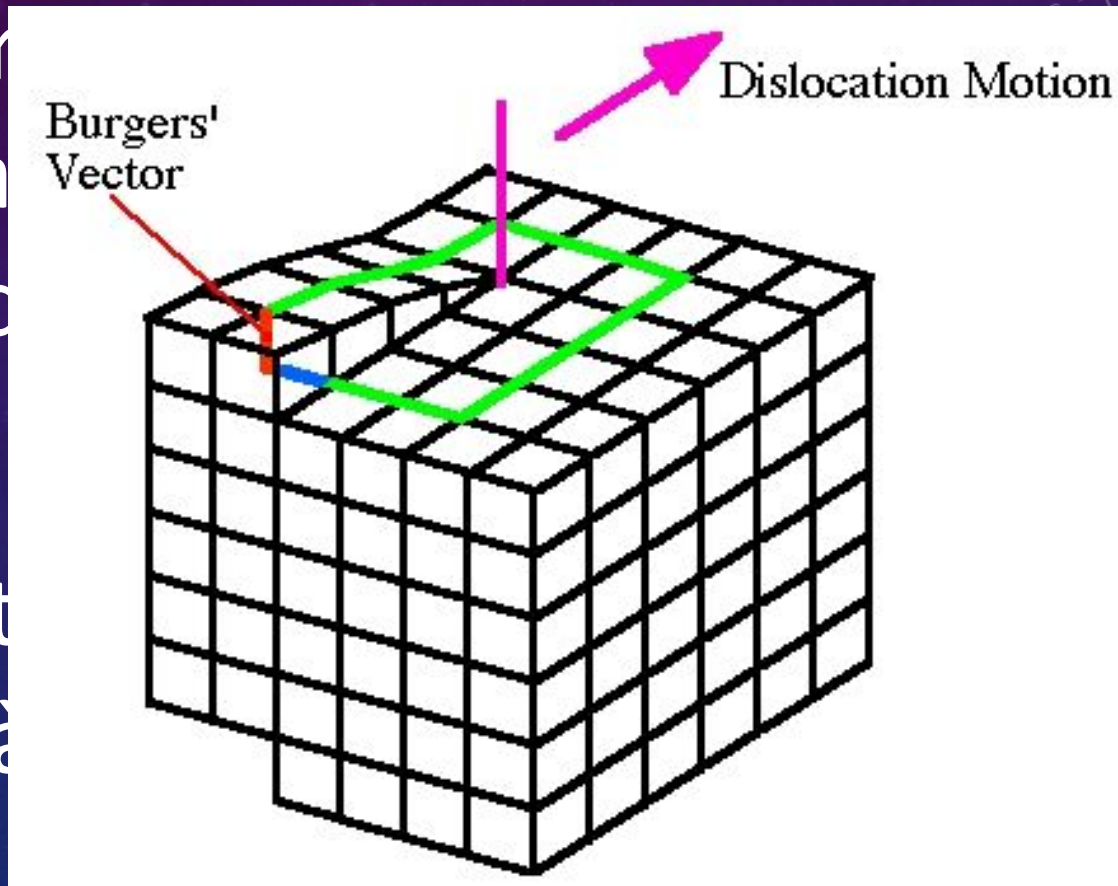
DISCORDÂNCIAS EM ARESTA

- Em posições afastadas o retículo cristalino é perfeito
- A discordância é representada pelo símbolo: $\perp$, onde a linha perpendicular indica a direção da discordância
- Se o semi-plano extra for incluído na fração da discordância será representado por: T



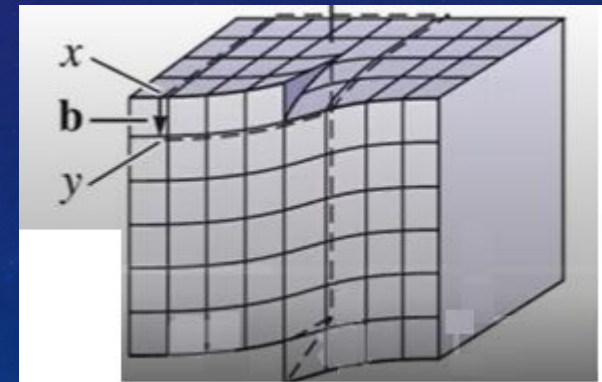
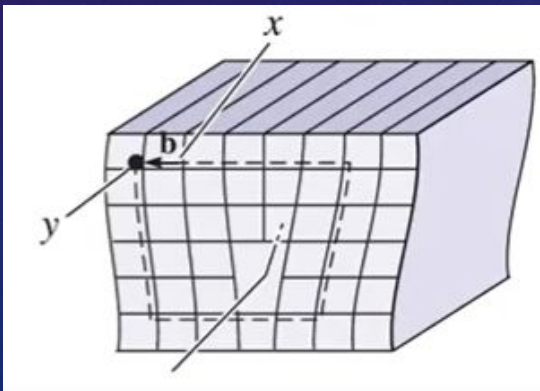
DISCORDÂNCIAS EM ESPIRAL

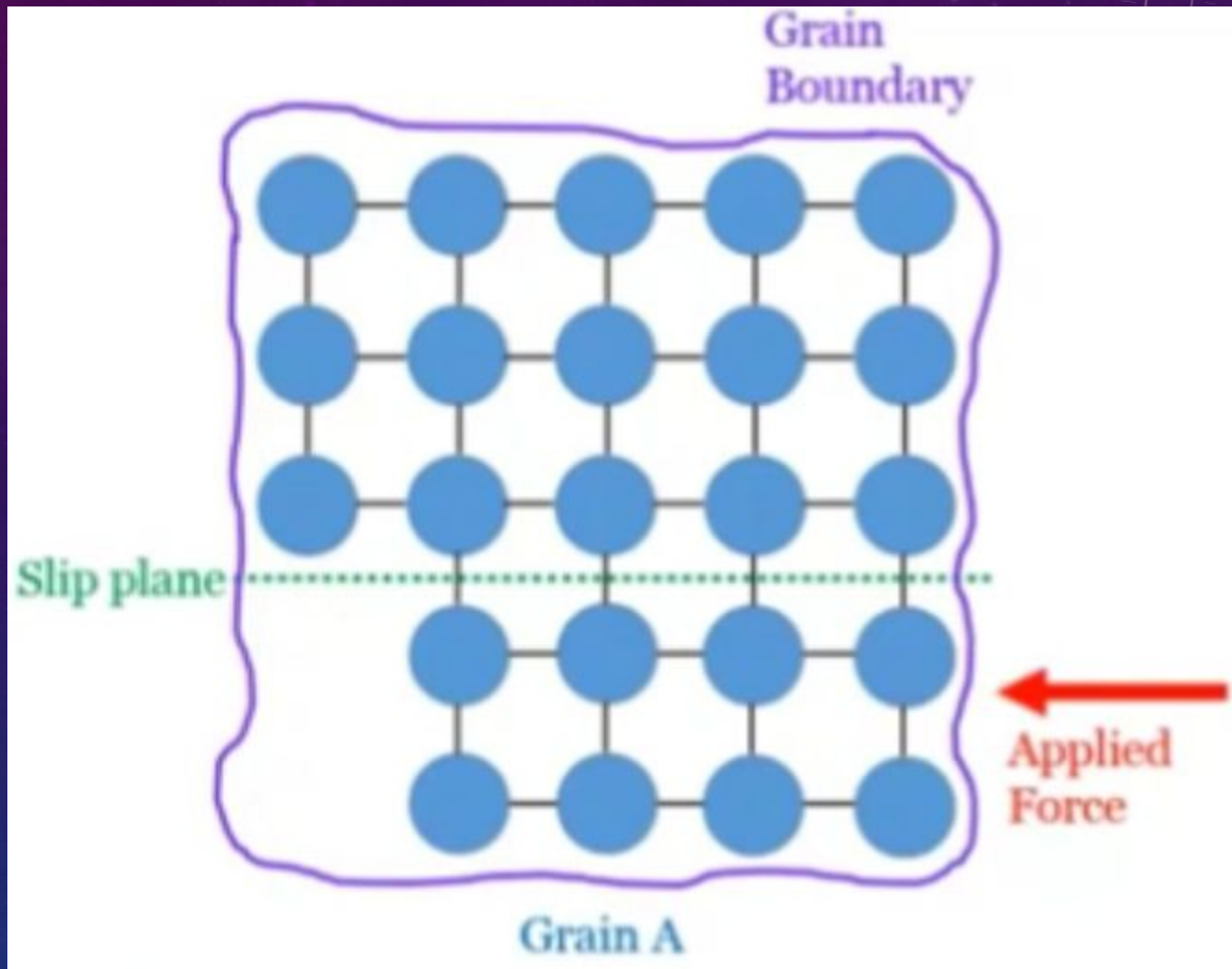
- Pode ser formada por uma distorção localizada e é aplicada a uma distorção localizada em relação a
- A região de uma distorção localizada em relação a

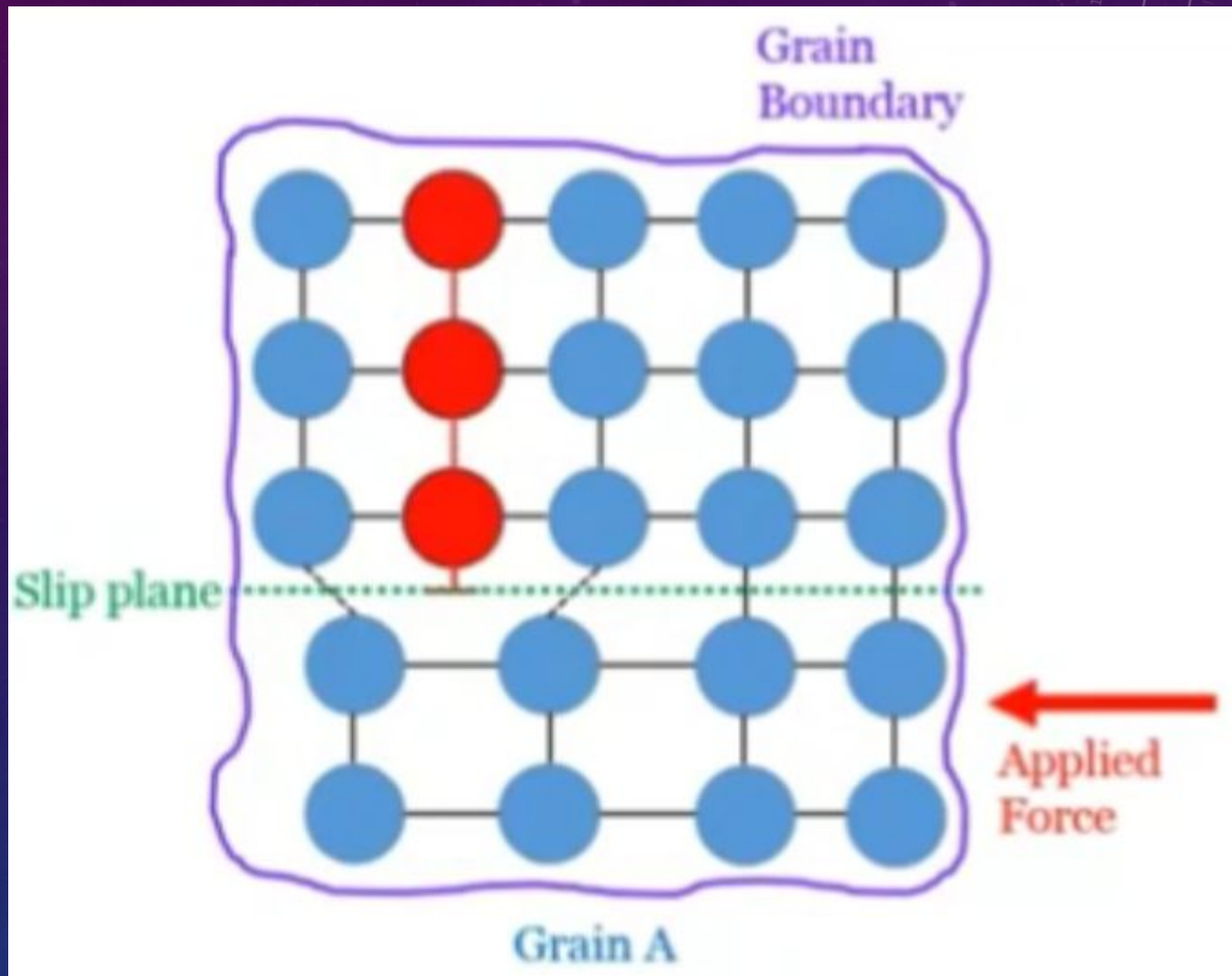


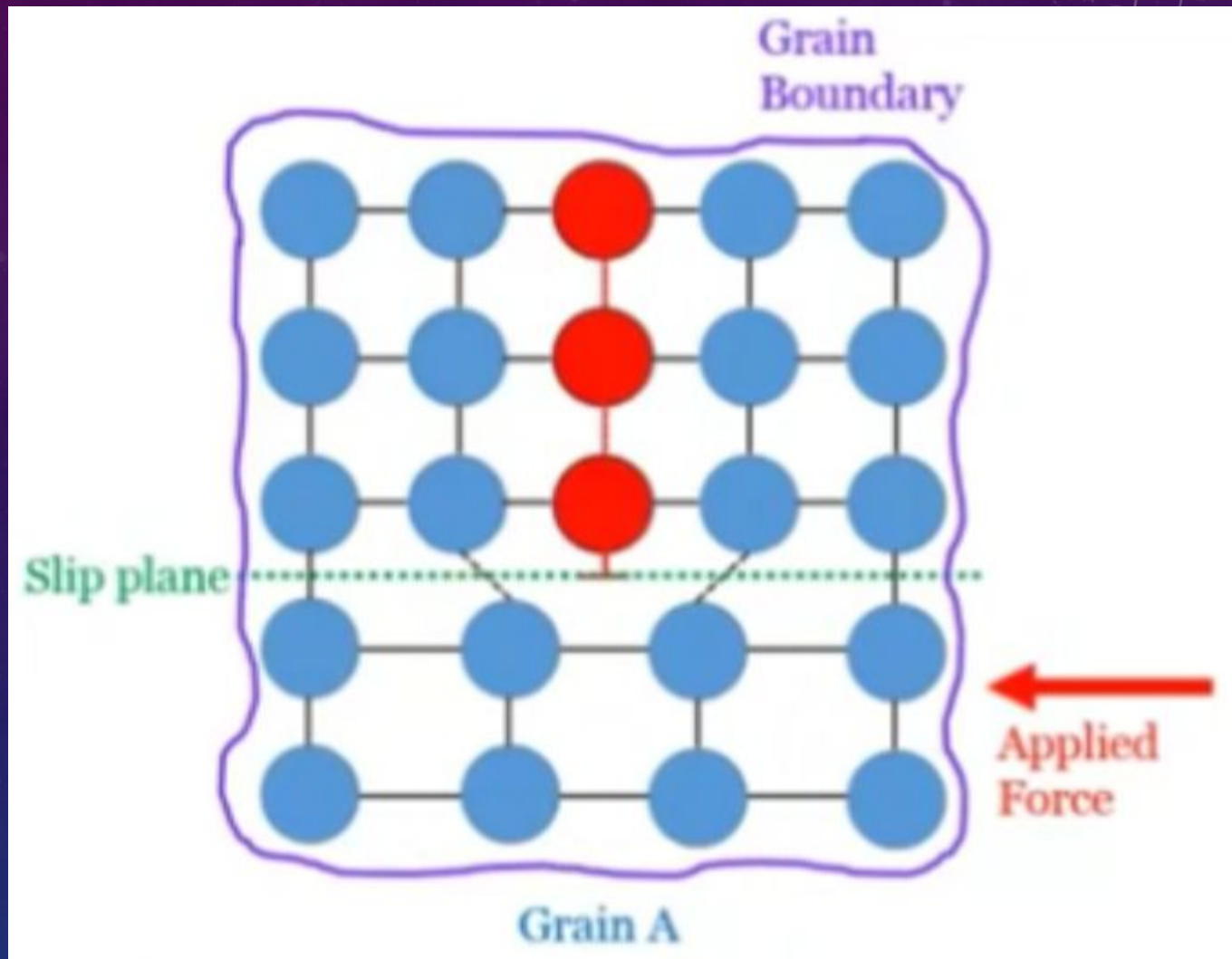
VETOR DE BURGERS

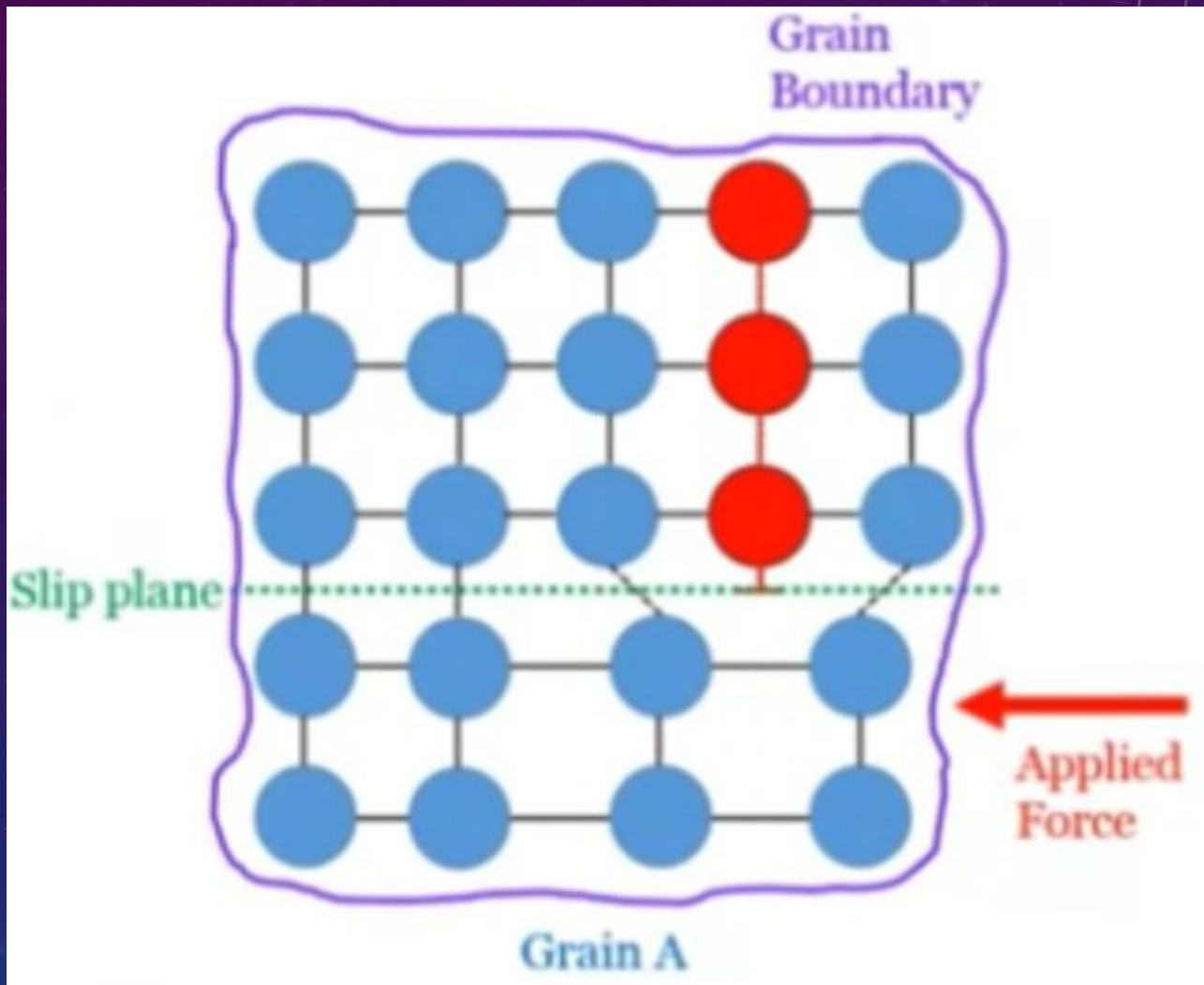
- ❑ A magnitude e a direção da distorção da rede associada a um deslocamento são expressas em termos de um **vetor de Burgers**, denotado pela letra **b**.
- ❑ A natureza de uma discordância é definida pelas orientações relativas da linha de discordância e do vetor de Burgers.
- ❑ Para discordância em **cunha** elas são **perpendiculares**
- ❑ Para discordâncias **helicoidal** elas são **paralelos**
- ❑ Para uma discordância mista, o vetor de Burgers não será nem paralelo nem perpendicular.

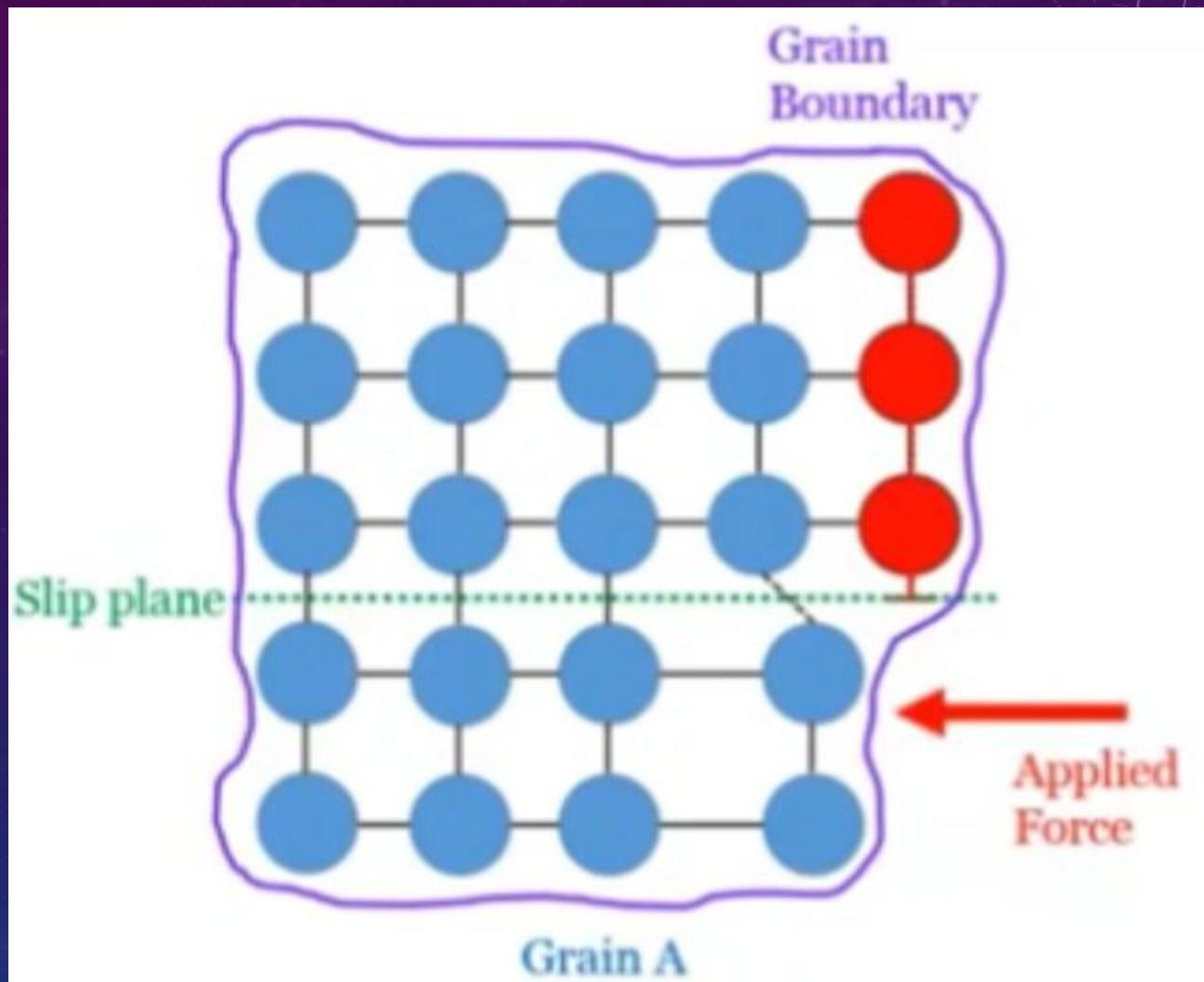


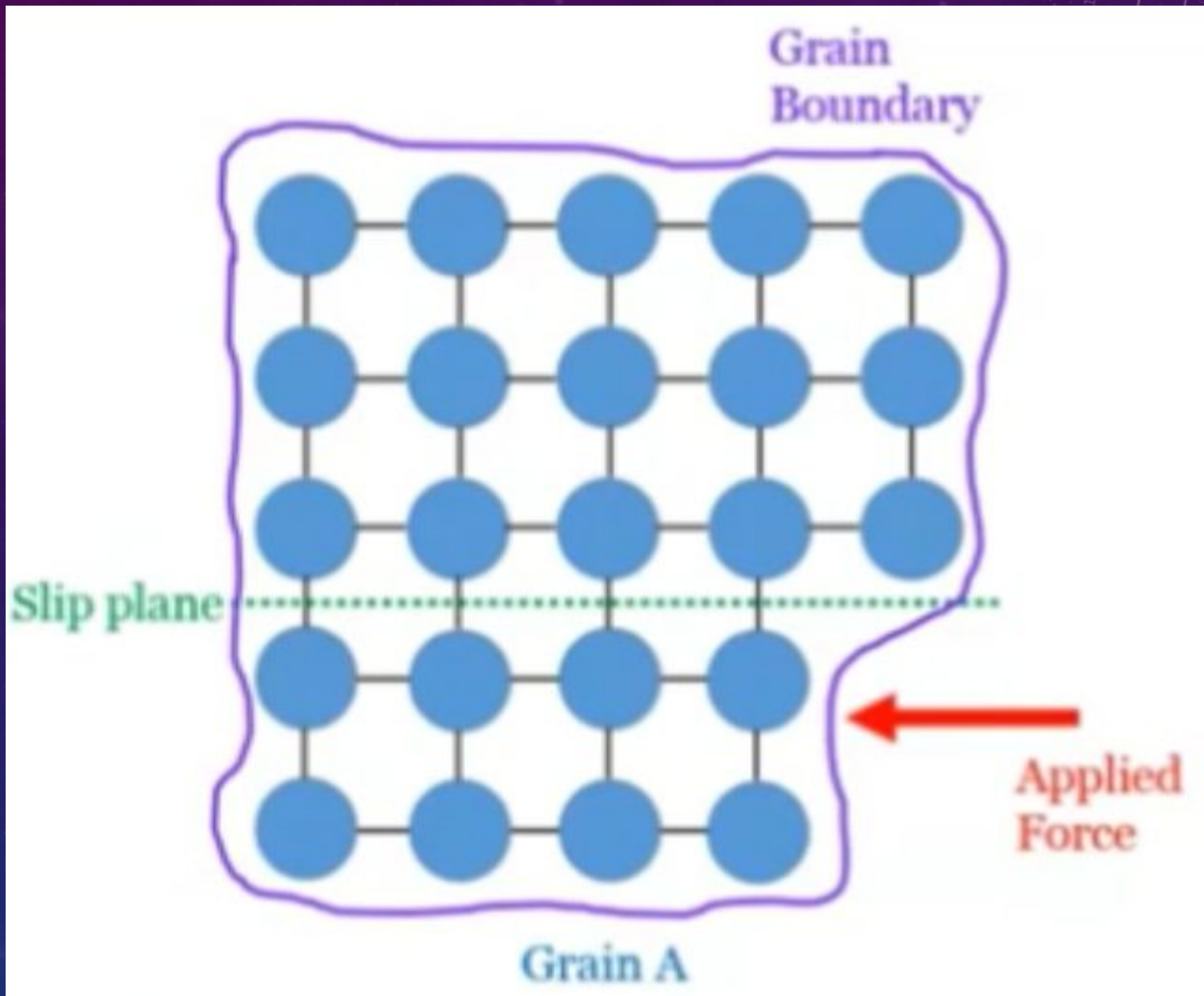


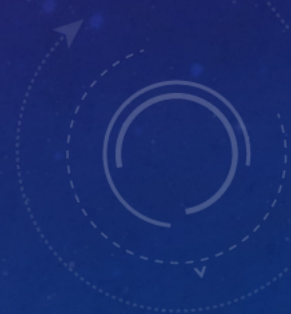
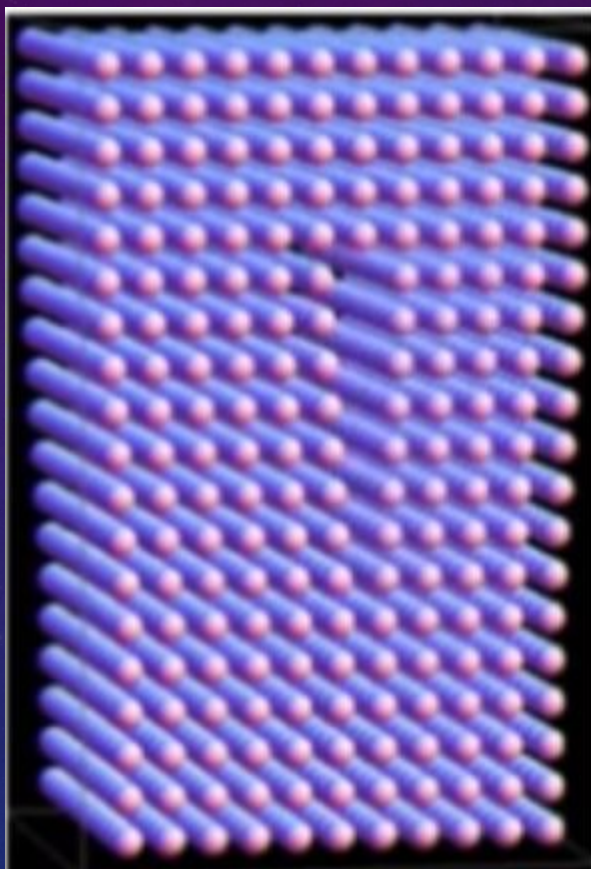


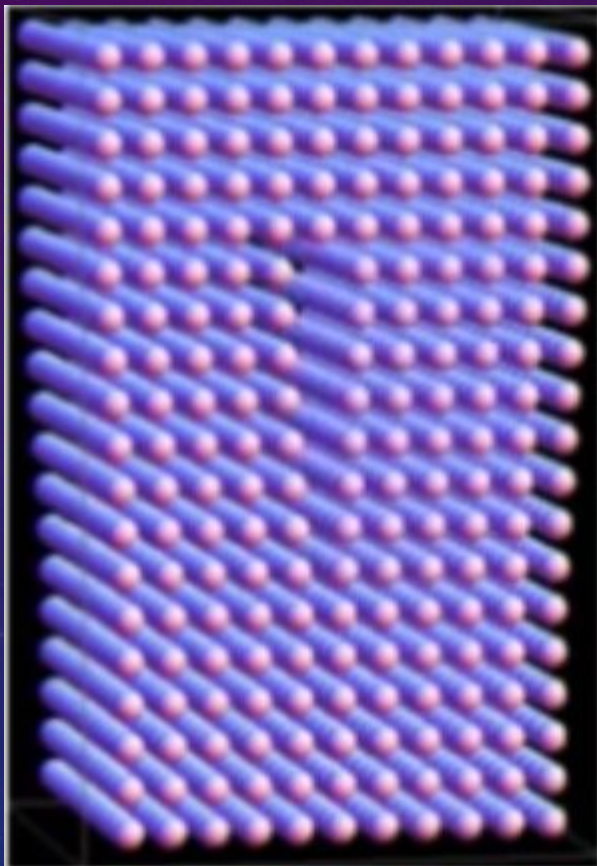


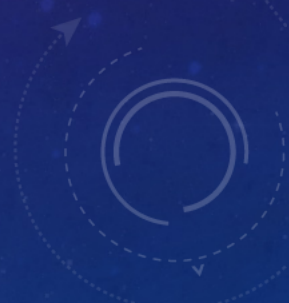
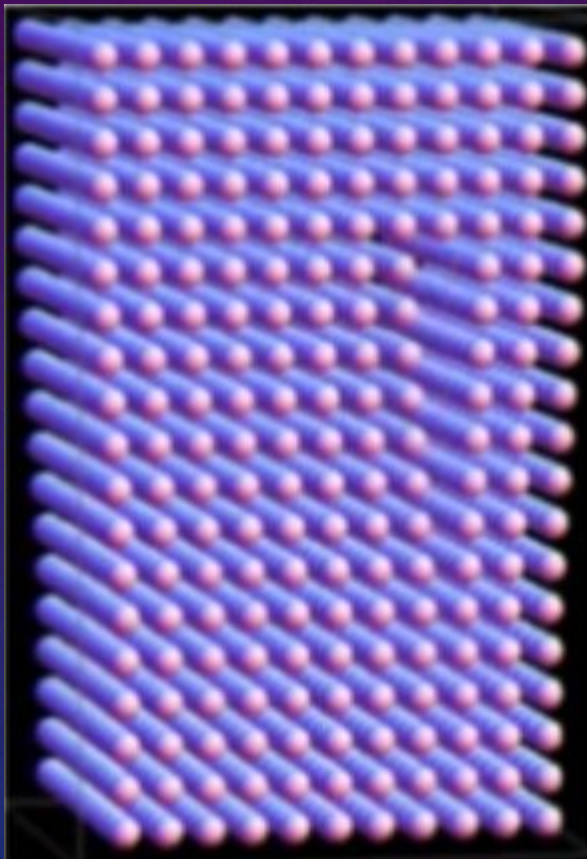


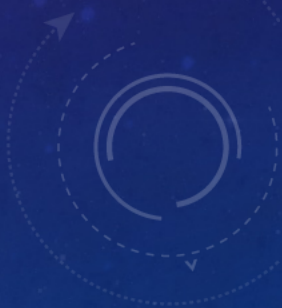
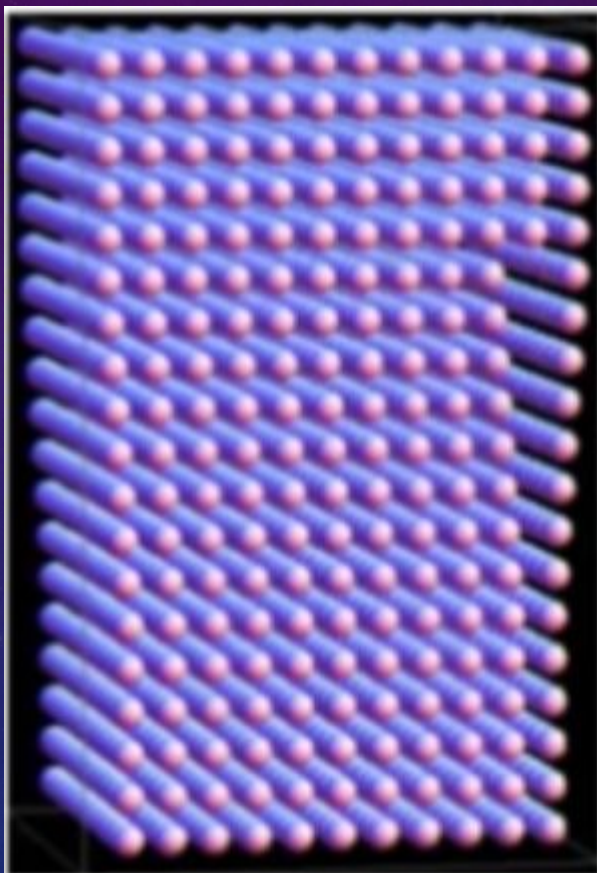


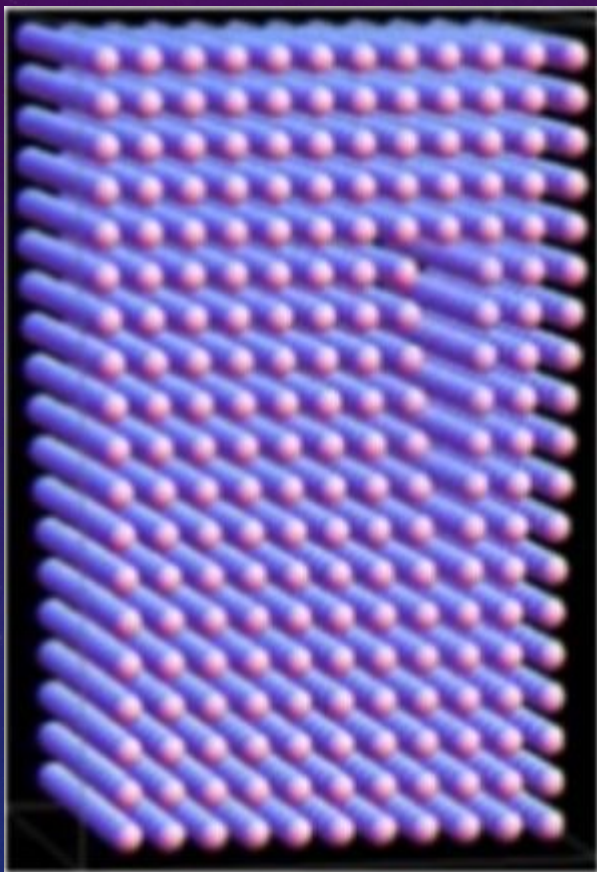


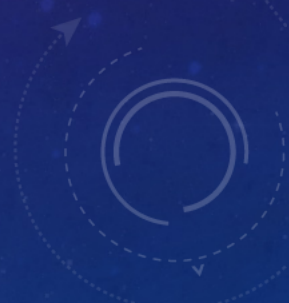
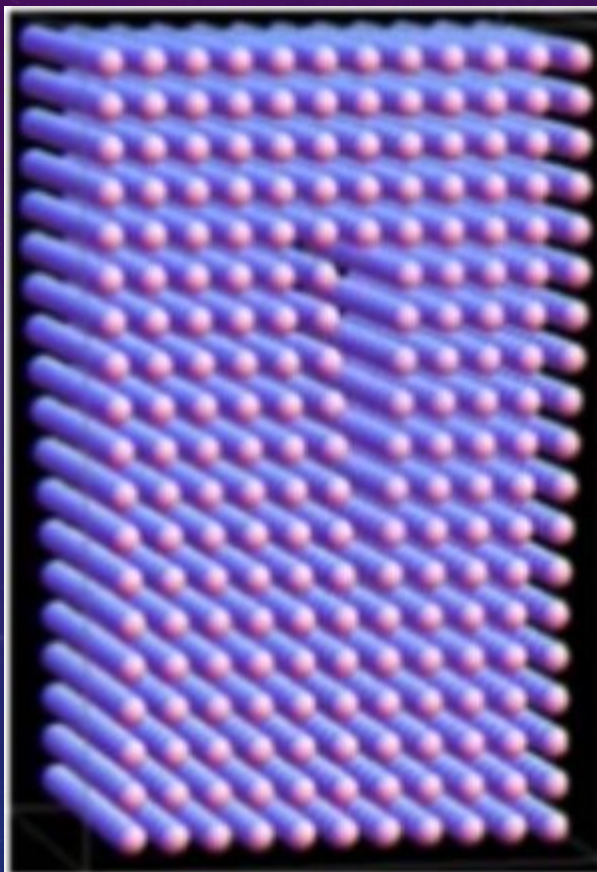


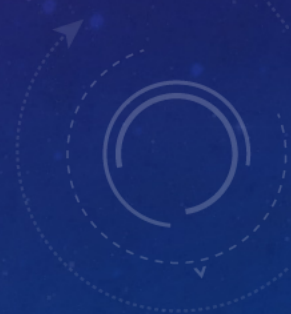
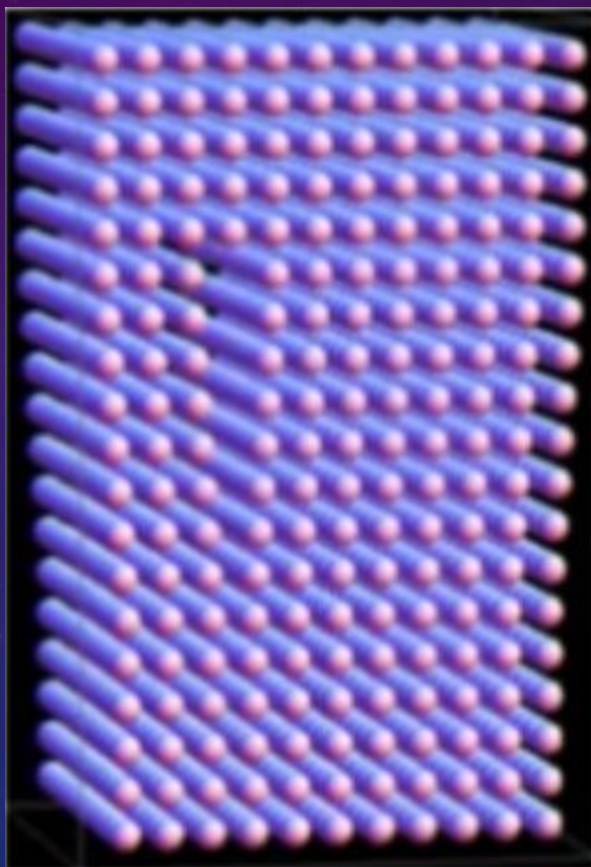


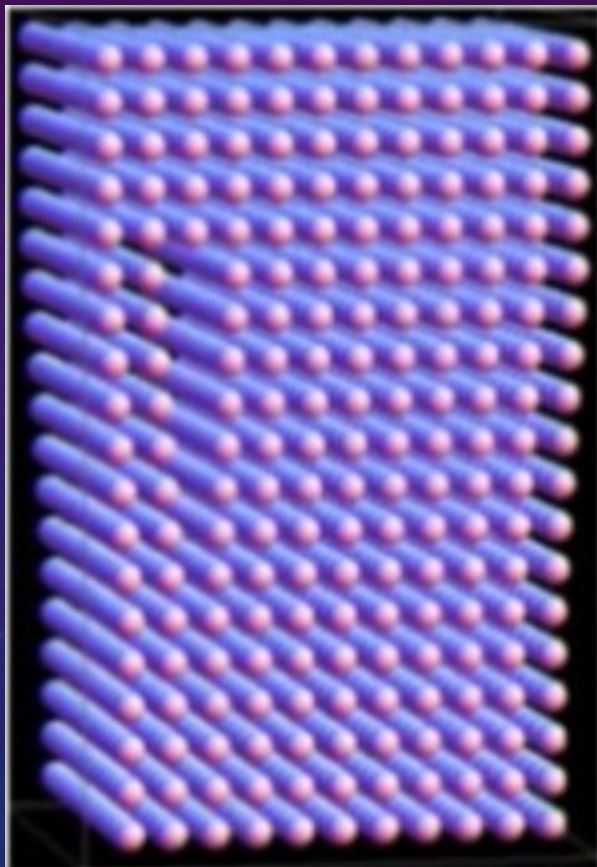


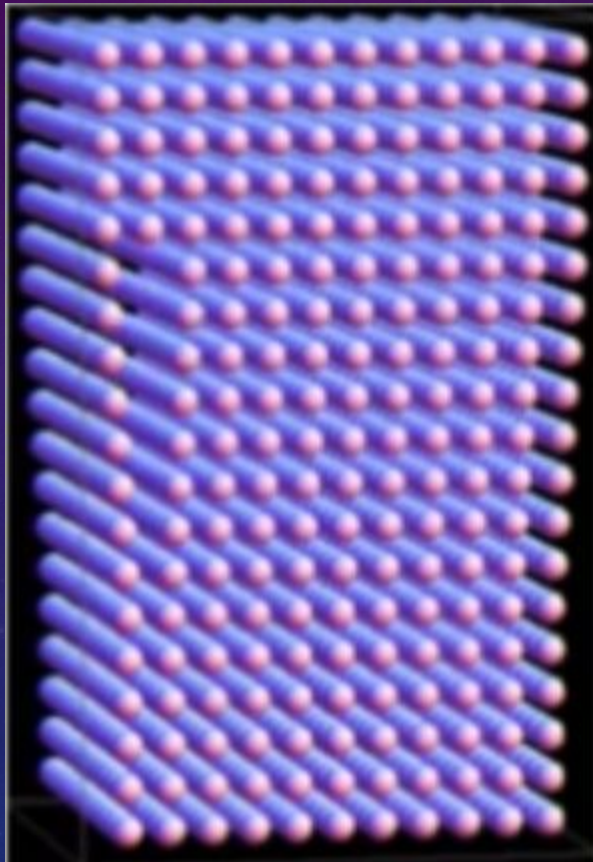






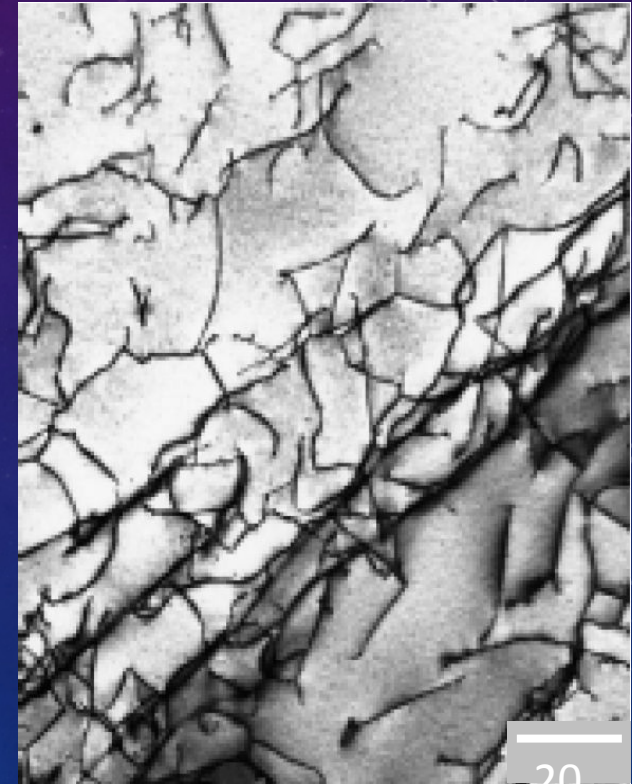
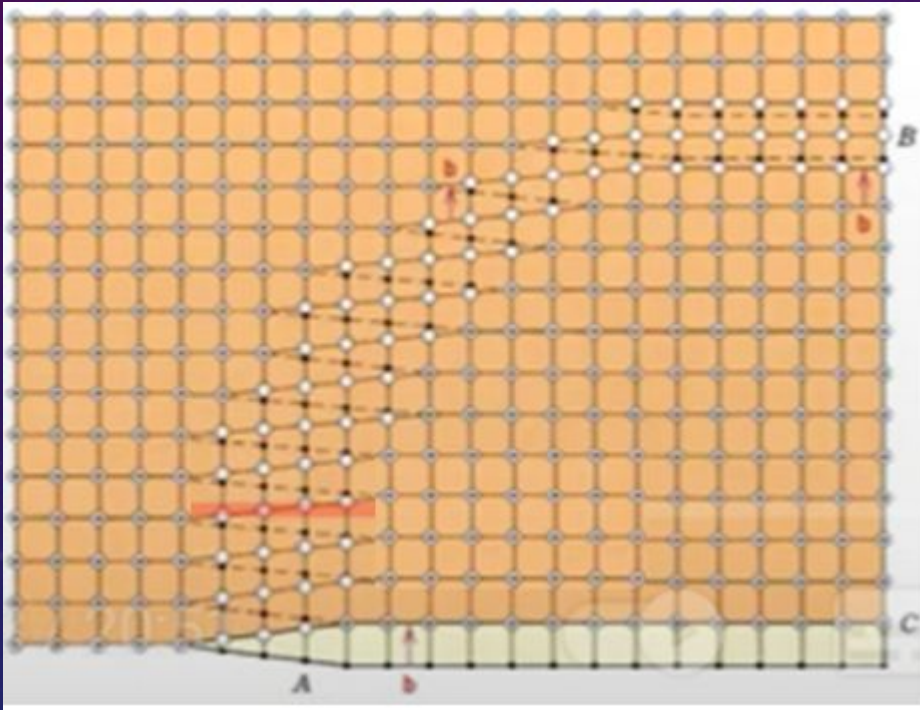








Discordância Mista



200
nm

DENSIDADE DE DISCORDÂNCIAS

Cristais metálicos cuidadosamente solidificados	10^3 mm^{-2}
Metais altamente deformados	$10^9 \text{ a } 10^{10} \text{ mm}^{-2}$
Metais deformados tratados termicamente	$10^5 \text{ a } 10^6 \text{ mm}^{-2}$

3- DEFEITOS PLANOS OU INTERFACIAIS

- Possuem duas dimensões e normalmente separam as regiões dos materiais que possuem diferentes estruturas cristalinas e/ou orientações cristalográficas.

- Essas imperfeições incluem:
 - superfícies externas
 - contornos de grão
 - contornos de macla
 - falhas de empilhamento
 - contornos de fases



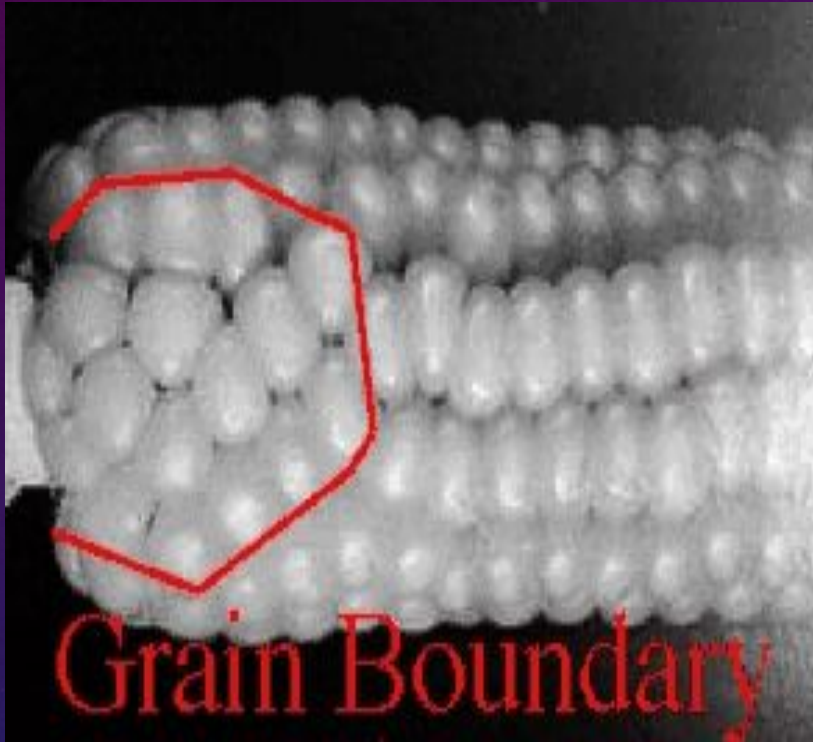
DEFEITOS NA SUPERFÍCIE EXTERNA

- 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

Monocrystal: Material com apenas uma orientação cristalina, ou seja, que contém apenas um grão

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

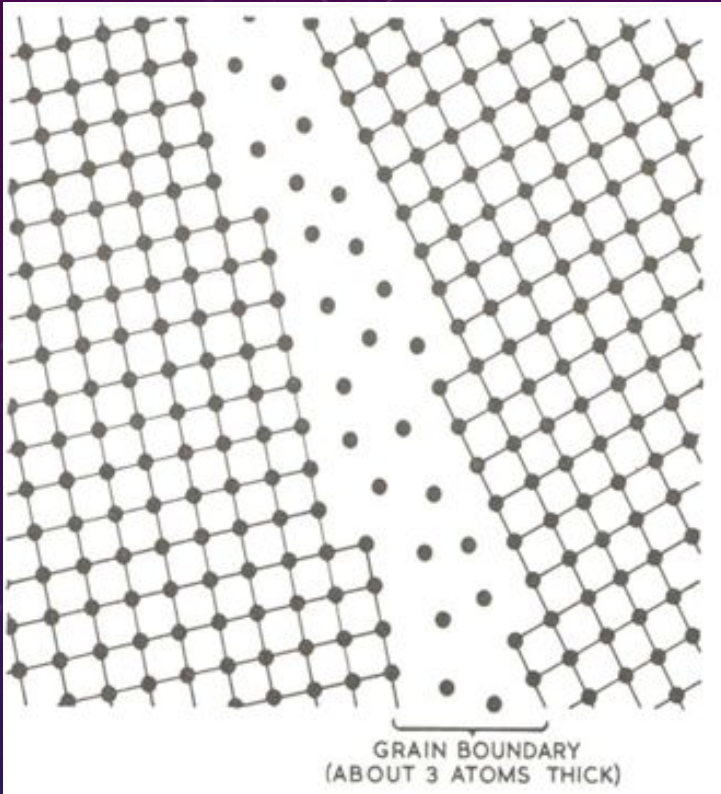


Contorno que separa
dois pequenos grãos
ou cristais que
possuem diferentes
orientações
cristalográficas em
materiais
policristalinos .

um cristal = um grão

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



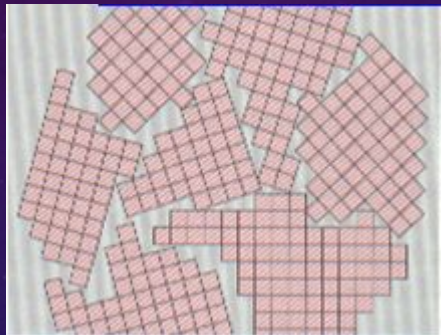
Formação de pequenos núcleos de cristalização (cristalitos)



Crescimento dos cristalitos



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



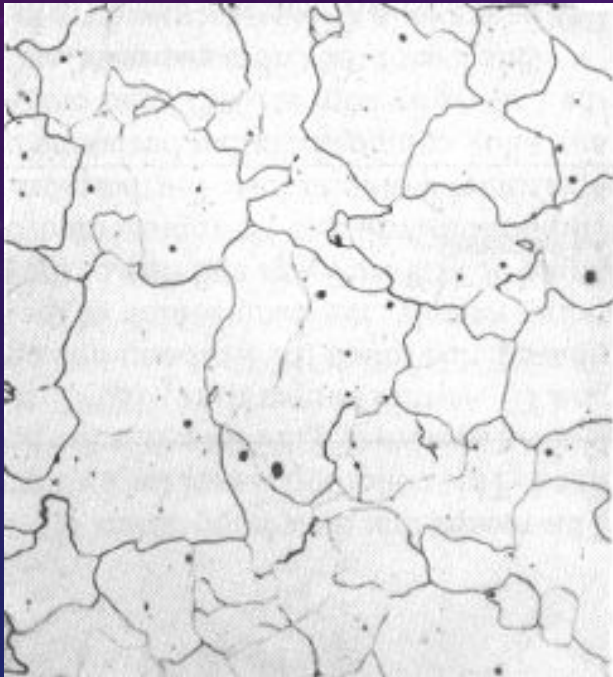
Vista, num microscópio, da estrutura de Grãos (*as linhas escuras são os contornos dos Grãos*)



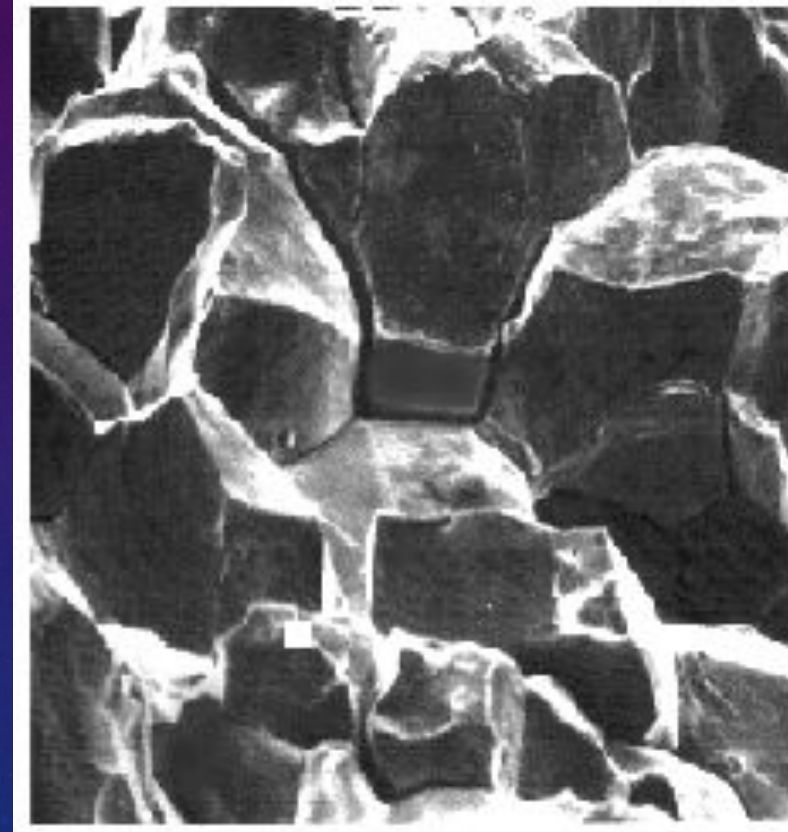
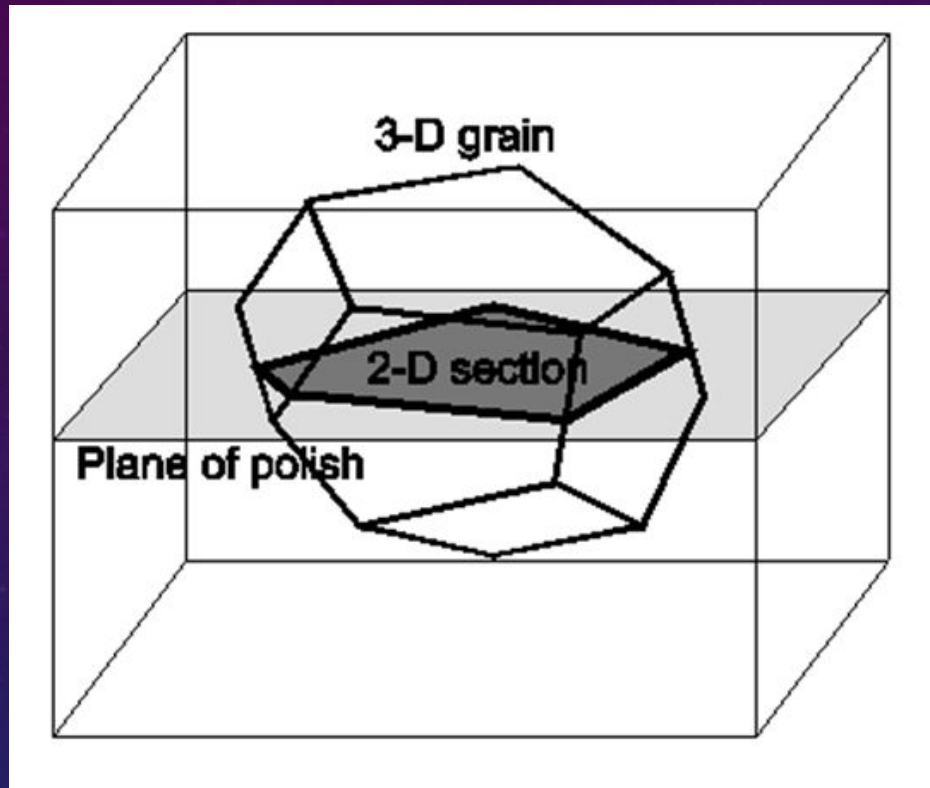
CONTORNOS DE GRÃO

- 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;

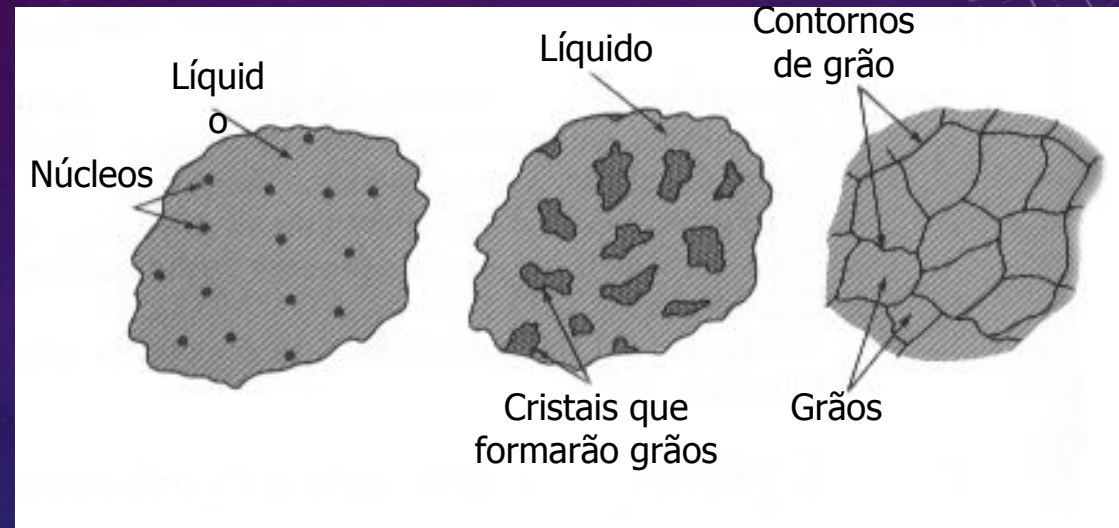
Como consequência, os contornos de grão são quimicamente mais reativos.



Além disso os átomos de impureza com frequência se segregam preferencialmente ao longo desses contornos;



PROCESSO DE NUCLEAÇÃO E CRESCIMENTO

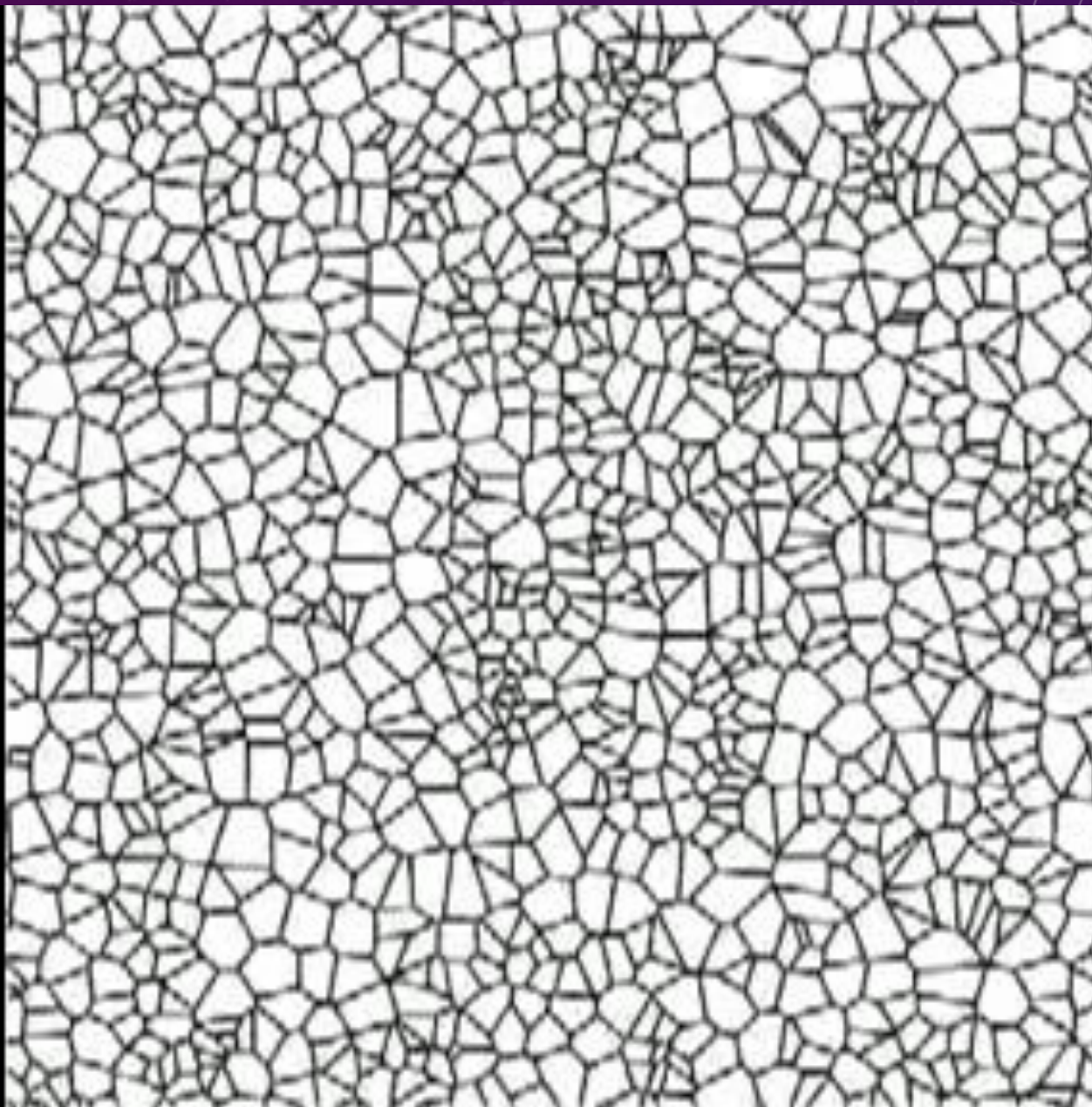


O contorno de grão é uma região de 2 a $10\text{\AA}$, desordenada, sem uma estrutura cristalina definida, sendo portanto uma região de maior energia que a do interior do grão.

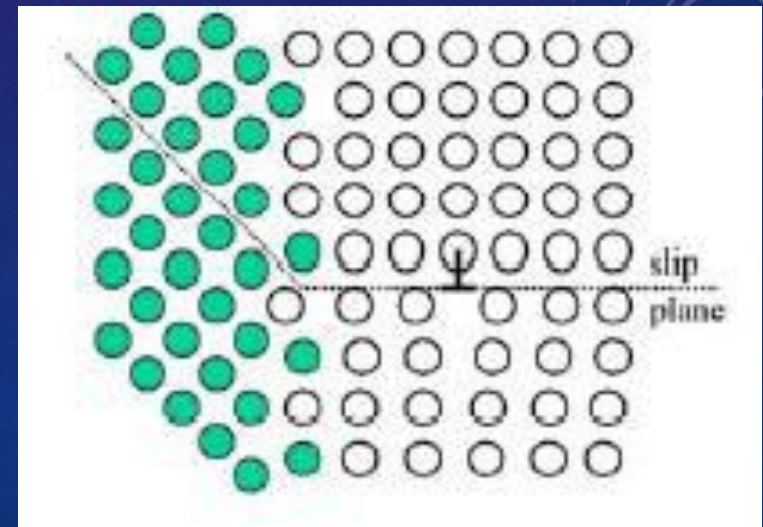
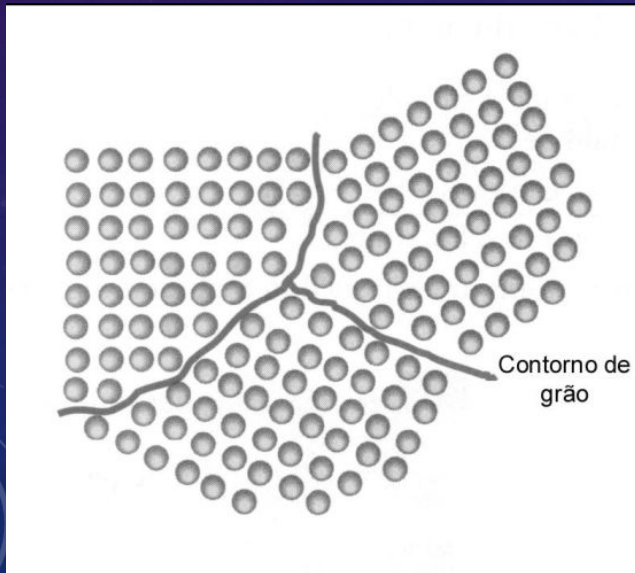
CONTORNOS DE GRÃO

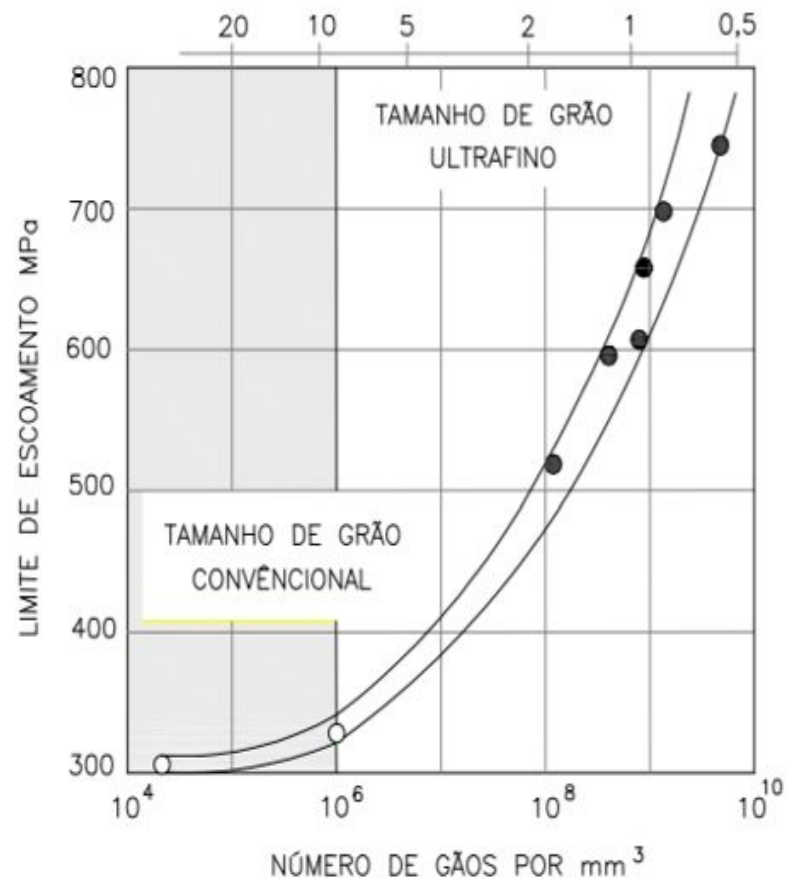
- A energia interfacial total é menor em materiais com grãos grandes ou grosseiros do que em materiais com grãos mais finos, uma vez que existe menos área de contorno nos primeiros;

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;





$$LE = 15,4 \left(3,5 + 2,1Mn + 5,4Si + 23N + \frac{1,13}{\sqrt{D}} \right) \quad (LE \text{ em MPa})$$

Essa equação (de Pickering) é válida para aços C-Mn-Si de microestrutura ferrítico-perlítica e limite de escoamento em torno de 300 MPa.

Escrevendo essa equação para dois aços de mesma composição mas com tamanhos de grãos iguais a D_1 e D_2 e limites de escoamento LE_1 e LE_2 respectivamente, e subtraindo membro a membro, obtém-se:

$$\Delta LE = 17,4 \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right)$$

Para um refinamento de grão de 100 μm para 10 μm o aumento correspondente para o limite de escoamento, pela equação seria:

$$\Delta LE_1 = 17,4 \left(\frac{1}{\sqrt{0,01}} - \frac{1}{\sqrt{0,1}} \right) = 119 \text{ MPa}$$

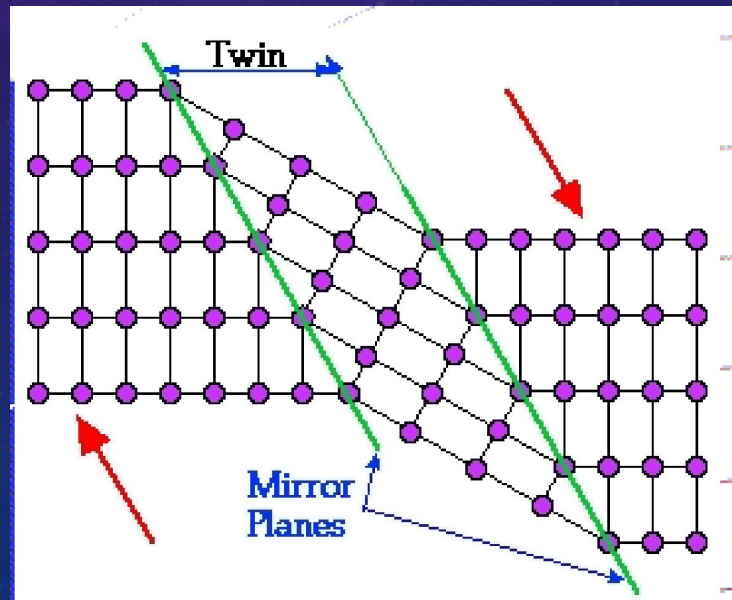
Considerando agora um refinamento de 10 μm para 1 μm , tem-se:

$$\Delta LE_2 = 17,4 \left(\frac{1}{\sqrt{0,001}} - \frac{1}{\sqrt{0,01}} \right) = 376 \text{ MPa}$$

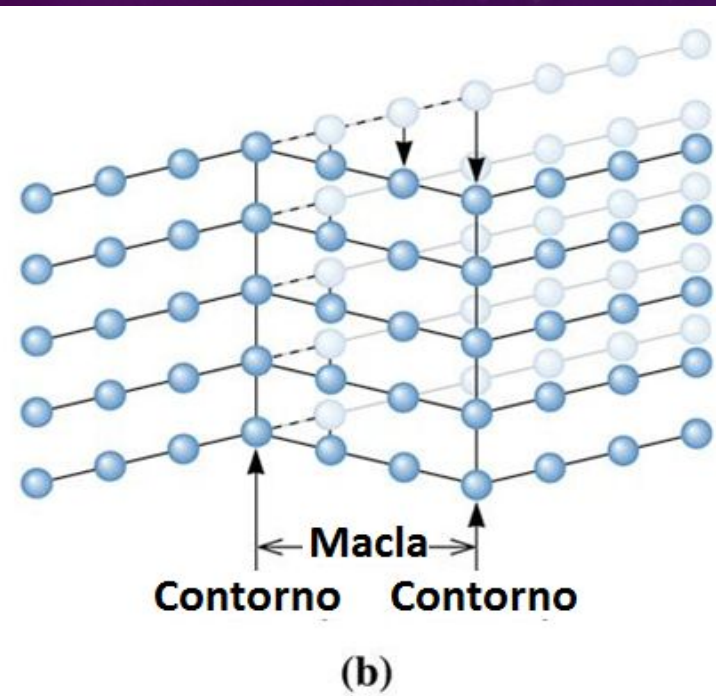
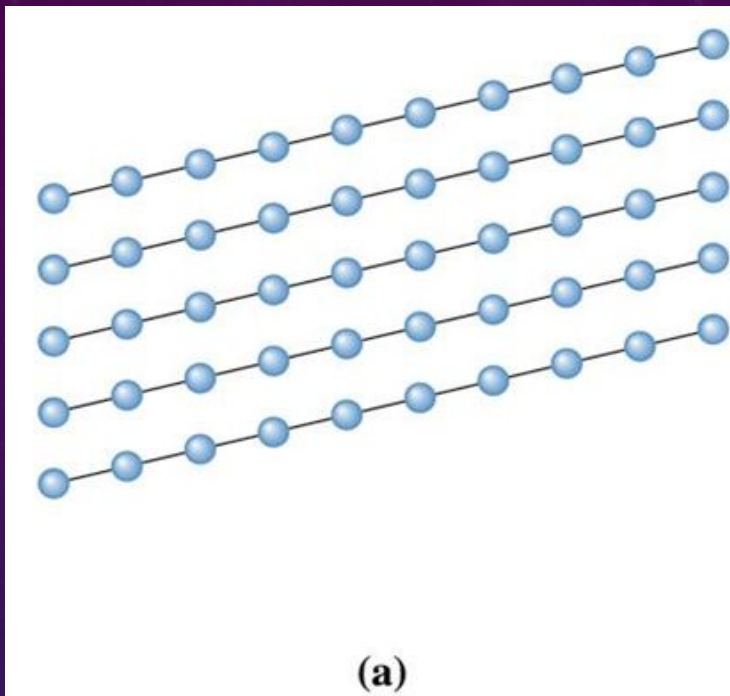
- Apesar do arranjo desordenado dos átomos e da falta de uma ligação regular ao longo dos contornos de grãos um material policristalino ainda é muito forte.

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



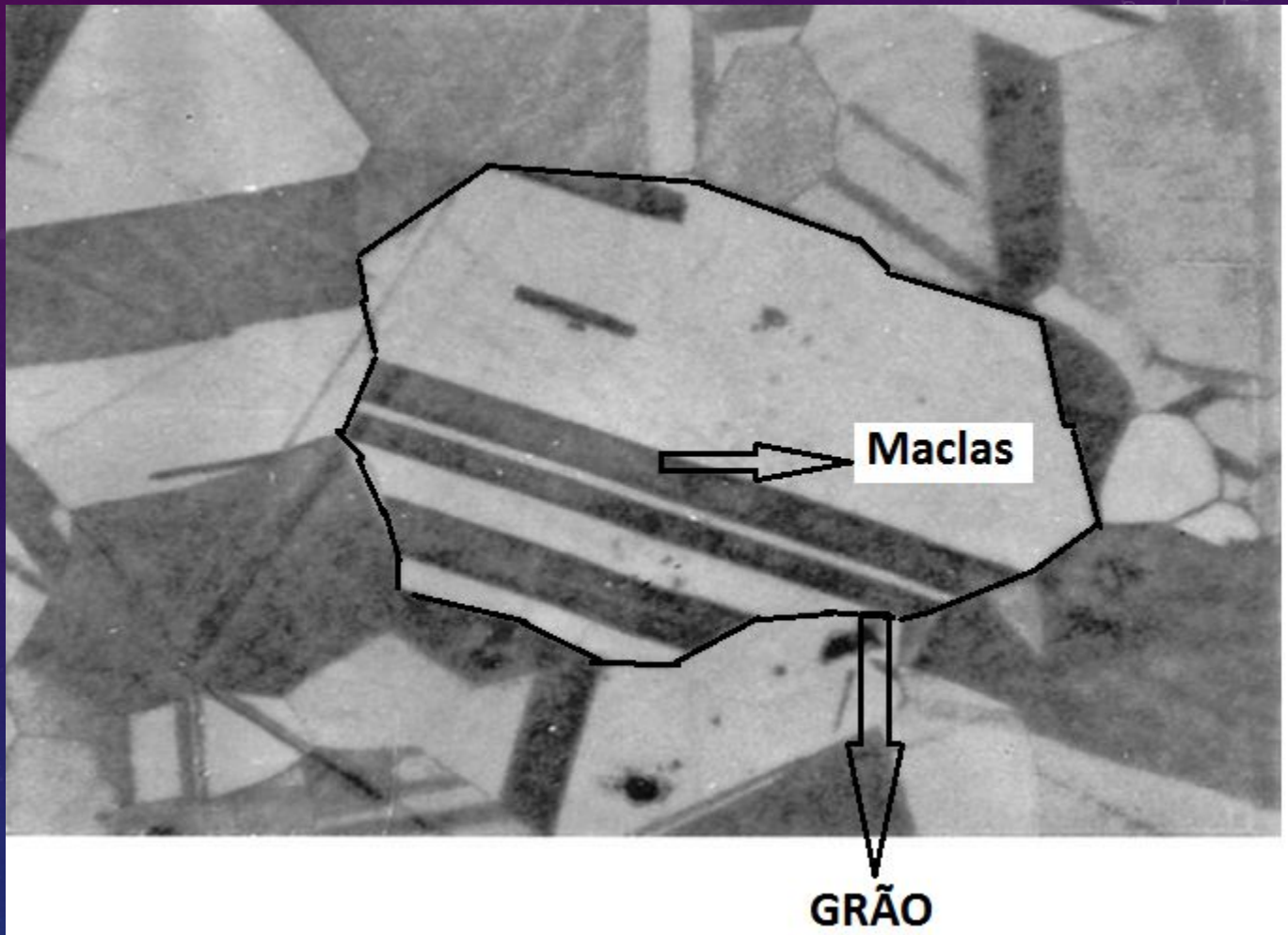
Resultam de deslocamentos atômicos que são produzidos a partir de forças mecânicas de cisalhamento aplicadas (maclas de deformação) e também durante tratamentos térmicos de recozimento realizados após deformações (maclas de recozimento)



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.

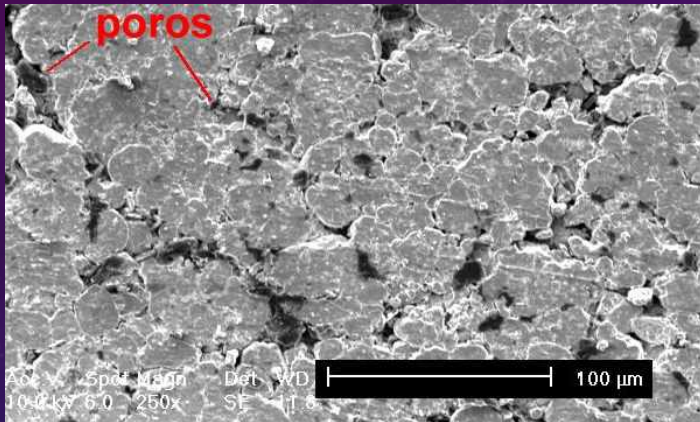


DEFEITOS VOLUMÉTRICOS OU DE MASSA

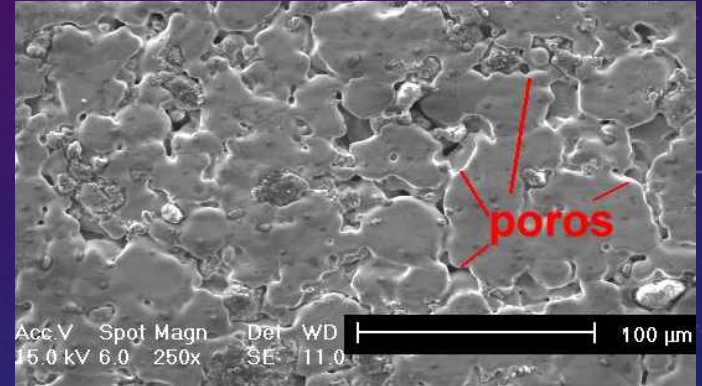
- **Inclusões** Impurezas estranhas
- **Precipitados** São aglomerados de partículas cuja composição difere da matriz

- **Fases** Forma-se devido à presença de impurezas ou elementos de liga (ocorre quando o limite de solubilidade é ultrapassado)
- **Porosidade** Origina-se devido a presença ou formação de gases

Porosidade



COMPACTADO DE PÓ DE FERRO, COMPACTAÇÃO UNIAxIAL EM MATRIZ DE DUPLO EFEITO, A 550 MPa



COMPACTADO DE PÓ DE FERRO APÓS SINTERIZAÇÃO A 1150°C, POR 120min EM ATMOSFERA DE HIDROGÊNIO

AINDA OUTROS DEFEITOS E CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS

EM TERMOS DE METALURGIA FÍSICA

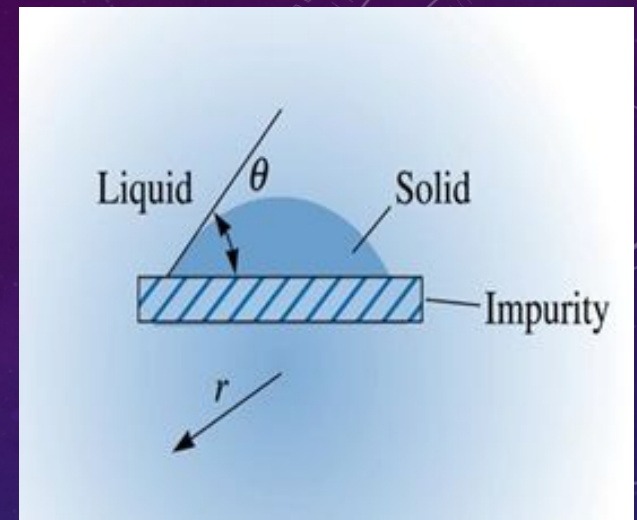
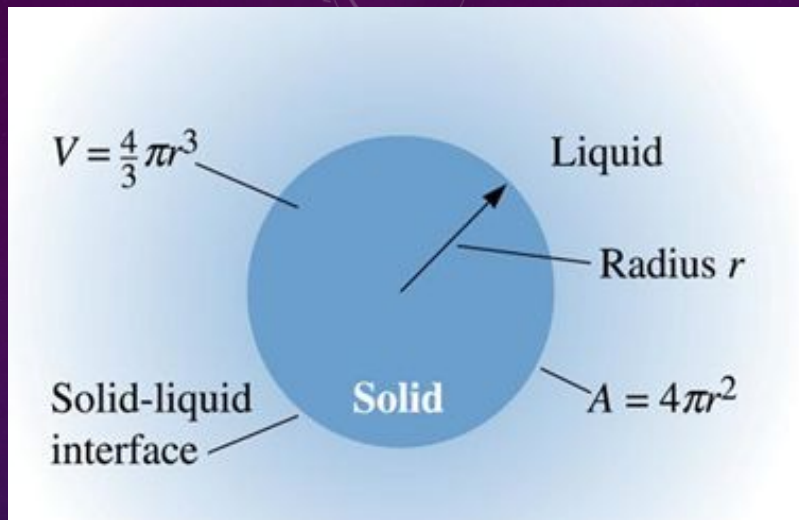
- **A fusão ocorre quando a energia de vibração dos átomos por conta do aumento da temperatura supera a energia envolvida na ligação química entre os átomos.**
- **No estado líquido não há ordem a longa distância (não há sistema cristalino) e as ligações entre os átomos é fraca do tipo Van der Waals**

NUCLEAÇÃO

Nucleação – O processo físico em que uma nova fase é produzida no material.

Nucleação homogênea- Formação de sólidos de tamanho crítico a partir de um líquido pela junção de um grande número de átomos que se resfriaram sem estar na interface externa.

Nucleação heterogênea- Formação de um sólido de tamanho crítico a partir do líquido na superfície de uma impureza.

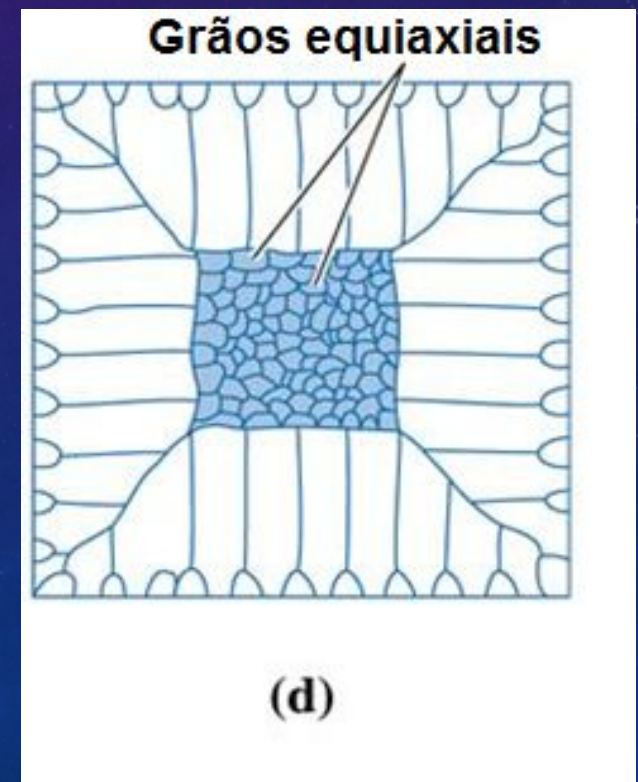
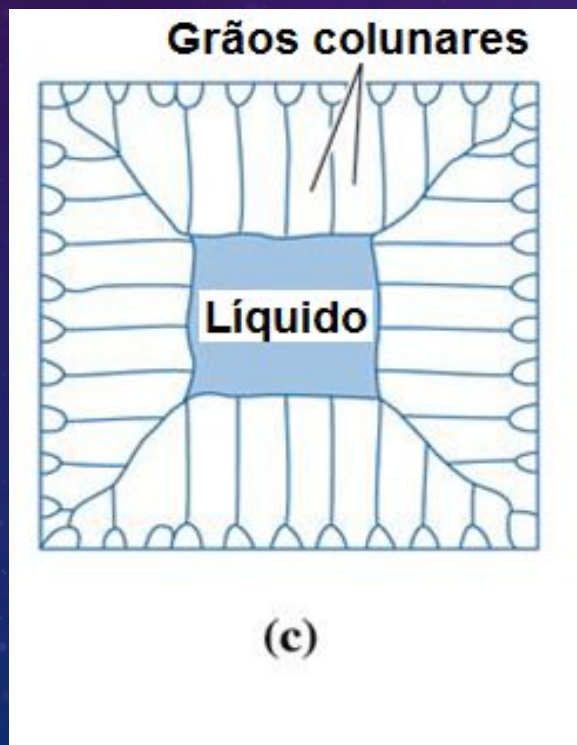
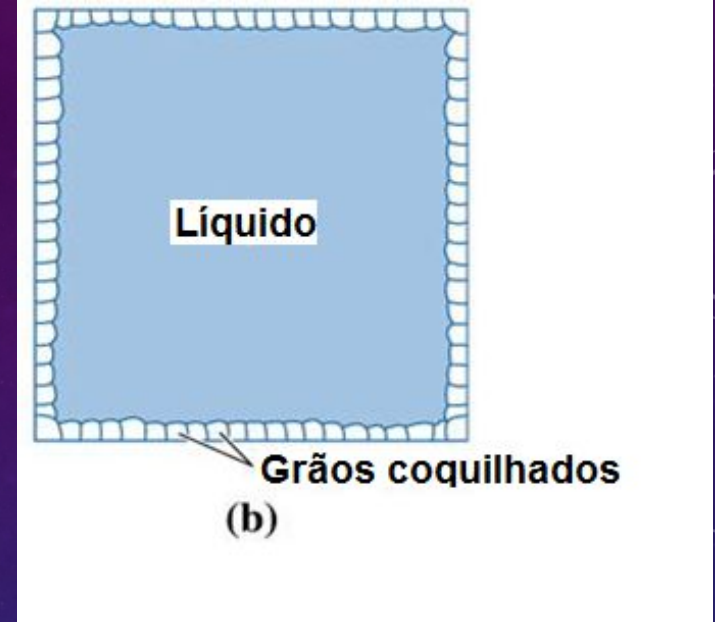
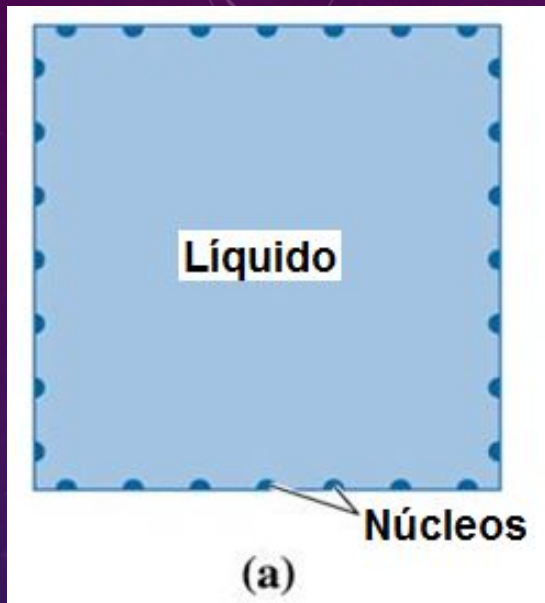


Algumas vezes são introduzidas intencionalmente, no líquido, partículas de impurezas. Tais partículas são chamadas de inoculantes ou refinadoras de grão.

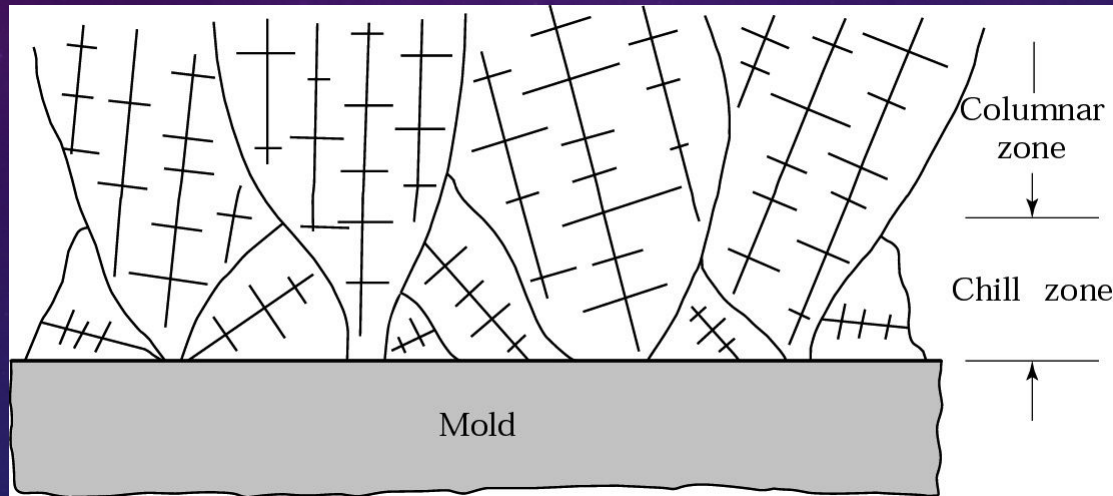
Essas partículas produzem um grande número de núcleos para formação dos grãos. Grande número de núcleos, menos espaço para crescer, menor tamanho de grãos.

Estrutura do material fundido

- **Zona coquilhada-** Uma região pequena, de grãos orientados ao acaso que forma na superfície de peças fundidas como um resultado de nucleação heterogênea.
- **Zona colunar-** Uma região de grãos alongados tendo uma orientação preferencial.
- **Zona equiaxial-** Uma região de grãos orientados randomicamente no centro de fundidos.



DESENVOLVIMENTO DAS TEXTURAS



Development of a preferred texture at a cool mold wall. Note that only favorably oriented grains grow away from the surface of the mold.

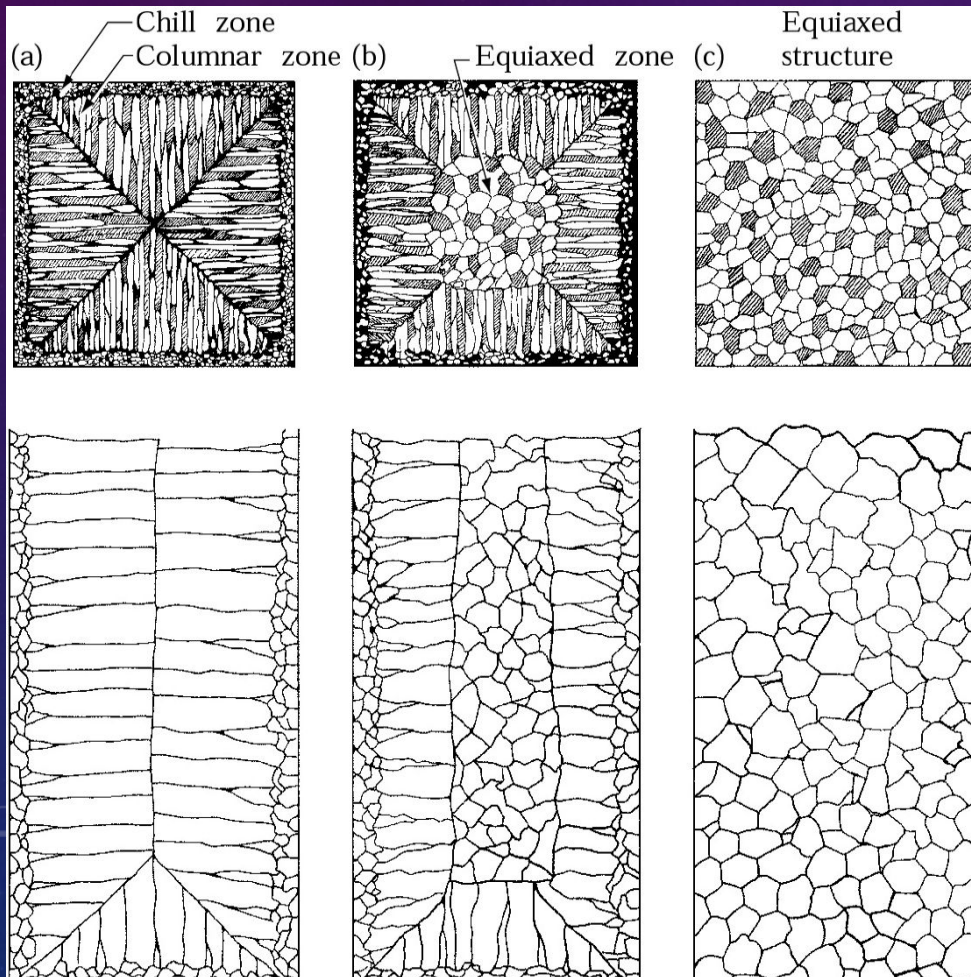
ESTRUTURAS DE GRÃO

- Grãos colunares:
 - Longos, finos, grosseiros.
 - Crescem a partir dos grãos equiaxiais formados na parede do molde.
 - Solidificação relativamente lenta em gradiente de temperatura
 - Perpendiculares à parede fria do molde

ESTRUTURAS DE GRÃO

- Grãos equiaxiais:
 - Crescimento de cristais aproximadamente igual em todas as direções.
 - Se formam devido a alta velocidade de solidificação na parede do molde.
 - Usualmente adjacentes a parede fria do molde, (zona Chill, ou coquilhada) mas podem aparecer no centro do lingote também dependendo do tamanho do molde e da velocidade de resfriamento (nesse caso se for lenta).

ESTRUTURAS DE METAIS FUNDIDOS



(a) Pure metals;

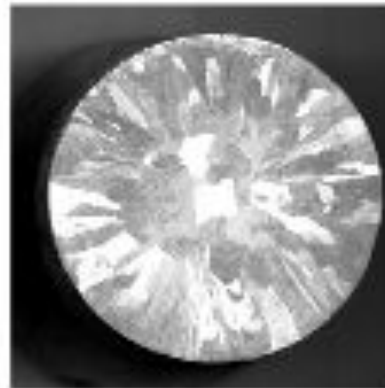
(b) solid-solution alloys;
and

(c) structure obtained by
using nucleating agents.

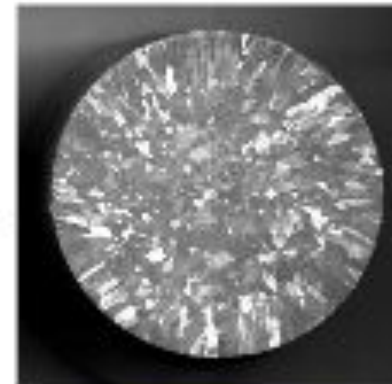
EFEITO DA PRESENÇA DE NUCLEANTES (REFINADORES DE GRÃOS) DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO.

VARIAÇÕES NA MACROESTRUTURA DE UMA LIGA AlMg EM FUNÇÃO E DO USO DE REFINADOR DE GRÃO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE VAZAMENTO

$T_v = 815^{\circ}\text{C}$

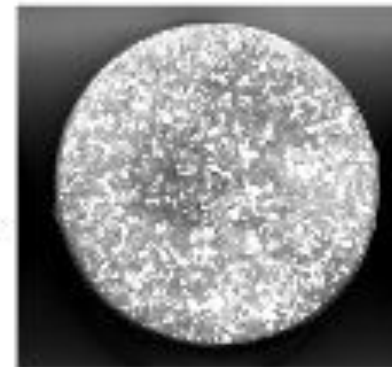


S/ REFINO

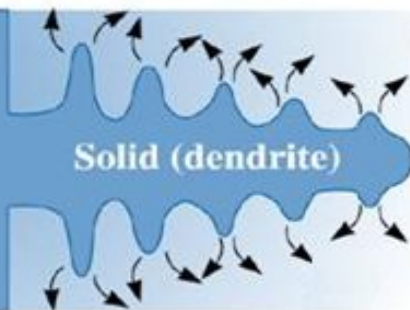


C/ REFINO

$T_v = 750^{\circ}\text{C}$

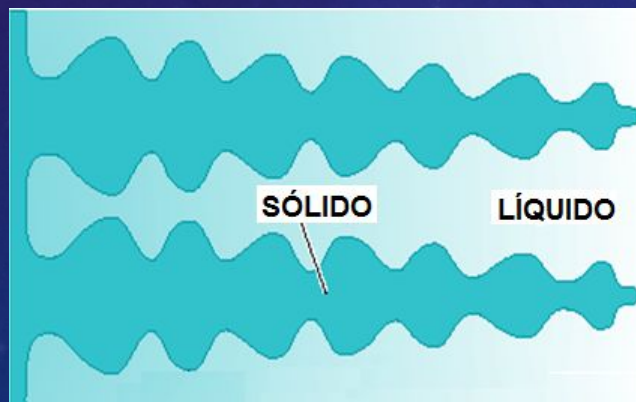
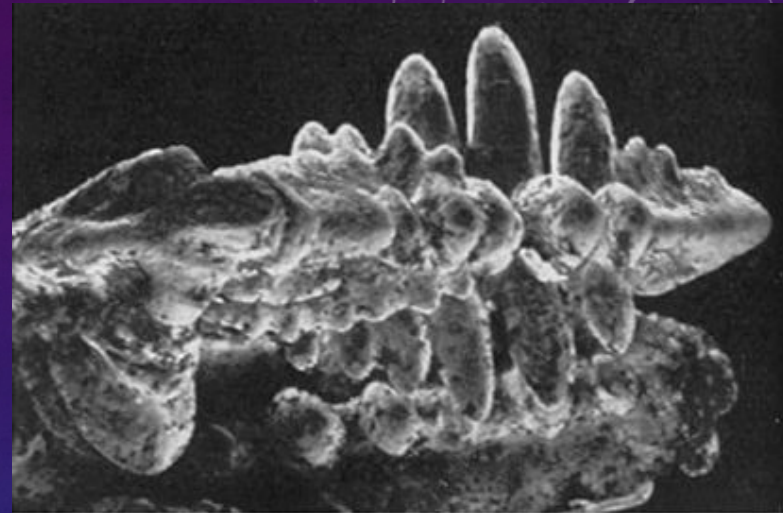


→ Direção de crescimento



Líquido

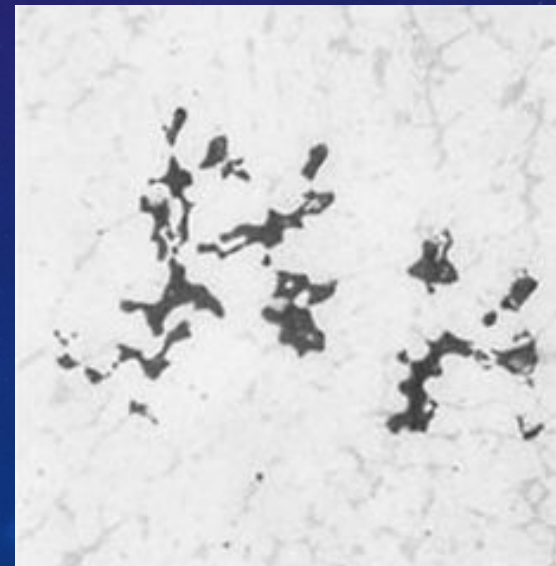
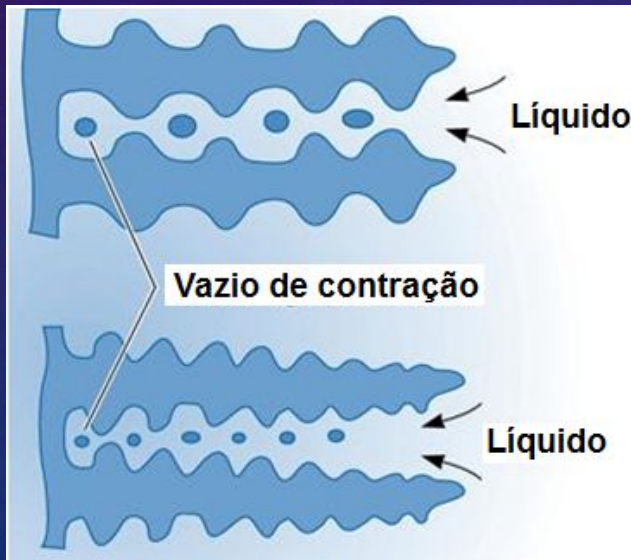
Solid (dendrite)



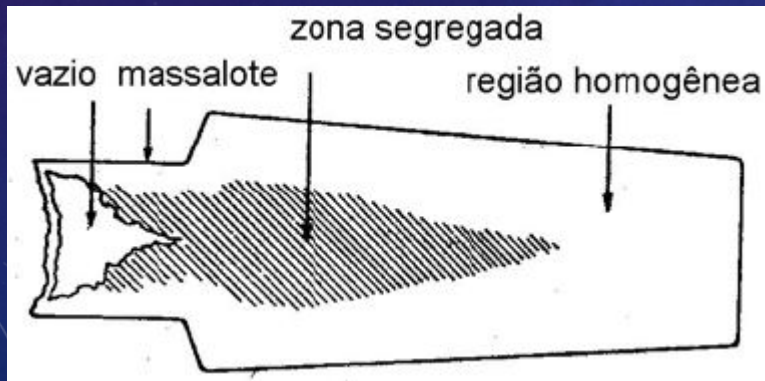
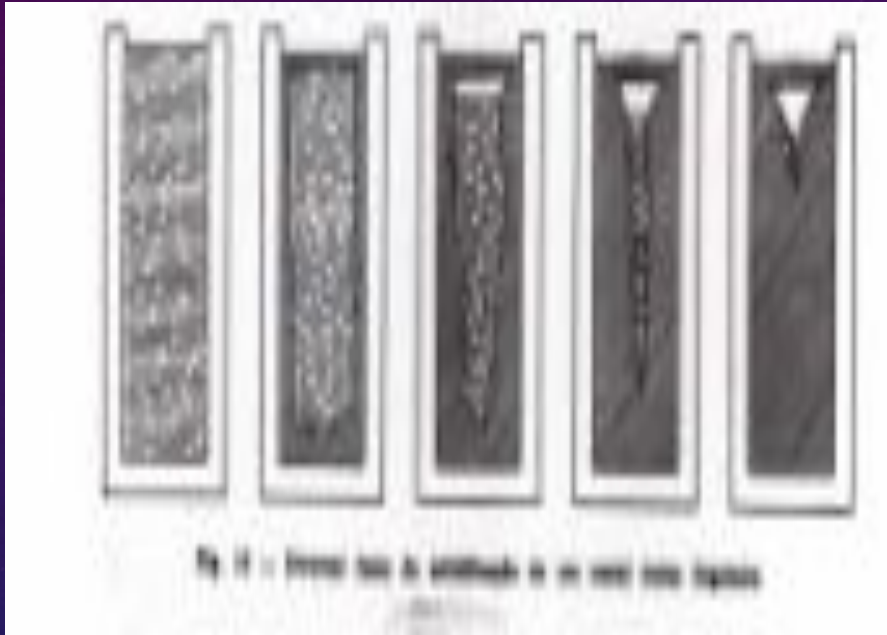
SÓLIDO

LÍQUIDO





FORMAÇÃO DO VAZIO APÓS A SOLIDIFICAÇÃO: EM GERAL OS SÓLIDOS APRESENTAM MENOR VOLUME QUE OS LÍQUIDOS, OCORRENDO UMA CONTRAÇÃO DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO



LOCALIZAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SEGREGAÇÃO

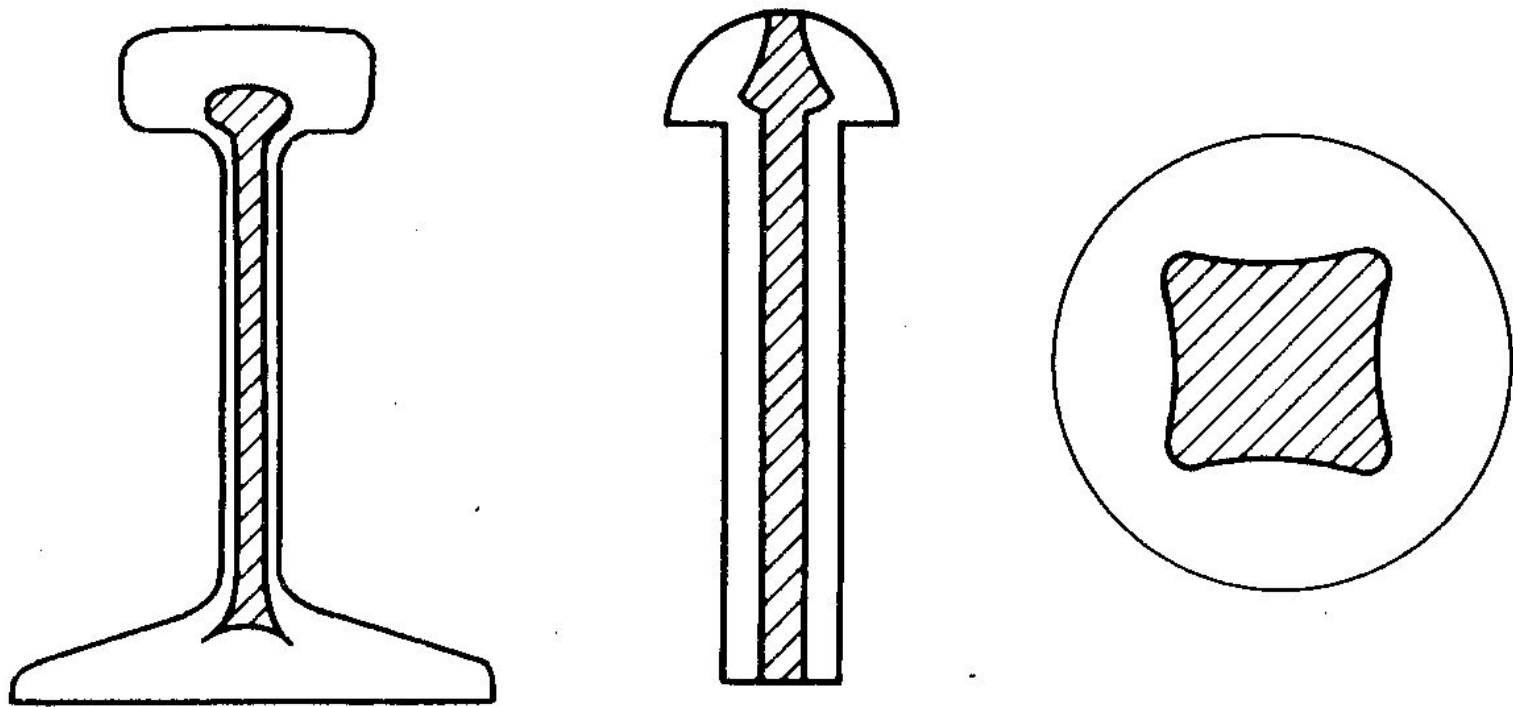
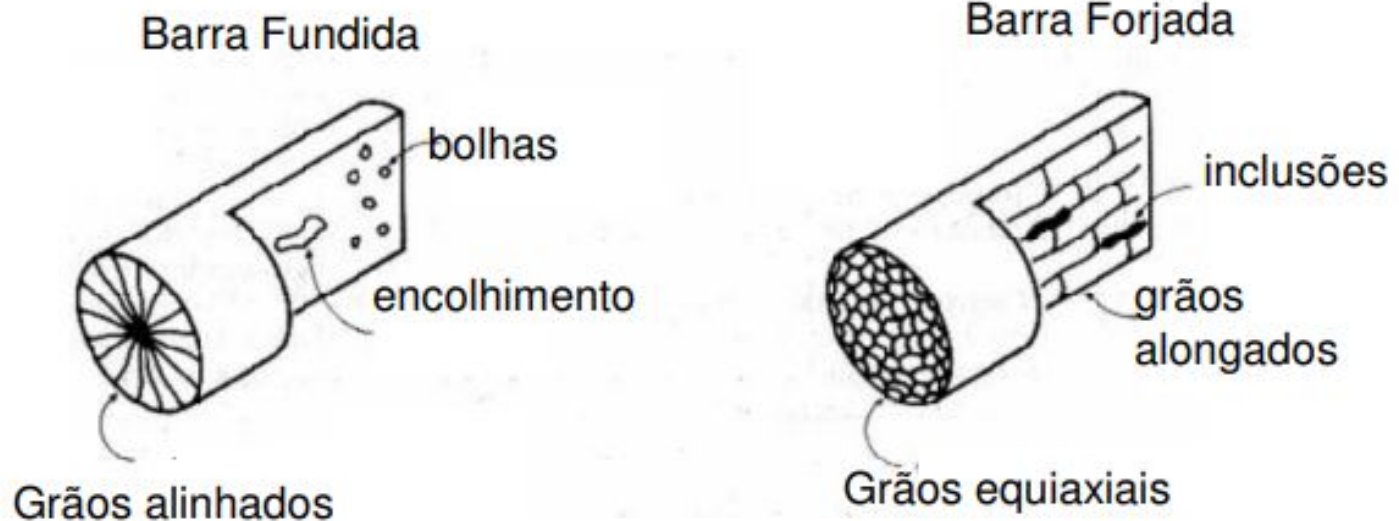


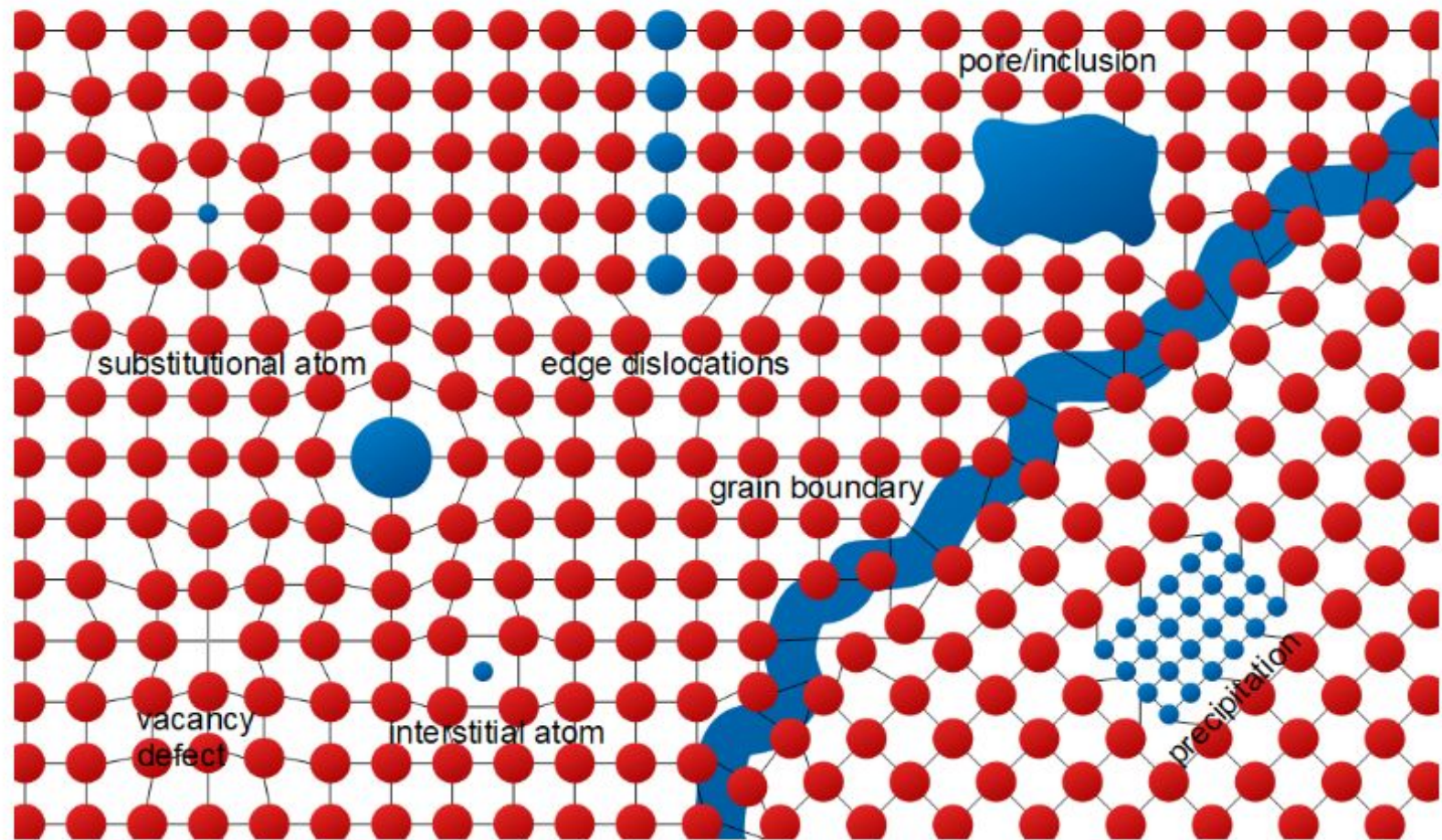
Figura 5 *Segregação em peças laminadas e forjadas.*

Alguns Detalhes na Observação da Estrutura Segundo Diferentes Cortes



Observe esquematicamente a diferença na estrutura de grãos segundo corte longitudinal e transversal de uma barra fundida ou forjada.

MAS... ...CRISTAIS NÃO SÃO PERFEITOS !



Defeitos cristalinos típicos em ligas metálicas

RELAÇÃO ENTRE AS DENDRITAS E OS GRÃOS NA SOLIDIFICAÇÃO

