

**INSTITUTO FEDERAL**

Sul-rio-grandense

Câmpus Passo Fundo

# **TRANSFORMAÇÕES DE FASES DOS METAIS**

**Prof. Dr. Alexandre Pitol Boeira**

**ENGENHARIA MECÂNICA**

- DISCIPLINA: Transformação de Fases dos Metais
- VIGÊNCIA: a partir de 2017/1
- PERÍODO LETIVO: eletiva
- CARGA HORÁRIA TOTAL: 60h
- CÓDIGO: PF.EM.87
- EMENTA: Princípios termodinâmicos aplicados às transformações de fases.  
Transformações de fases líquidas e sólidas. Formação e desenvolvimento de fases em sistema ferro-carbono.

- 05/ABR AULA 01 INTRODUÇÃO
- 12/ABR AULA 02 TERMODINÂMICA DO EQUILÍBRIO DE FASES
- 19/ABR AULA 03 SISTEMAS MATERIAIS COM APENAS UM COMPONENTE
- 26/ABR AULA 04 DIAGRAMA DE FASES
- 30/ABR AULA 05 *sábado letivo*
- 03/MAI AULA 06 -
- 10/MAI AULA 07 DIFUSÃO ATÔMICA
- 17/MAI AULA 08 -
- 24/MAI AULA 09 NUCLEAÇÃO E CRESCIMENTO DE FASES
- 31/MAI AULA 10 SOLIDIFICAÇÃO
- 07/JUN AULA 11 -
- 14/JUN AULA 12 -
- 21/JUN AULA 13 RECUPERAÇÃO E RECRISTALIZAÇÃO
- 28/JUN AULA 14 ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO
- 05/JUL AULA 15 SISTEMA FERRO-CARBONO
- 09/JUL AULA 16 *sábado letivo*
- 12/JUL AULA 17 -
- 19/JUL AULA 18 TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA
- 26/JUL AULA 19 -
- 30/JUL AULA 20 – REAVALIAÇÃO ORAL

## BIBLIOGRAFIA BÁSICA

- SANTOS, Rezende Gomes dos. *Transformações de fases em materiais metálicos*. Campinas: Ed. Unicamp, 2006, ISBN 85-268-0714-5
- GARCIA, Amauri. *Solidificação: fundamentos e aplicações*. 2. ed. Campinas: Unicamp, 2007. ISBN : 9788526807822
- PADILHA, Ângelo Fernando e Fulvio Siciliano Junior. *Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura*. 3. ed. São Paulo: Editora ABM, 2005. ISBN 85-86778-80-X

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- CALLIESTER JR., William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 705 p.
- TAYLOR, James L., Dicionário Metalúrgico: inglês-português, português-inglês. 2. ed. São Paulo. Editora ABM, 2004
- LAKHTIN, Y., Engineering Physical Metallurgy. 2. ed. MIR Publishers, 19.
- CHALMERS, Bruce. Metalurgia Física. Madri: Ed. John Wiley and Sons, 1968.

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR (*continuação*)

- CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. São Paulo: Editora ABM, 2008 ISBN 85-86778-48-6
- CHIAVERINI, Vicente. Tratamento térmico das ligas metálicas. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 272 p. ISBN 85-86778-62-1

**Phase Transformations in Metals and Alloys**  
**D.A. Porter/K.E. Easterling**

# UNIDADE 01 INTRODUÇÃO

- 1.1. Conceitos Gerais
- 1.2. Estados de Equilíbrio Termodinâmico
- 1.3. Aplicação dos conceitos de equilíbrio termodinâmico nas transformações de fases dos materiais
- 1.4. Estruturas dos Materiais Metálicos
  - 1.4.1. *Estrutura cristalina*
  - 1.4.2. *Direções e planos cristalográficos*
  - 1.4.3. *Imperfeições na rede cristalina*

## 1.1. CONCEITOS GERAIS

- Os materiais metálicos no estado sólido apresentam como característica principal a sua microestrutura;
- A microestrutura é resultante dos arranjos dos átomos que compõem o material e pode ser observada, com o auxílio de microscópios, em amostras polidas e convenientemente atacadas quimicamente (metalografia).
- Os metais no estado líquido apresentam uma estrutura *amorfa*, caracterizada pela não ocorrência de ordenações de longo alcance dos átomos.
- Os metais no estado sólido apresentam uma estrutura *cristalina*, que é caracterizada pela ordenação de longo alcance dos átomos e seguindo modelos geométricos bem definidos denominados células unitárias.



- A primeira definição da microestrutura ocorre, portanto, durante a passagem do material do estado líquido para o estado sólido, quando há o processo de cristalização levando a ordenação dos átomos.
- Diferentes arranjos de átomos dão origem a diferentes componentes estruturais denominados fases.
- Fases são consideradas partes fisicamente homogêneas observadas na estrutura de um material.
- As formas mais simples de fases são aquelas que coincidem com os estados de agregação dos componentes dos materiais, ou seja, sólido, líquido e gasoso.
- São considerados componentes de um material os átomos ou moléculas que o compõem.

- Uma material composto de único componente apresenta apenas as fases coincidentes com este estado de agregação, caracterizando uma estrutura monofásica.
- Para um material metálico composto por dois ou mais componentes, constituindo uma liga, há a possibilidade de formação, no estado sólido, de diferentes arranjos estruturais que levam a coexistência de diferentes fases na constituição de sua microestrutura, caracterizando assim uma estrutura bifásica.
- A possibilidade de formação de diferentes fases durante a solidificação do líquido monofásico está associada ao equilíbrio termodinâmico da estrutura do material.

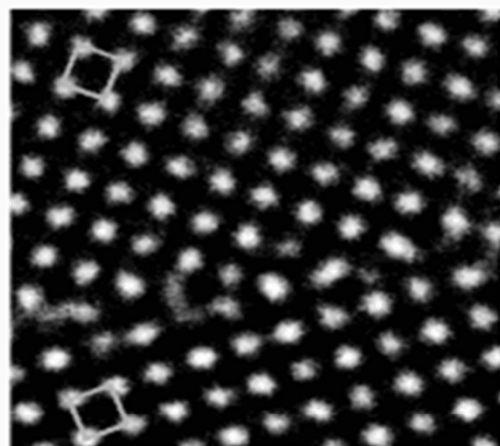
- Um conceito básico no estudo de materiais metálicos é que as suas propriedades características apresentam uma correlação direta com a microestrutura, sendo portanto extremamente importante o estudo de sua formação. Em geral, modificações introduzidas na microestrutura interferem diretamente nas características do material.
- Basicamente, a microestrutura pode ser alterada das seguintes formas:
  - Através de modificação da composição química da liga, seja pela alteração do teor dos componentes, seja pela adição de novos componentes.
  - Através da alteração do processo de fabricação.
  - Através da aplicação de tratamentos térmicos que, impondo alterações controladas na temperatura no material no estado sólido, provocando alterações das fases originais.

- Do ponto de vista termodinâmico, pode-se considerar que um material metálico está no seu estado mais quando sua microestrutura apresentar o equilíbrio termodinamicamente mais estável nas condições em que este material se encontra. Assim, é interessante analisar brevemente o conceito de equilíbrio termodinâmico.

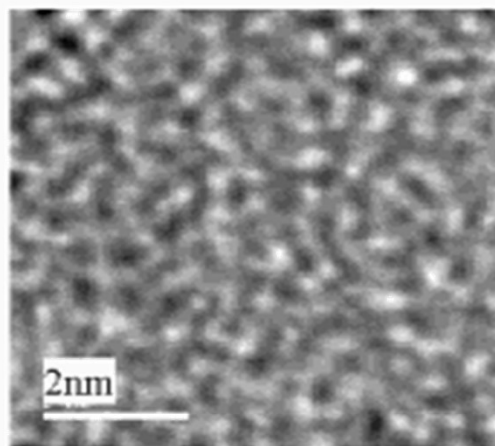
Cristal 1

Fronteira

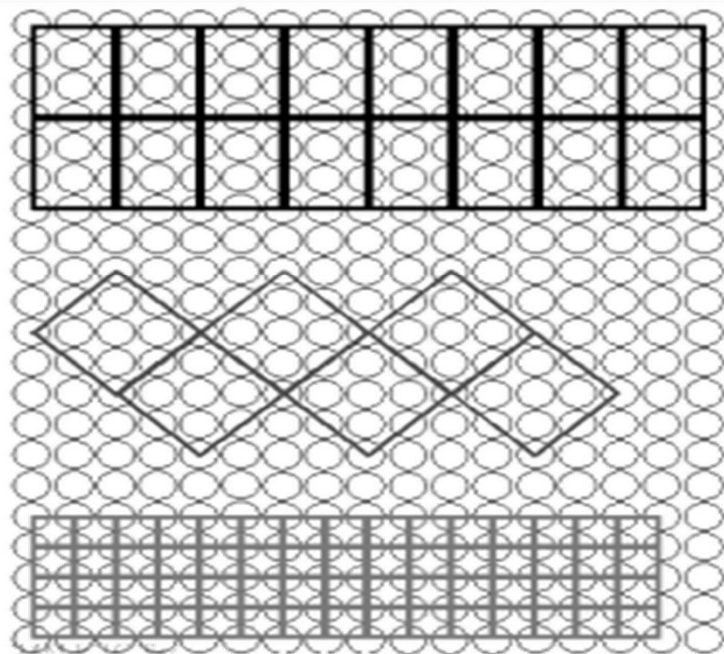
Cristal 2



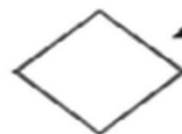
Fronteira entre dois cristais de  $\text{TiO}_2$ .  
Note a organização geométrica dos átomos.



Carbono amorfo.  
Note a desorganização na posição dos átomos.



←  
**Células Não-Unitárias**

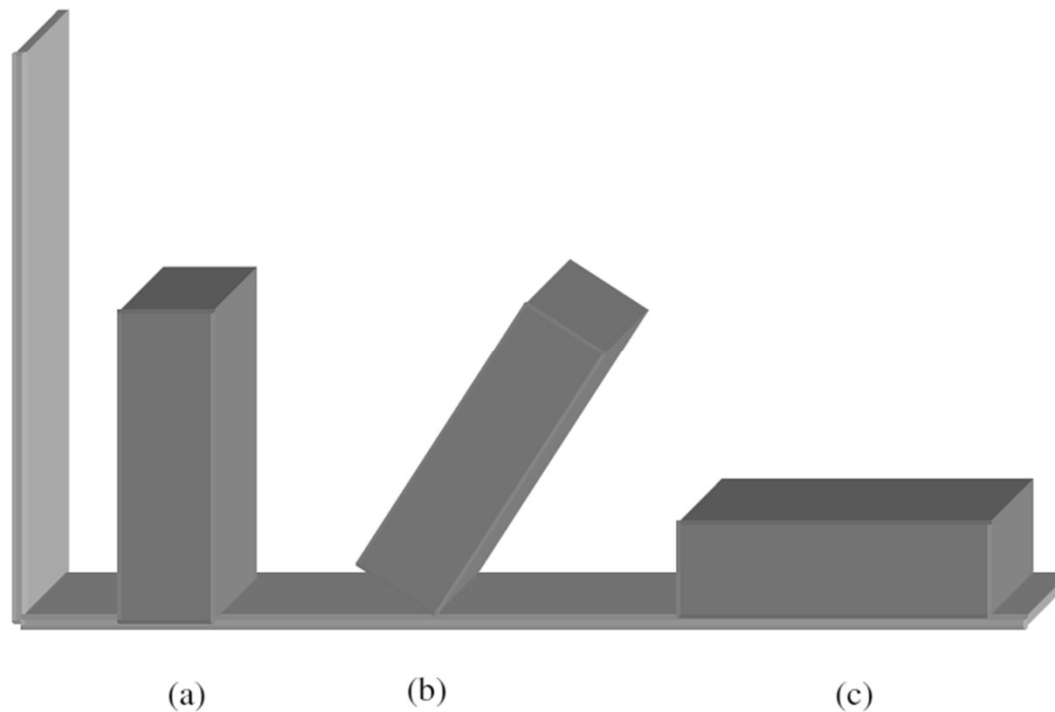


←  
**Célula Unitária**  
Menor "tijolo" que repetido  
reproduz a rede cristalina

## 1.2. ESTADOS DE EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO

- A estabilidade de uma microestrutura em uma condição termodinâmica específica (p.ex. para um determinado par de valores de pressão e temperatura) depende do estado de equilíbrio em que a estrutura se encontra em relação a essa condição.
- Desta forma, é conveniente fazer algumas considerações iniciais sobre os possíveis estados de equilíbrio termodinâmico de um sistema material.
- De um modo geral um sistema material pode apresentar-se em um dos seguintes estados de equilíbrio: (1) equilíbrio instável, (2) equilíbrio metaestável e (3) equilíbrio estável, sendo que do ponto de vista termodinâmico ele passa de um estado mais instável para um mais estável à medida que sua energia livre decresce.

- Cahn, em 1968, estabeleceu uma interessante analogia entre o equilíbrio de sistemas materiais e blocos sólidos, associando a energia livre do sistema ao centro de massa dos blocos, que auxilia a conceituação desses três estados de equilíbrio.
- Considerando um bloco sólido na forma de um paralelepípedo pode-se dizer que:

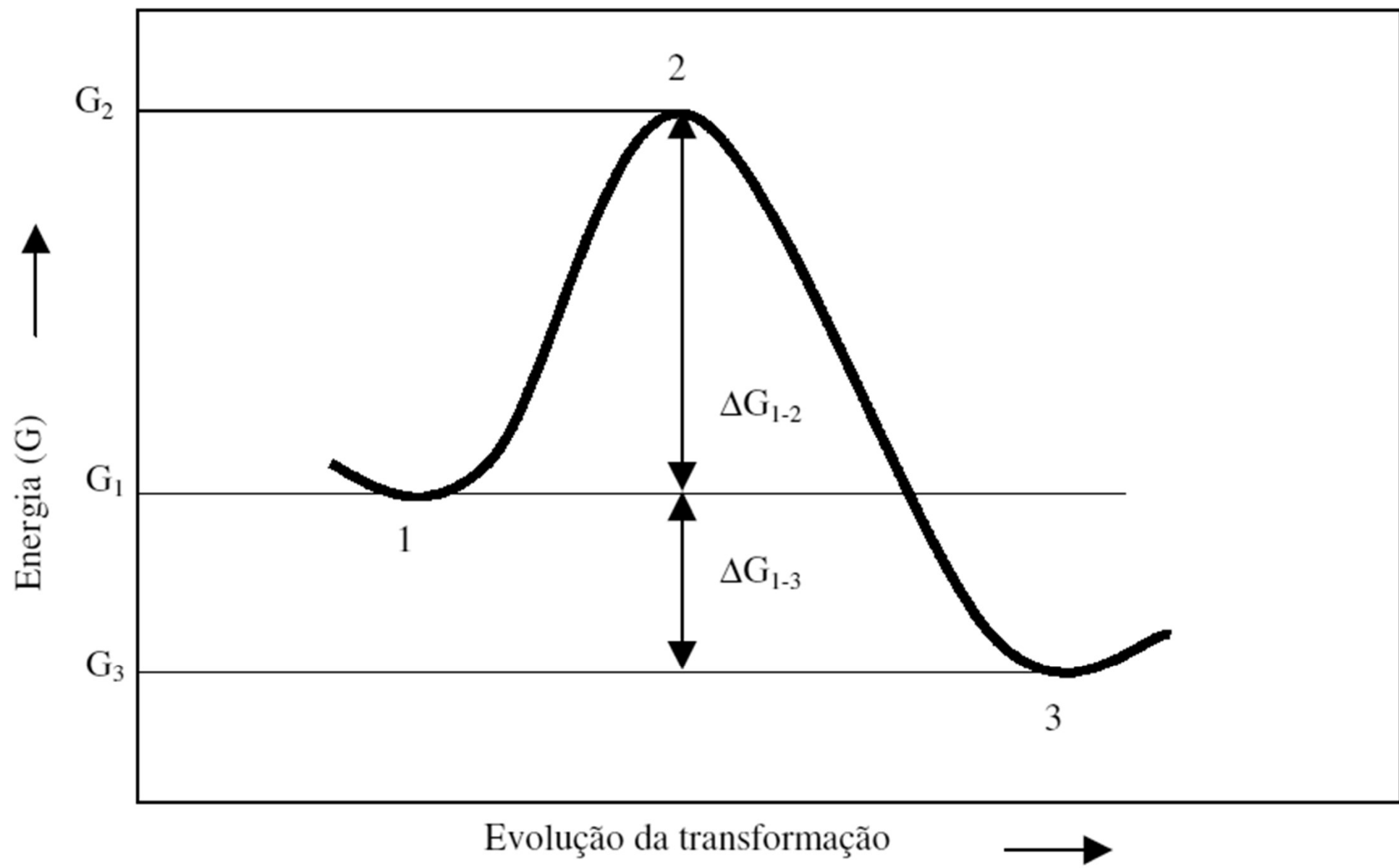


- (C) Equilíbrio estável é aquele para o qual nenhuma transformação espontânea é possível, ou seja é equivalente ao apresentado pelo bloco quando apoiado sobre uma face de maior área.
- (B) Equilíbrio instável é aquele para o qual a transformação que leva a um estado mais estável é totalmente espontânea, não existindo uma barreira energética para o início da mesma, ou seja, não exige energia de ativação (energia necessária para iniciar a transformação). Este estado é análogo ao apresentado pelo bloco apoiado em uma aresta, que quando solto tende a cair assumindo uma posição de apoio mais estável sobre uma das faces.



- (A) Equilíbrio metaestável é aquele para o qual existe uma barreira energética que deve ser vencida para que se inicie a transformação que leva a estado de maior equilíbrio, ou seja, exige energia de ativação. É análogo ao apresentado pelo bloco apoiado numa das faces de menor área, que se manterá nessa posição, apesar de não ser a de maior equilíbrio, até que alguma energia seja fornecida para levá-lo à posição de maior estabilidade (apoiado sobre a face de maior área). Quando essa energia é fornecida ele passa inicialmente por um estado de equilíbrio instável que apresenta maior energia para depois atingir o estado de maior equilíbrio.

- A mesma análise pode ser feita do ponto de vista termodinâmico quando se considera a variação da energia livre com a evolução da reação, para a transformação que leva a um sistema do equilíbrio metaestável para o equilíbrio estável.
- Pode-se notar que há inicialmente a necessidade de se fornecer uma certa quantidade de energia (energia de ativação) que leve o sistema do estado inicial (metaestável) para um estado de transição (instável) a partir do qual a transformação que leva ao estado final (estável) é espontânea.
- A transformação, no entanto, ocorre com uma redução efetiva da energia livre uma vez que a energia final é menor que a inicial.



- Supondo:
- ESTADO 1: EQUILÍBRIO METAESTÁVEL
- ESTADO 2: EQUILÍBRIO INSTÁVEL
- ESTADO 3: EQUILÍBRIO ESTÁVEL
- Para ir de 1 a 3, a transformação deve ser acompanhada de uma redução efetiva de energia:

$$\Delta G_{1-3} = G_3 - G_1 < 0$$

- Associada a Força Motriz da Transformação
- No entanto, precisa vencer uma barreira energética que impede a passagem espontânea, a ENERGIA DE ATIVAÇÃO é definida:

$$\Delta G_{1-2} = G_2 - G_1 > 0$$

- Salienta-se que a ENERGIA DE ATIVAÇÃO fornecida é consumida além da própria energia da transformação (FORÇA MOTRIZ)
- Passando do estado 1 ao estado 3 e considerando a menor energia possível, o sistema está no estado de maior equilíbrio possível, já que nenhuma reação espontânea, que exige redução efetiva de energia pode ocorrer.

- Uma consequência disso é que, se um sistema passa de uma condição, termodinâmica para outra, através, por exemplo, através de uma variação de temperatura, para que ele atinja o equilíbrio estável na nova condição, ele deve sofrer transformações que o levem ao menor nível de energia correspondente a essa nova condição.
- E ainda, se um sistema está em um equilíbrio metaestável em uma determinada condição termodinâmica, ele potencialmente apresenta a tendência de sofrer transformações que o levem a um estado mais estável, desde que seja fornecida a energia de ativação necessária para vencer a barreira energética que inibe a transformação.

## 1.3. APLICAÇÕES DOS CONCEITOS DE EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO NAS TRANSFORMAÇÕES DE FASES DOS MATERIAIS

- Uma vez estabelecidos os conceitos de equilíbrio termodinâmico, pode-se analisar agora a sua correlação com a estabilidade da microestrutura de sistemas materiais, quando esses sistemas são submetidos a determinadas condições termodinâmicas, caracterizadas, por exemplo, por pares de valores de pressão e temperatura, e com as possíveis transformações de fases, observadas quando essas condições são alteradas.

## Exemplo 1: Ferro

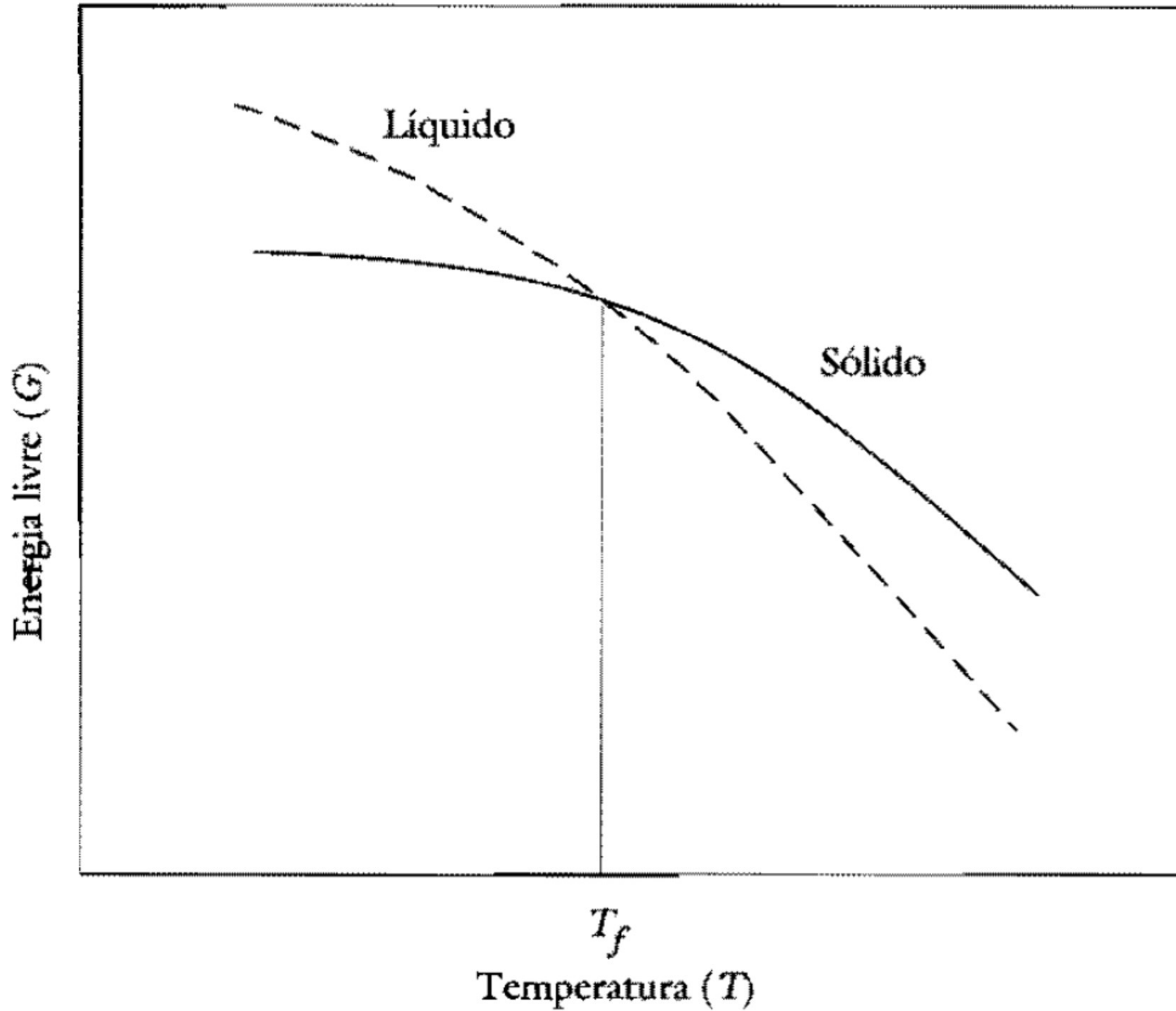
- $G$  (Ferro Oxidado) <  $G$  (Fe Puro)
- TERMODINAMICAMENTE MAIS ESTÁVEIS
- PRECISA DE ENERGIA DE ATIVAÇÃO (T)
- Fe metaestável é utilizado pois velocidade de reação é desprezível
- Estabilidade em T mais baixa

*O processamento dos materiais metálicos em geral ocorre em condições que se afastam do equilíbrio termodinâmico e, portanto, levam a formas ou estruturas metaestáveis e, muitas vezes, uma estrutura metaestável apresenta propriedades mais convenientes para a aplicação do que a estrutura termodinamicamente mais estável.*



## Exemplo 2: Solidificação de Metal Puro

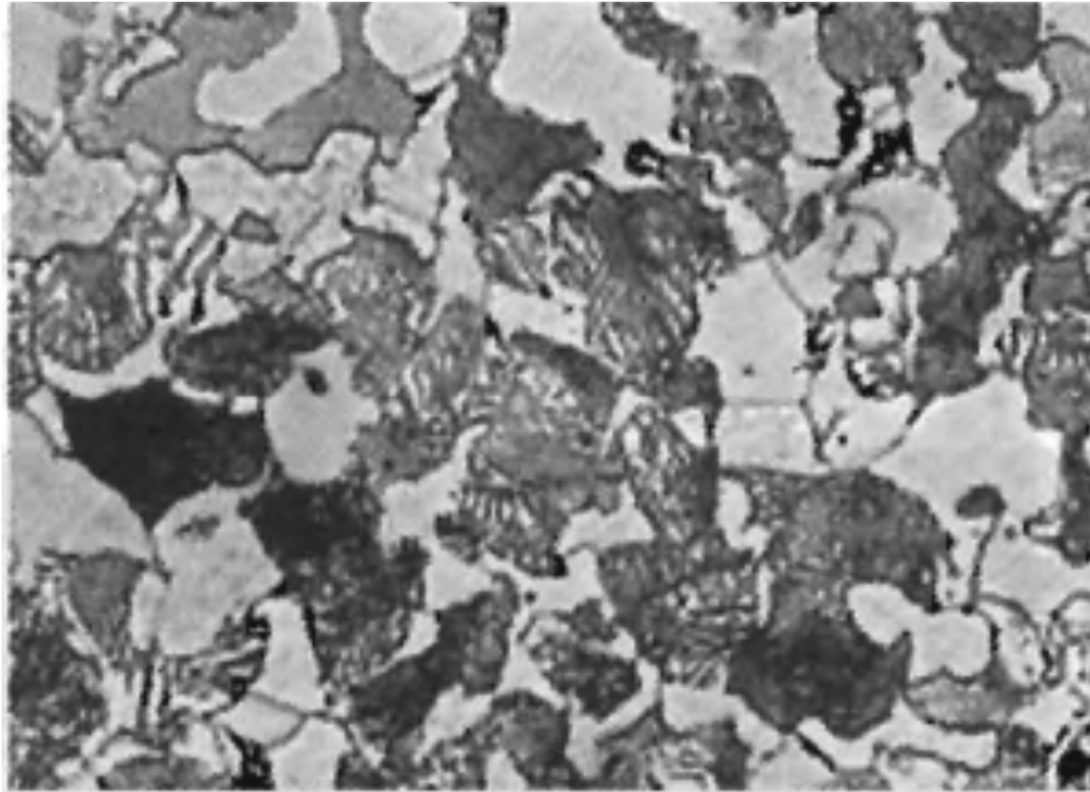
*Transformação de fase  
com mudança de  
estado*



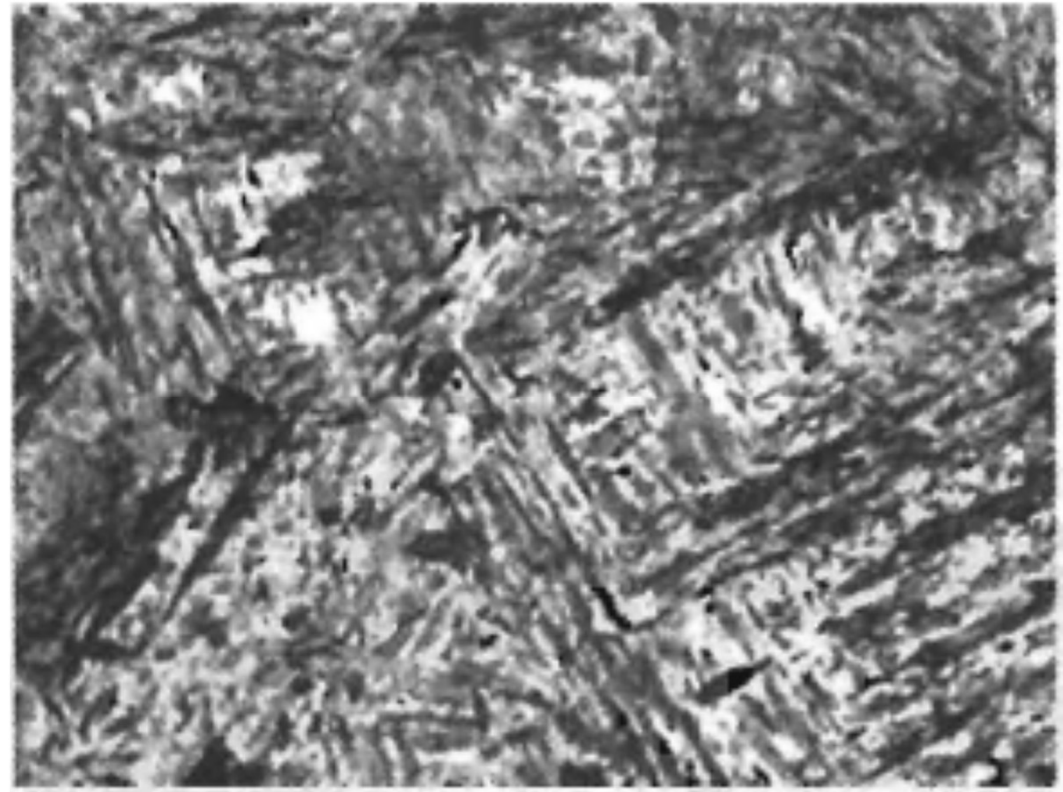
## Exemplo 3: Solidificação de Metal Puro

*Transformação de fase sem mudança de estado (ambas sólidas)*

*1045 - temperatura e pressão (mesmas condições termodinâmicas)*



*RECOZIDO*



*RECOZIDO*

## 1.4. ESTRUTURA DOS MATERIAIS METÁLICOS

*Alguns conceitos pertinentes para compreensão das mudanças de fases*

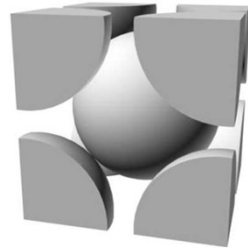
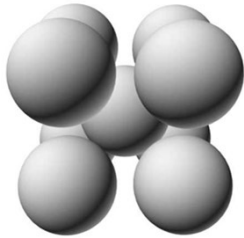
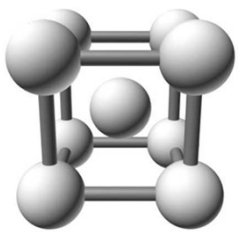
➤ ESTRUTURA CRISTALINA

➤ DIREÇÕES E PLANOS CRISTALOGRÁFICOS

➤ IMPERFEIÇÕES NA REDE CRISTALINA

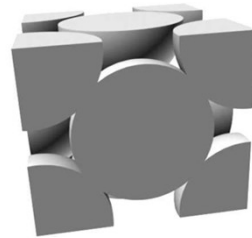
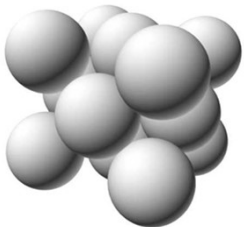
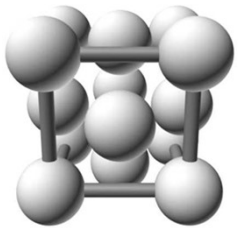
# ESTRUTURA CRISTALINA

## Estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado (CCC)



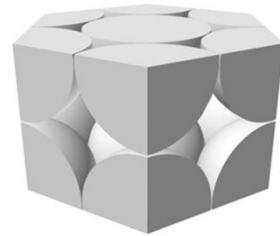
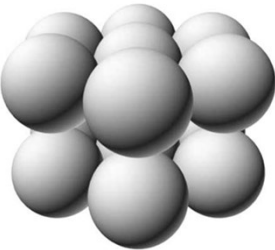
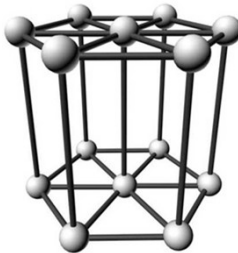
NA= 2  
NC= 8  
FE= 68%

## Estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada (CFC)

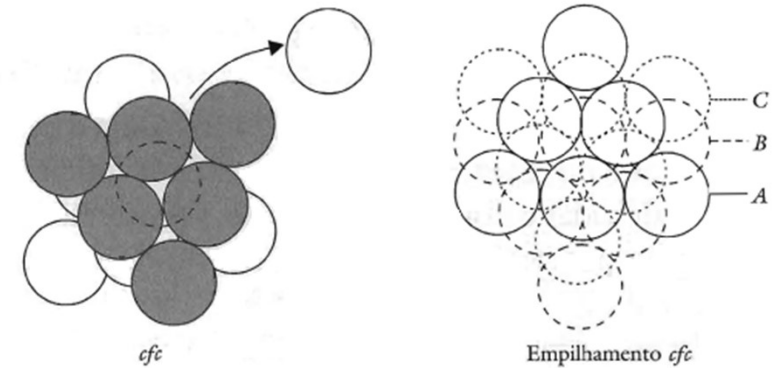


NA= 4  
NC= 12  
FE= 74%

## Estrutura cristalina Hexagonal Compacta (HC)

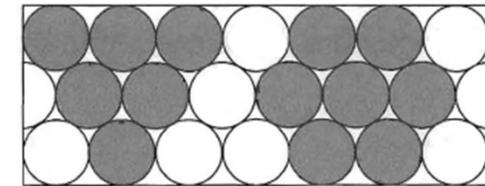


NA= 6  
NC= 12  
FE= 74%

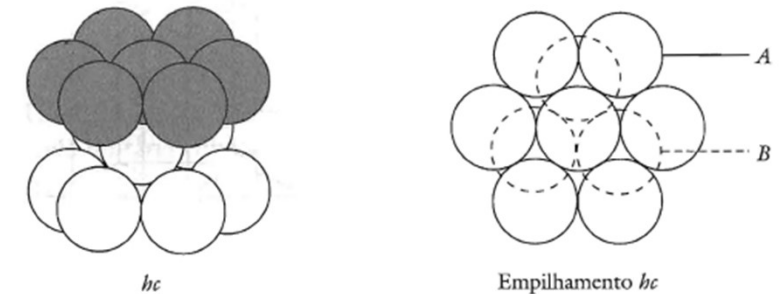


*cf*

Empilhamento *cf*



Plano compacto *cf* e *hc*



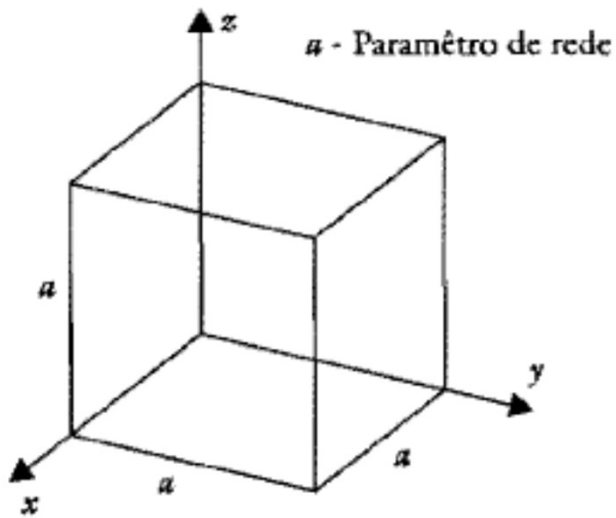
*hc*

Empilhamento *hc*

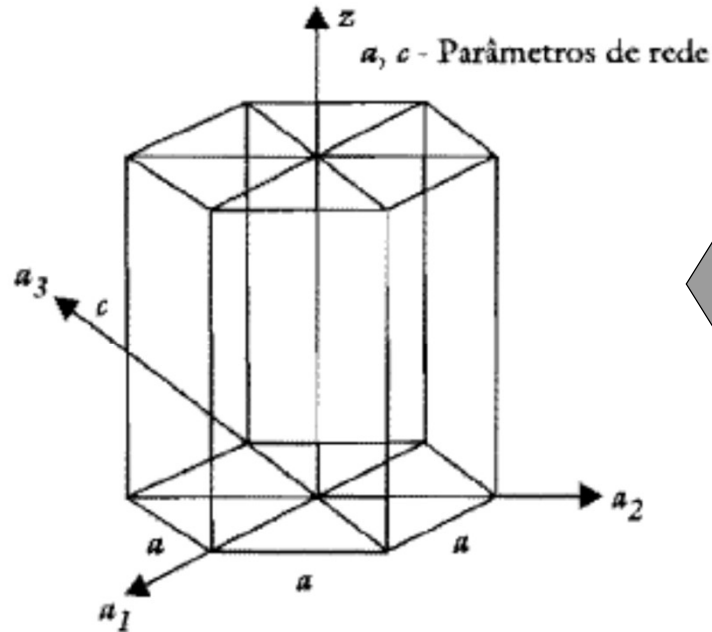
Formadas a partir de um mesmo plano compacto  
(plano de alta densidade atômica)

# DIREÇÕES E PLANOS CRISTALÓGRAFICOS

Muitas vezes na análise de uma estrutura cristalina é necessário identificar planos e direções em relação a sua célula unitária, o que é feito por coordenadas e notações específicas.



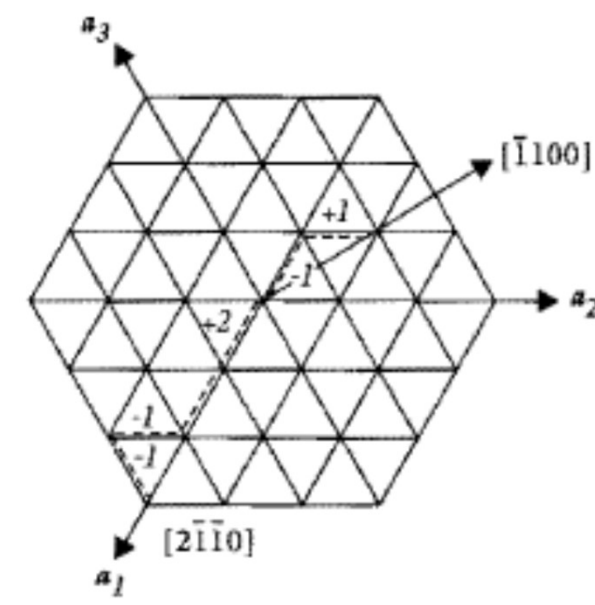
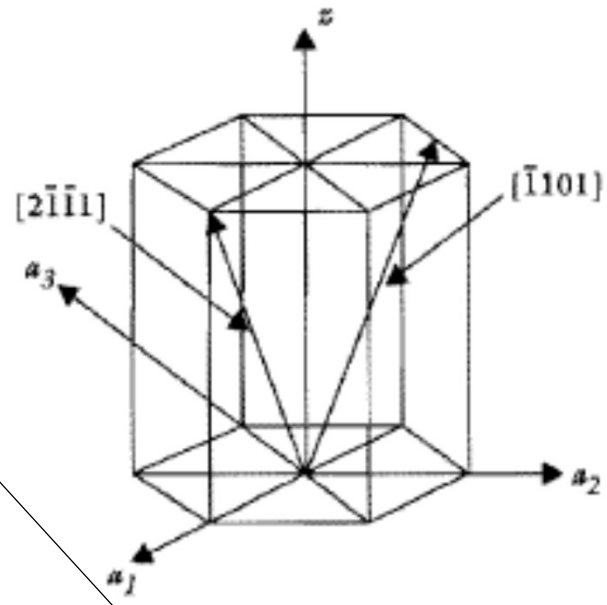
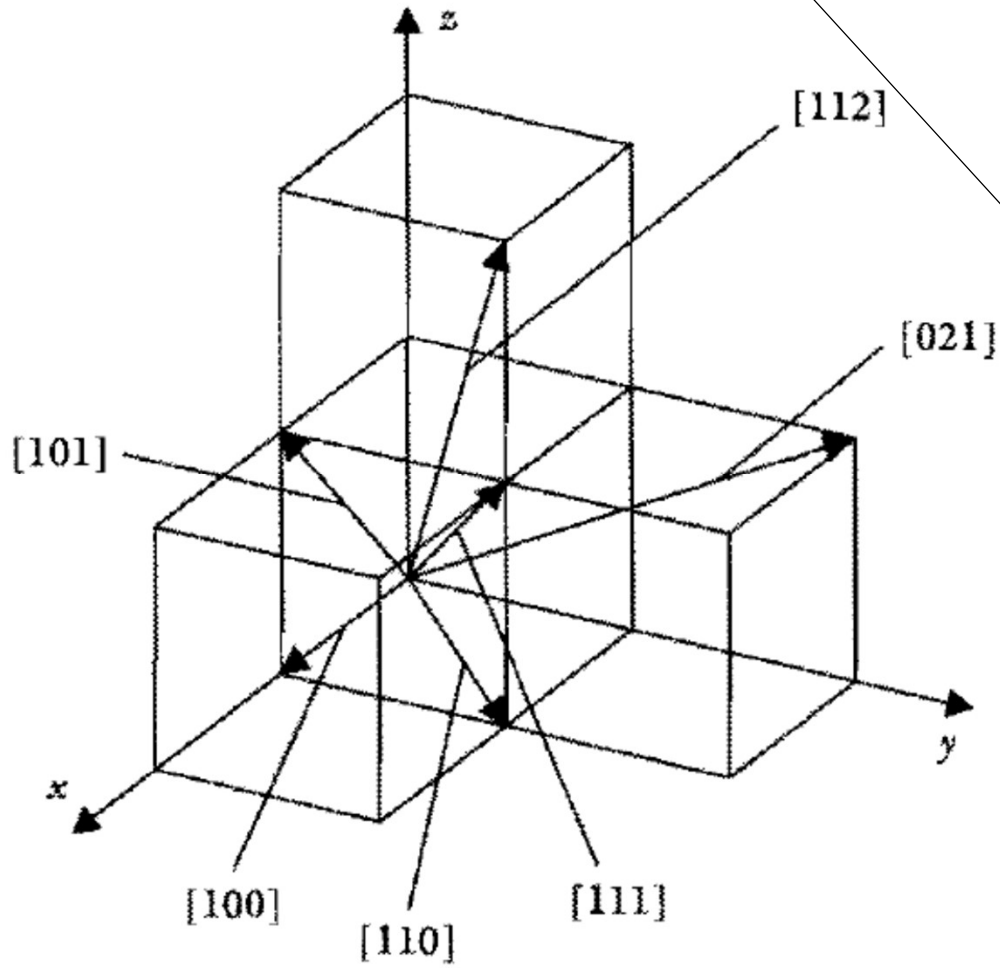
Célula cristalina cúbica

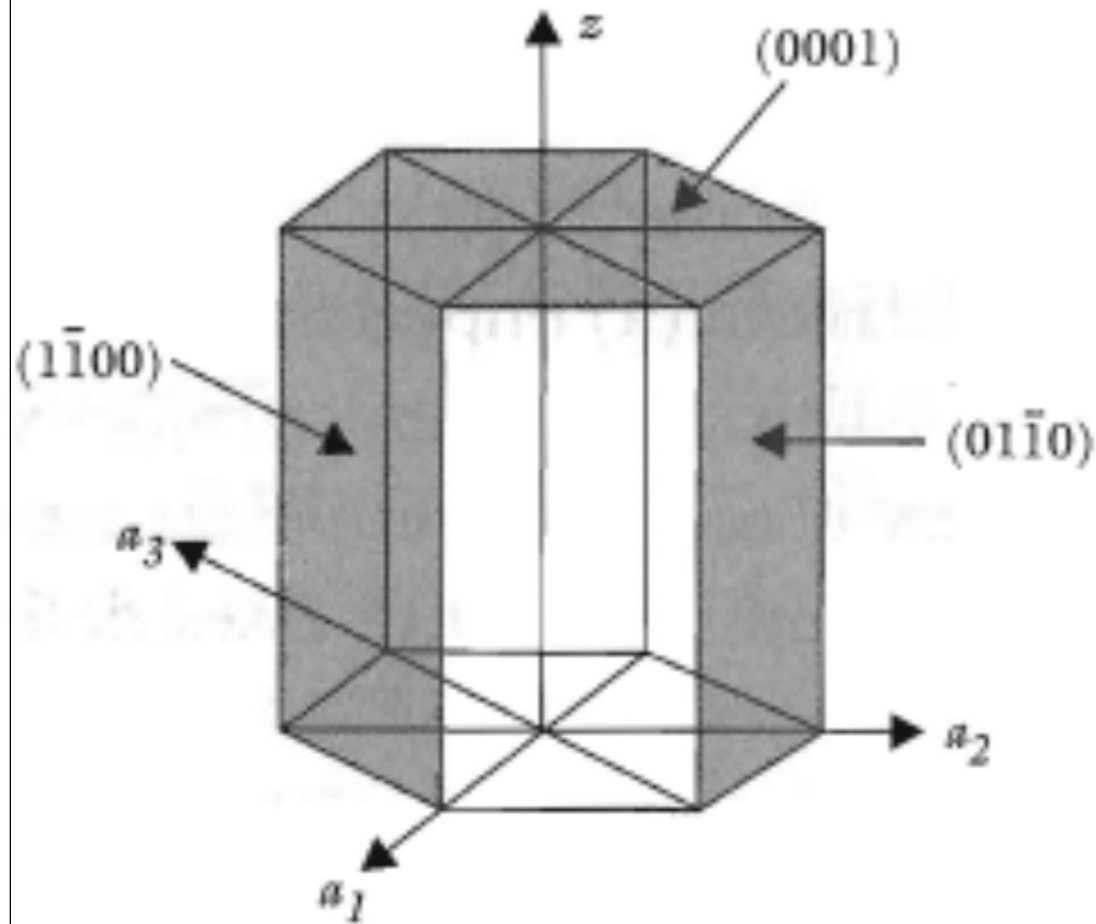
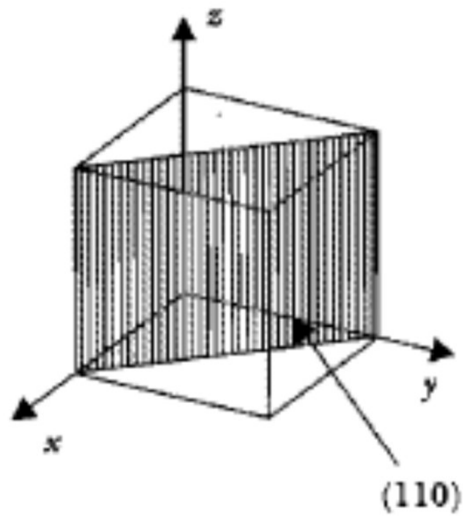
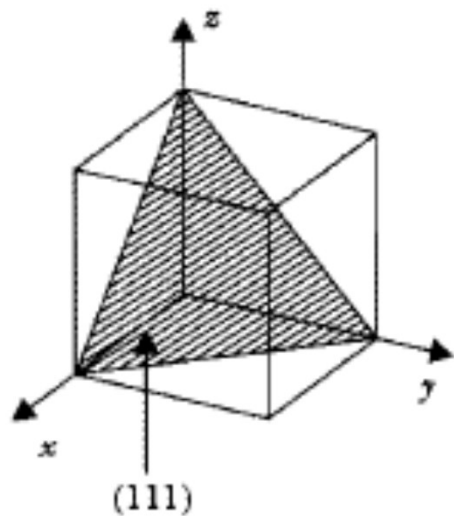
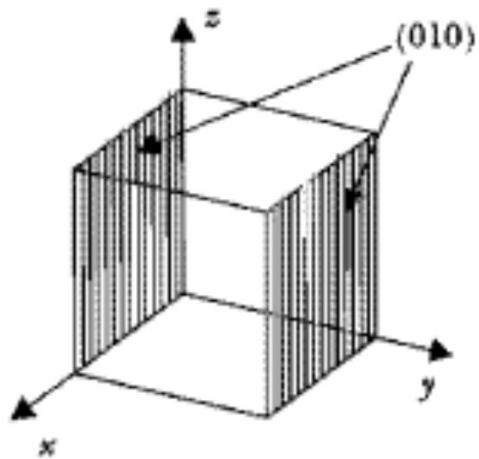


Célula cristalina hexagonal

SISTEMAS DE REFERENCIA PARA INDEXAÇÃO DE DIREÇÕES E PLANOS CRISTALÓGRAFICOS NAS CÉLULAS CRISTALINAS CÚBICA E HEXAGONAL.

# [VETOR direção]

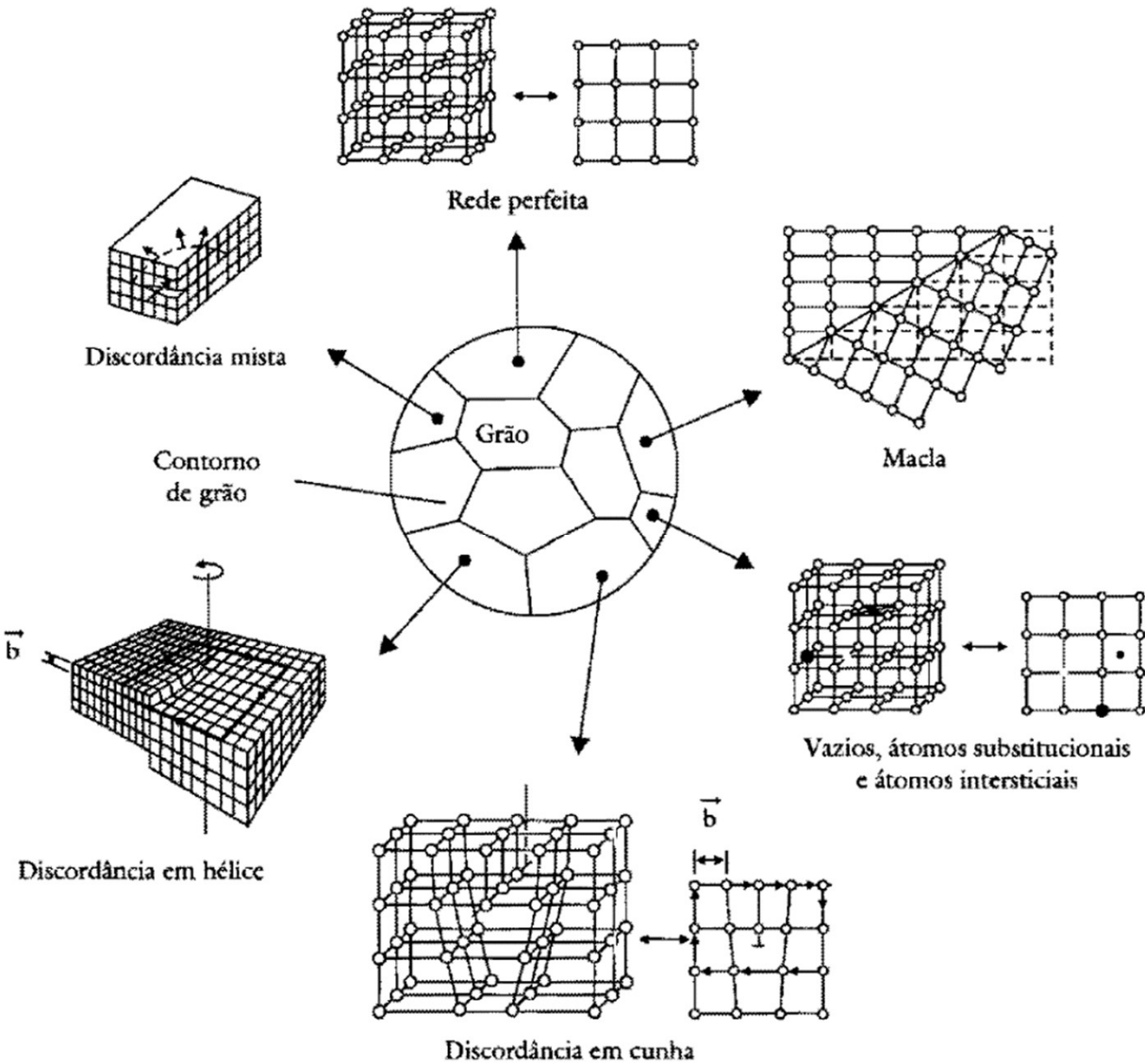




(PLANO)  
 Índices de Miller  
 $(h, k, l)$   
 Família de direções  
 $\langle x \ y \ z \rangle$   
 $(a_1 \ a_2 \ a_3 \ z)$   
 Família de planos  
 $\{h \ k \ l\}$   
 $\{h \ k \ i \ l\}$

Exemplos de planos indexados

# IMPERFEIÇÕES NA REDE CRISTALINA

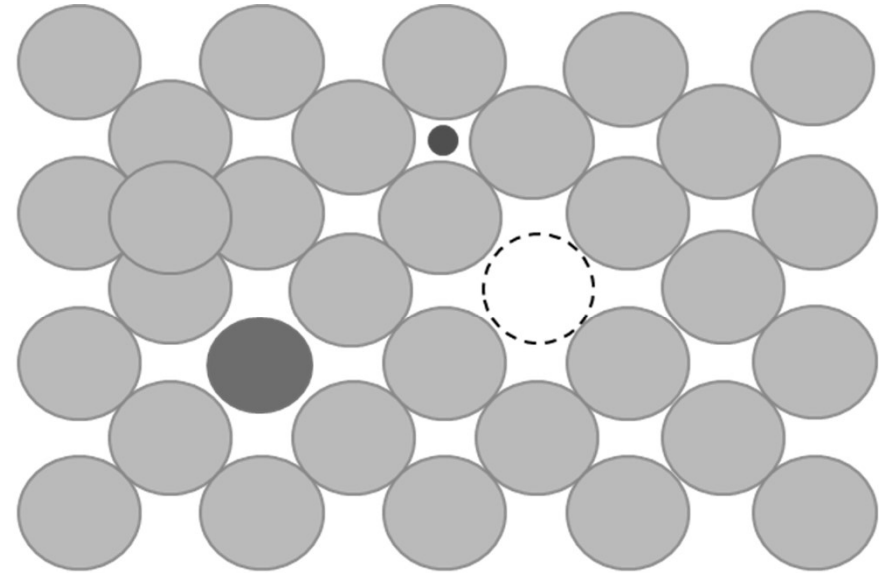


- Imperfeições pontuais
- Imperfeições lineares
- Imperfeições superficiais.





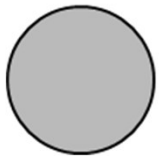
**Vacância:** ausência de átomo



**Impureza Intersticial:** átomo diferente ocupando um interstício



**Impureza Substitucional:** átomo diferente ocupando uma vacância



**Auto Intersticial:** átomo da própria rede ocupando um interstício

Discordância é um defeito linear (unidimensional), em torno do qual alguns átomos estão desalinhados, separando a região perfeita da região deformada do material;

As discordâncias estão associadas com a cristalização do material e a sua deformação (maior ocorrência);

Origem: térmica, mecânica e supersaturação de defeitos pontuais;

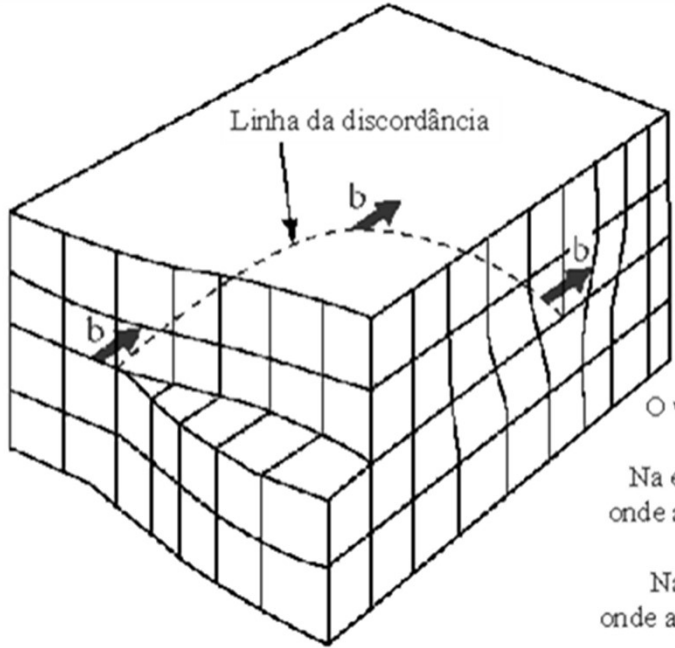
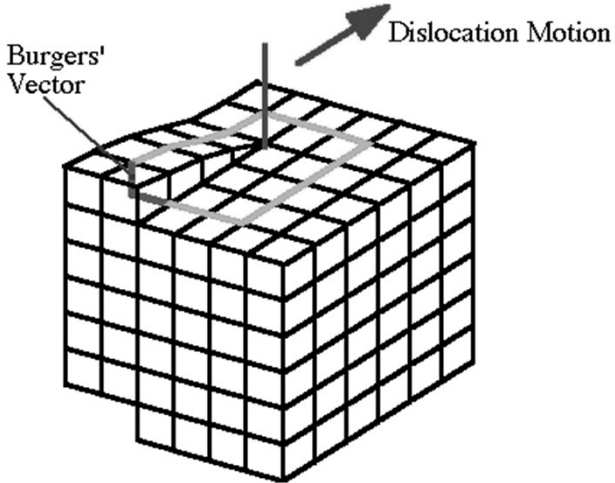
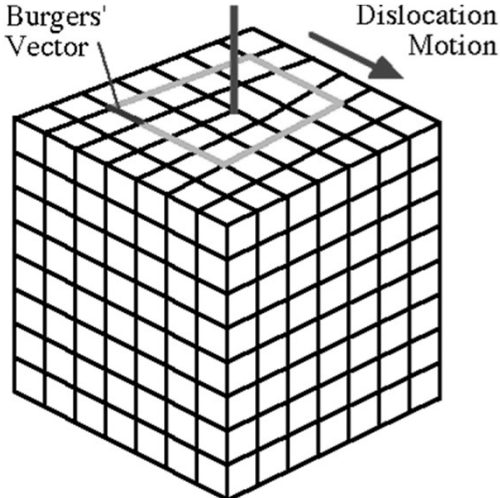
A presença deste defeito é a responsável pela deformação (*os metais são cerca de 10 vezes mais “moles” do que deveriam*), falha e rompimento dos materiais;

A quantidade e o movimento das discordâncias podem ser controlados pelo grau de deformação (conformação mecânica) e/ou por tratamentos térmicos

Aresta, Linha ou Cunha.

Espiral ou Hélice

Mista



○ vetor de Burgers mantém uma direção fixa no espaço.  
 Na extremidade inferior esquerda, onde a discordância é pura hélice, **b** é paralelo a discordância.  
 Na extremidade superior direita, onde a discordância é pura linha, **b** é perpendicular a discordância.

PLANARES: “Defeitos Interfaciais” são contornos que possuem duas dimensões e, normalmente, separam regiões dos materiais de diferentes estruturas cristalinas e/ou orientações cristalográficas;

✓ Essas imperfeições incluem:

- Superfície externa
- Contorno de grão
- Fronteiras entre fases
- Contorno de Macla ou Twin
- Defeitos de empilhamento

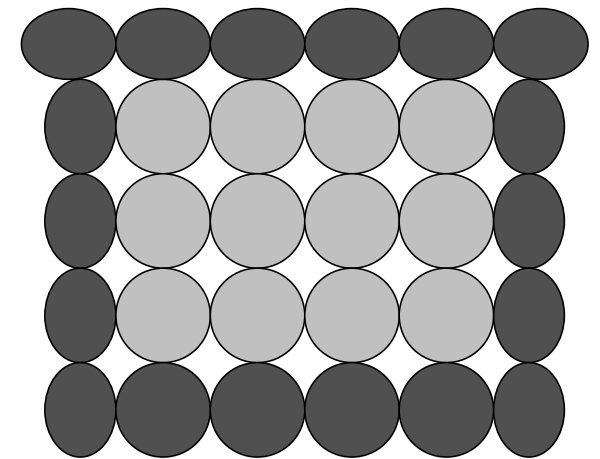
## Superfície externa

É o tipo de “contorno” (defeito planar) mais óbvio, ao longo do qual termina a estrutura do cristal.

Na superfície os átomos não estão ligados ao número máximo de vizinhos mais próximos, isto implica num estado energético (*dos átomos na superfície*) maior que no interior do cristal.

Os materiais tendem a minimizar esta energia.

A energia superficial é expressa em  $\text{J/m}^2$  ou  $\text{erg/cm}^2$ )



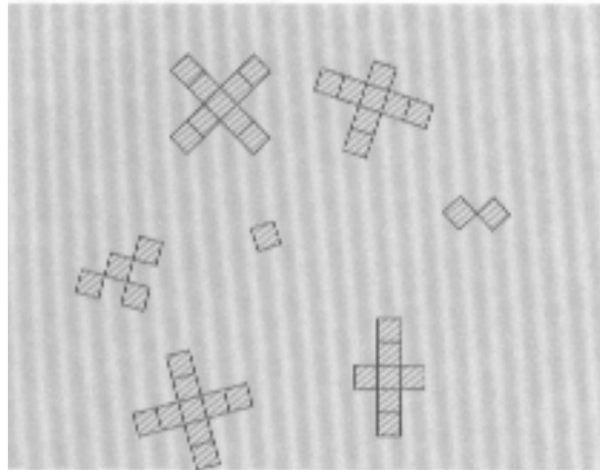
## Contorno de grão

Empacotamento menos eficiente

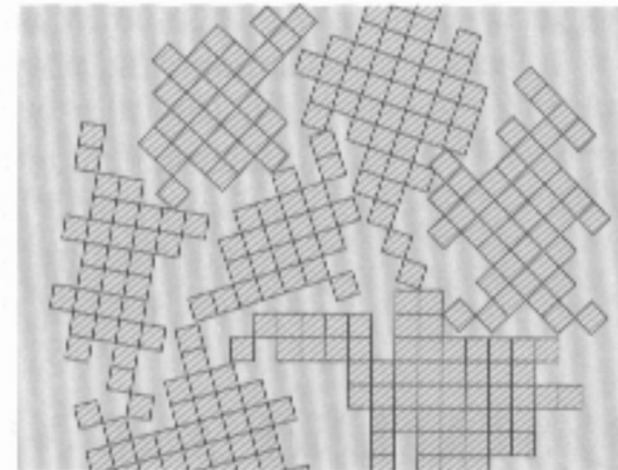
Energia mais elevada

Favorece a nucleação de novas fases (segregação)

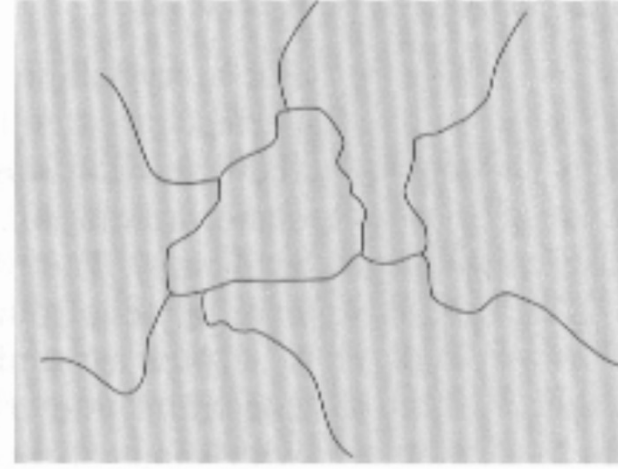
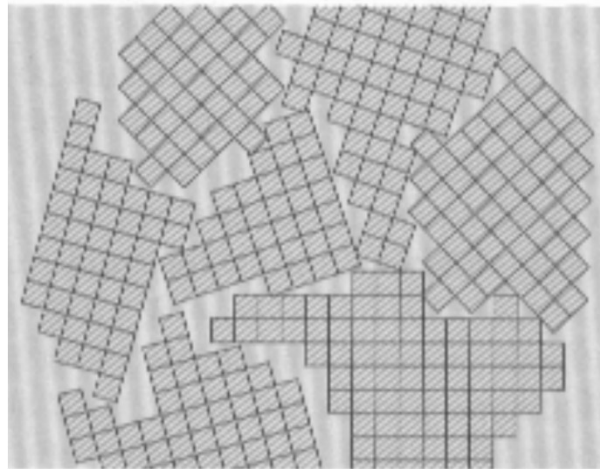
Favorece a difusão

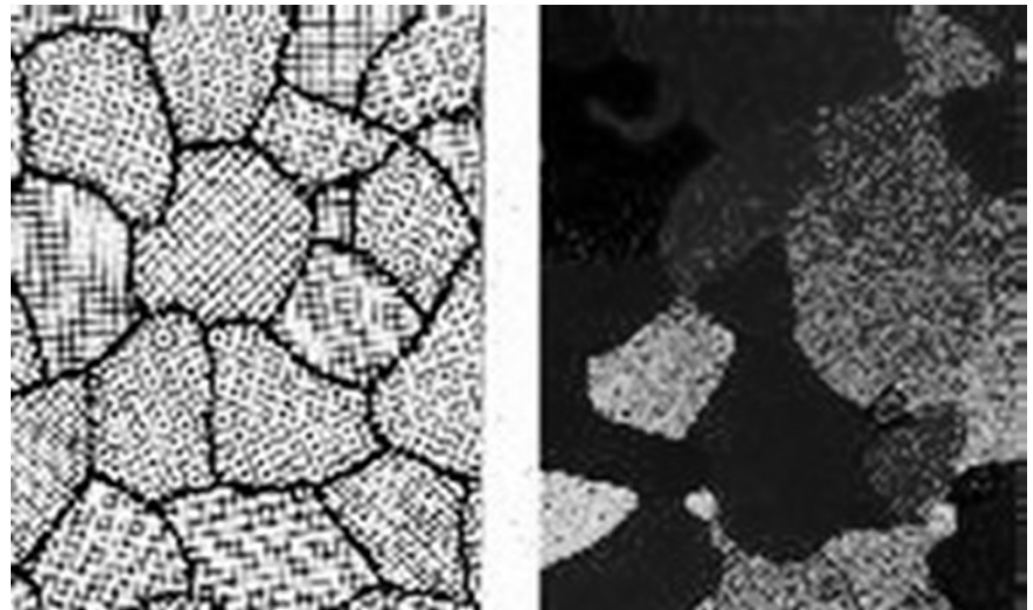
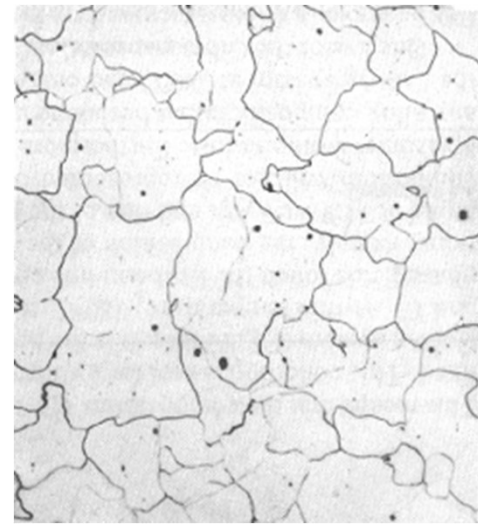
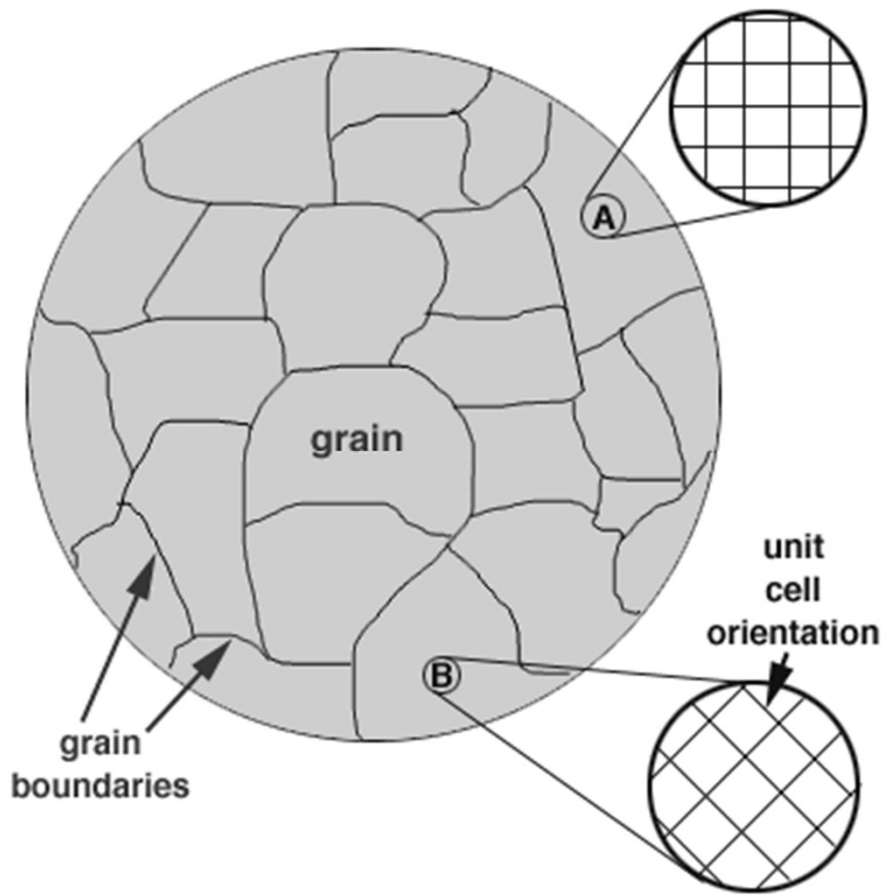


(a)



(b)





## Contorno de Macla ou Twin

☞ Este tipo de contorno, também denominado de “Twins” (cristais gêmeos), é um tipo especial de contorno de grão, onde existe uma simetria em “espelho” da rede cristalina.

● Os átomos de um lado do contorno são “imagens” dos átomos do outro lado do contorno.

● A Macla ocorre num plano definido e numa direção específica, conforme a estrutura cristalina.

- Fronteira de alta simetria onde um grão é o espelho do outro.

