



# Introdução a Ciência dos Materiais

## ESTRUTURAS CRISTALINAS

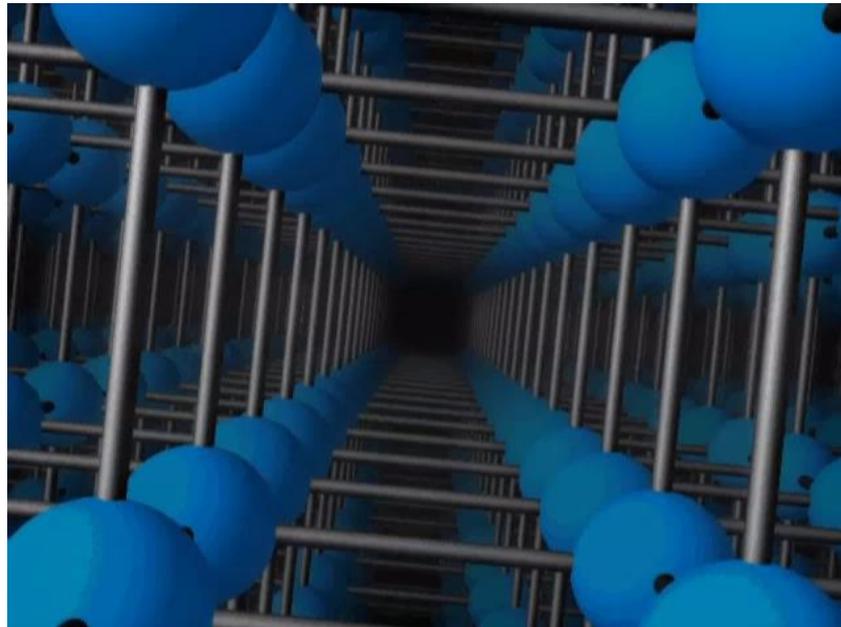
Professora: Maria Ismenia Sodero

[maria.ismenia@usp.br](mailto:maria.ismenia@usp.br)



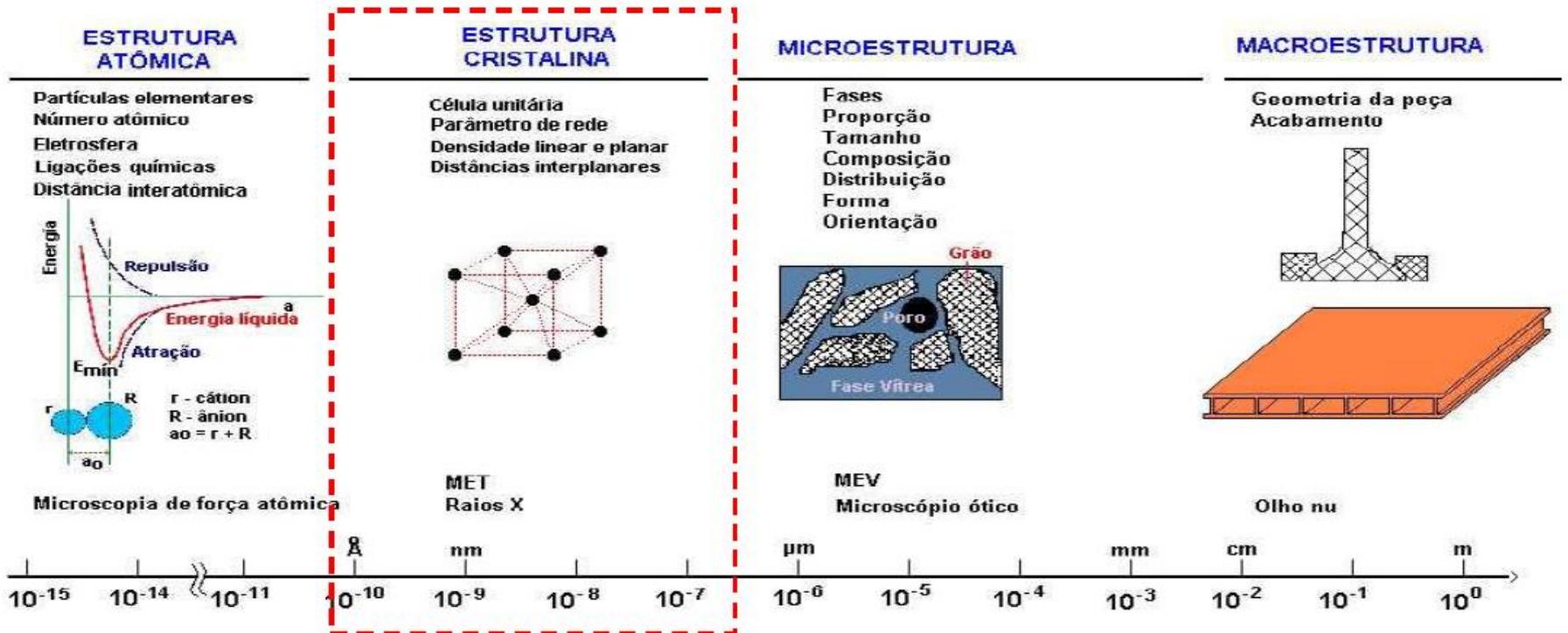
# O que você vai aprender?

- Como os átomos se arranjam em estruturas sólidas?
- Como a densidade dos materiais dependem da estrutura?
- Como as propriedades dos materiais variam com a estrutura e/ou orientações dos átomos





# ORDEM DE GRANDEZA





# Energia Potencial

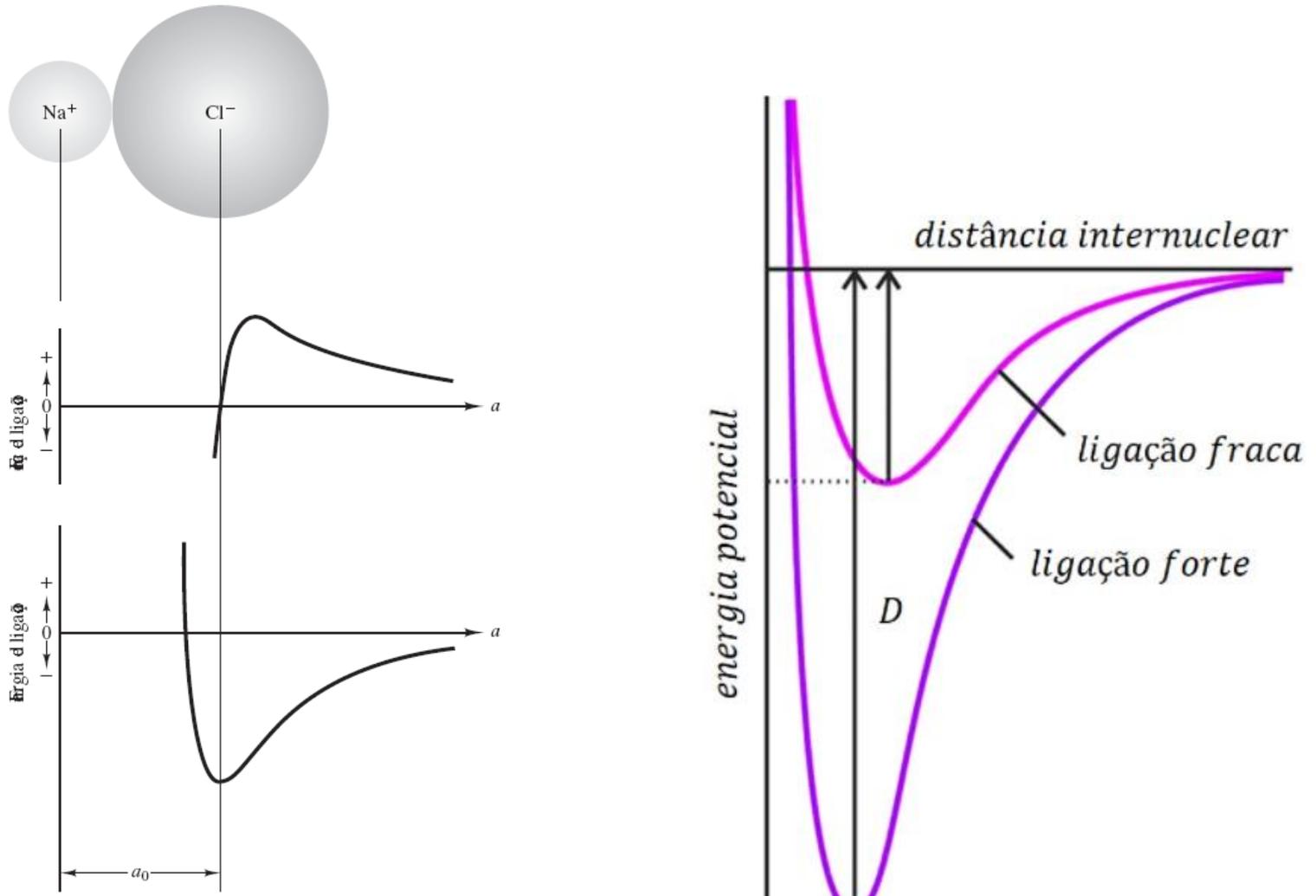
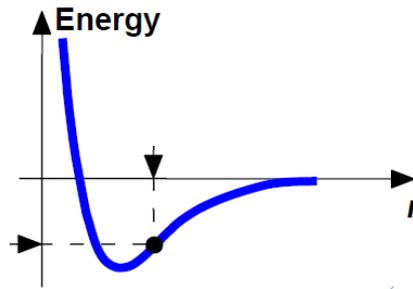
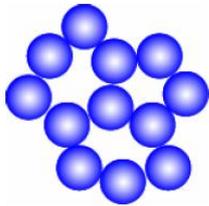


Figura 2.8 Comparação entre a curva da força de ligação e a curva da energia de ligação para um par  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ . Como  $F = dE/da$ , o comprimento da ligação em equilíbrio ( $a_0$ ) ocorre onde  $F = 0$  e  $E$  é um mínimo (veja a Equação 2.5).

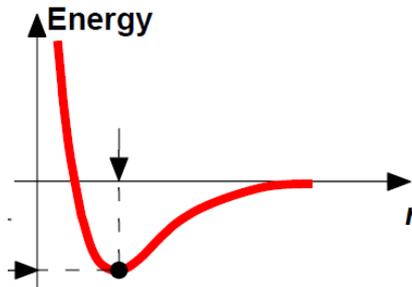
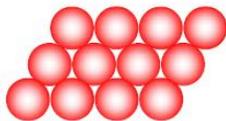


# Energia e Empacotamento

Baixa densidade, empacotamento **aleatório**



Alta densidade, empacotamento **ordenado**

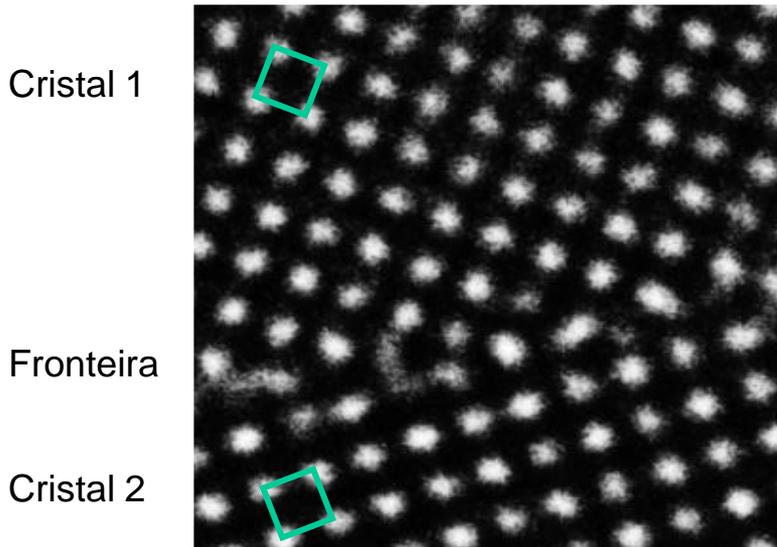




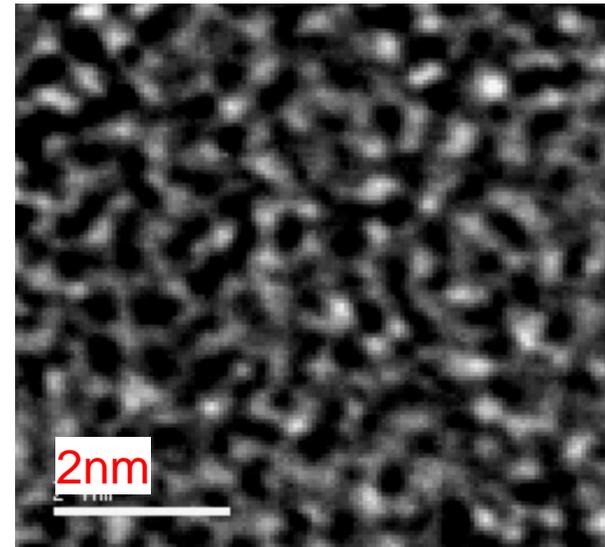
# Estruturas Cristalinas

Muitos materiais - metais, algumas cerâmicas, alguns polímeros - ao se solidificarem, se organizam numa rede geométrica 3D - **a rede cristalina**.

Estes materiais **cristalinos**, têm uma estrutura altamente organizada, em contraposição aos materiais **amorfos**, nos quais não há *ordem de longo alcance*.

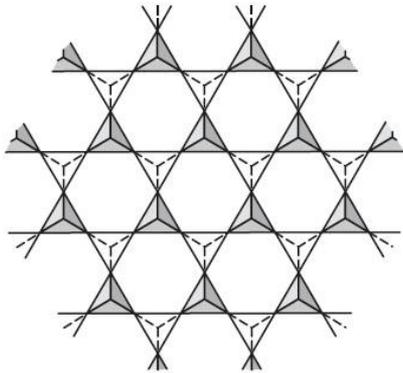


Fronteira entre dois cristais de  $\text{TiO}_2$ .  
Note a organização geométrica dos átomos.

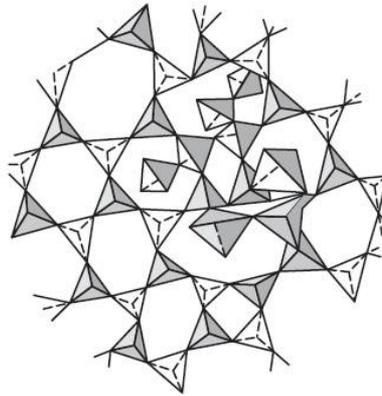


Carbono amorfo.  
Note a desorganização na posição dos átomos.

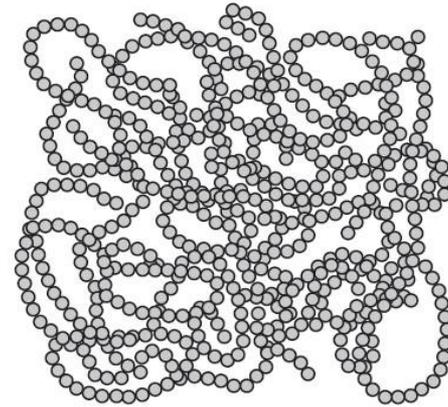
# Sólidos não cristalinos



(a)



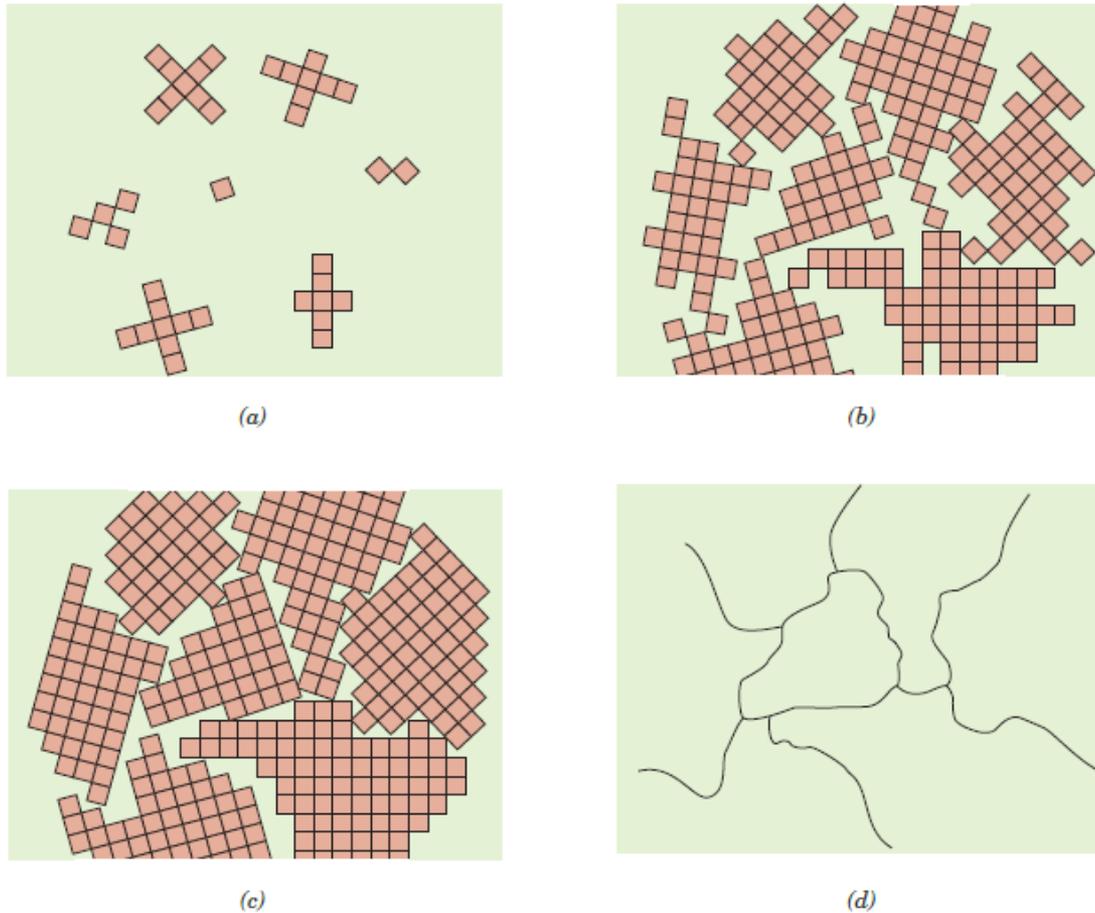
(b)



(c)

Um esquema mostrando vários graus de ordem em materiais: (a) sílica cristalina com estrutura toda ordenada, (b) vidro de sílica sem a ordenação em toda a extensão, e (c) estrutura amorfa em polímeros.

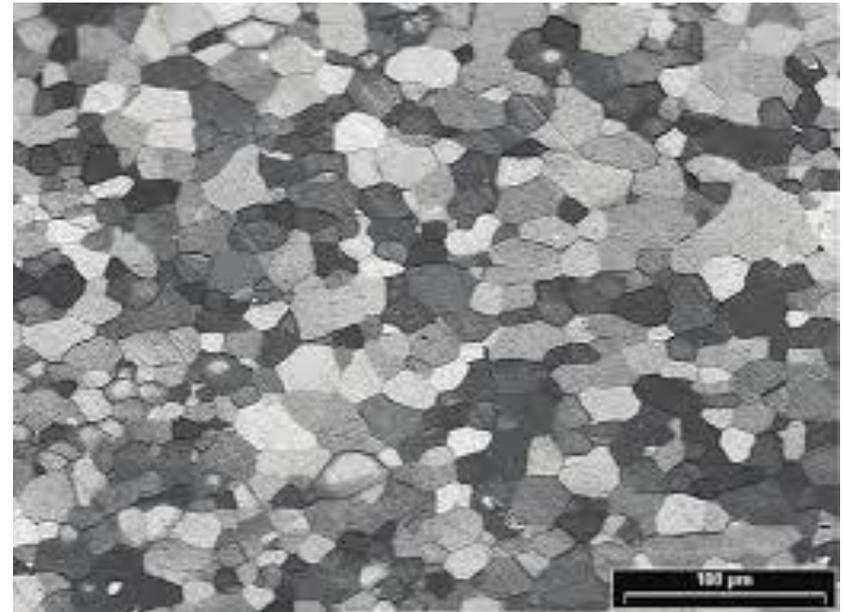
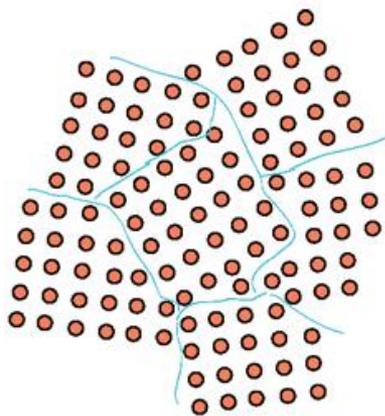
# Policristalino



**Figura 3.18** Diagramas esquemáticos dos vários estágios na solidificação de um material policristalino; os retículos quadrados representam células unitárias. (a) Pequenos núcleos de cristalização. (b) Crescimento dos cristalitos; também está mostrada a obstrução de alguns grãos adjacentes. (c) À conclusão da solidificação, foram formados grãos com formas irregulares. (d) A estrutura de grãos como ela apareceria sob um microscópio; as linhas escuras são os contornos dos grãos. (Adaptado de W. Rosenhain, *An introduction to the Study of Physical Metallurgy*, 2. ed. Constable & Company Ltd., London, 1915.)



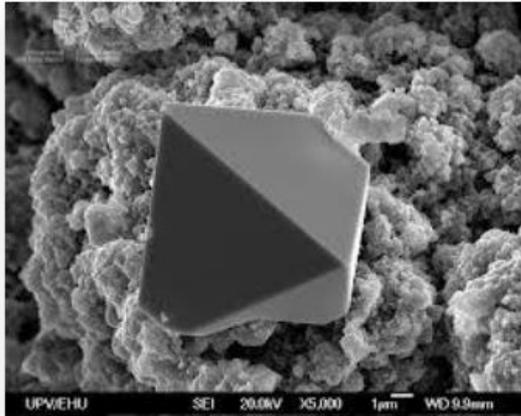
Exemplo de Aplicação de Material Policristalino: Chapas laminadas de aço para indústria da linha branca – geladeira; fogão; micro-ondas.





## MONOCRISTAL:

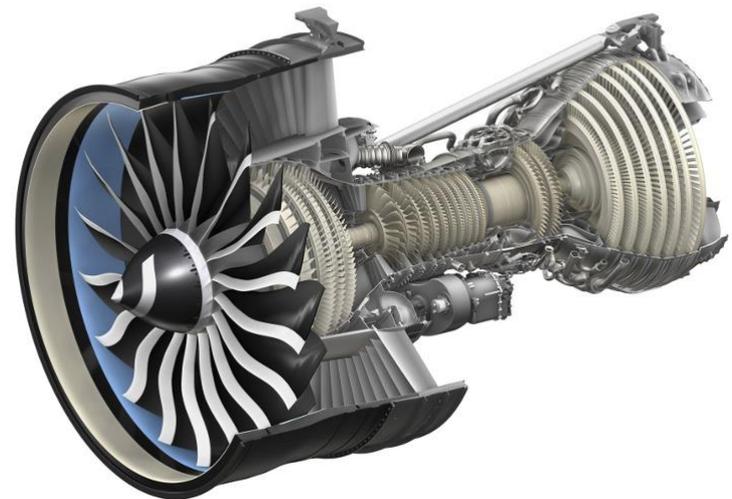
arranjo periódico perfeito e repetido de átomos que se estende por toda a amostra



Monocristal de Platina

Paletas de superliga à base de níquel da turbina de alta pressão.

Exemplo de Aplicação de **Material Monocristalino**: Paletas de superligas à base de níquel para turbina de alta pressão em turbinas aeronáuticas.



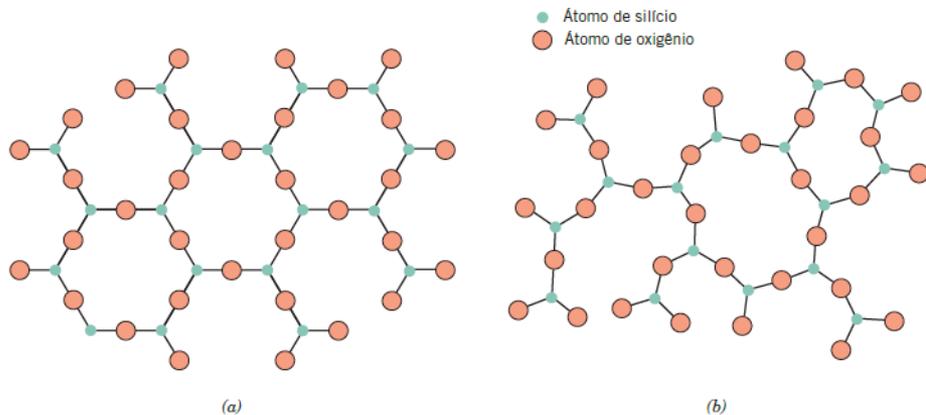


## Exemplo de Aplicação de Material Amorfo



A estrutura amorfa é geralmente observada em materiais que poderiam apresentar estrutura cristalina se solidificados sob condições especiais.

Alguns compostos cerâmicos a base de óxidos, silicatos, boratos e aluminetos formam estrutura vítreas em condições normais de solidificação.



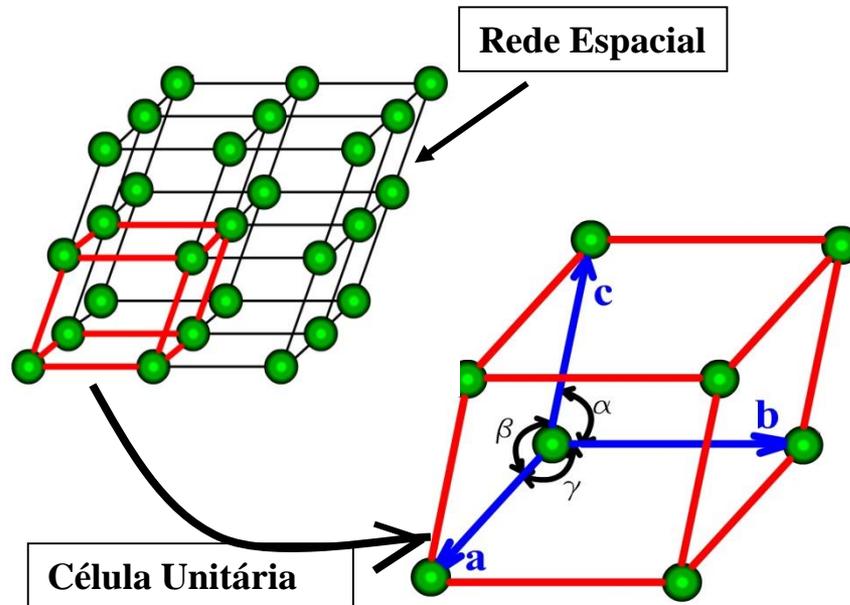
A sílica é o exemplo clássico de material que em condições especiais pode exibir o processo de cristalização e formar o quartzo. Por outro lado, se o resfriamento da sílica, a partir do líquido, ocorre em condições normais, a estrutura resultante é amorfa;

**Figura 3.23** Esquemas bidimensionais para a estrutura do (a) dióxido de silício cristalino e (b) dióxido de silício não cristalino.



# Célula Unitária

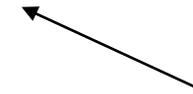
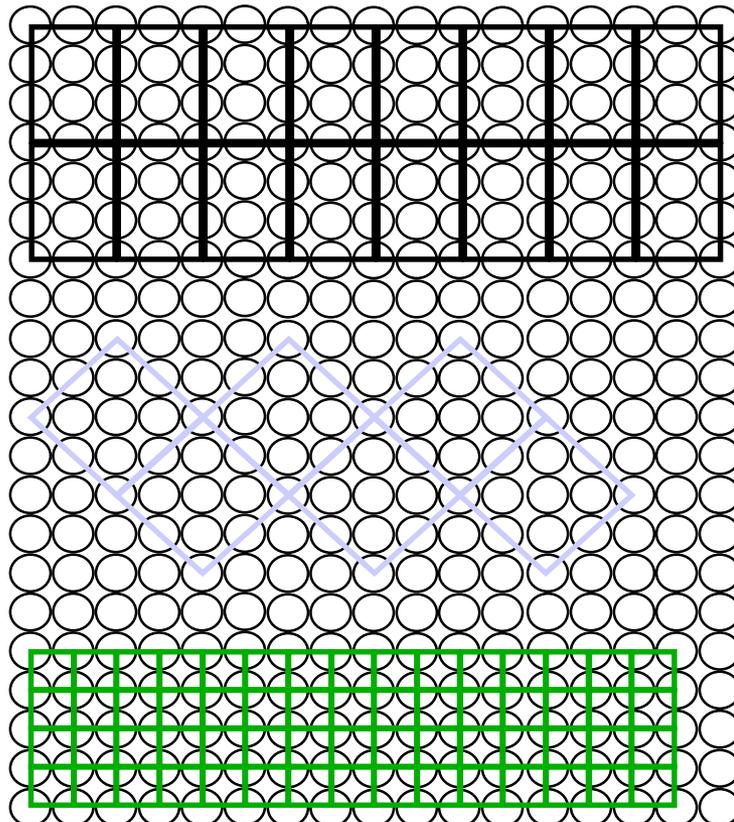
A célula unitária consiste na unidade estrutural básica ou bloco construtivo básico da estrutura cristalina e define a estrutura cristalina em relação a sua geometria e das posições dos átomos no seu interior.



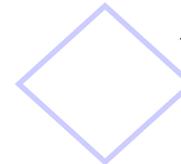


# Célula Unitária

Como a rede cristalina tem uma estrutura repetitiva, é possível descrevê-la a partir de uma estrutura básica, como um “tijolo”, que é repetida por todo o espaço.



**Células Não-Unitárias**



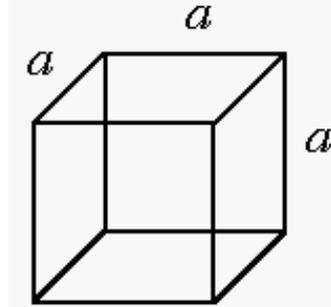
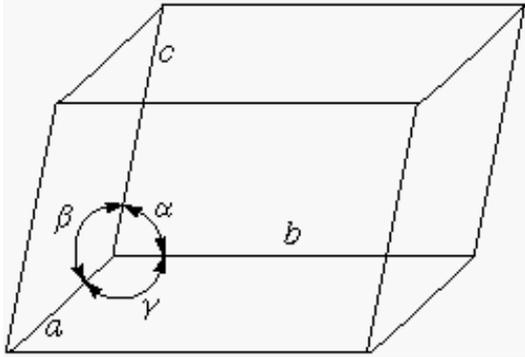
**Célula Unitária**

Menor “tijolo” que repetido reproduz a rede cristalina

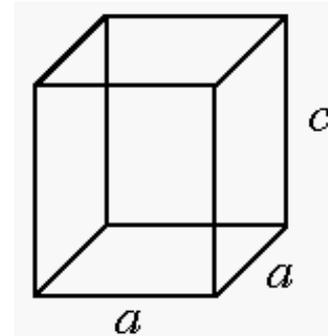


# Os 7 Sistemas Cristalinos

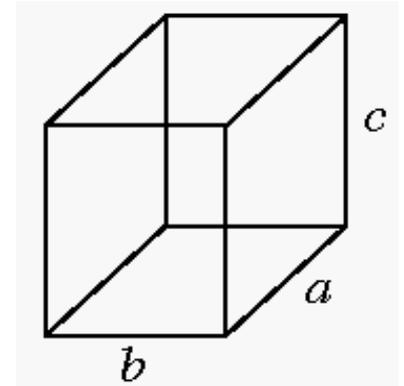
Só existem 7 tipos de células unitárias que preenchem totalmente o espaço



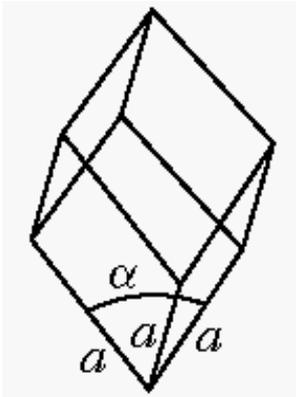
Cúbica  
 $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$



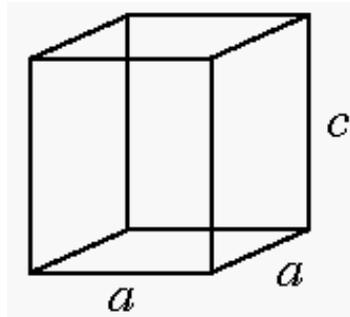
Tetragonal  
 $a=b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$



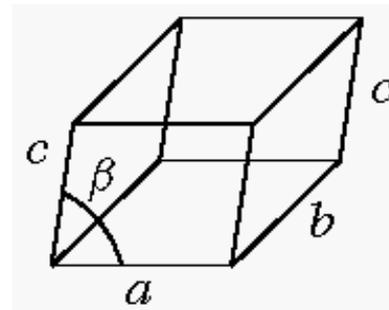
Ortorrômbica  
 $a \neq b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$



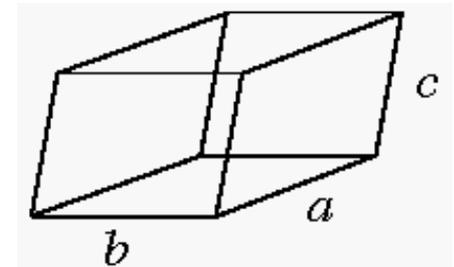
Romboédrica  
 $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$



Hexagonal\*  
 $a=b \neq c, \alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$



Monoclínica  
 $a \neq b \neq c, \alpha=\gamma=90^\circ \neq \beta$

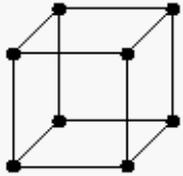


Triclínica  
 $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

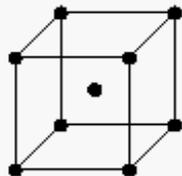


# As 14 Redes de Bravais

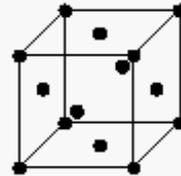
Redes Cristalinas = posicionamento dos átomos em entidades geométricas



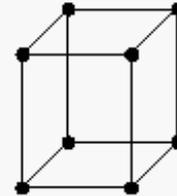
Cúbica Simples



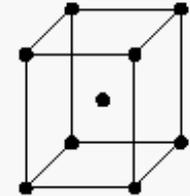
Cúbica de Corpo Centrado



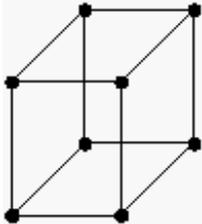
Cúbica de Face Centrada



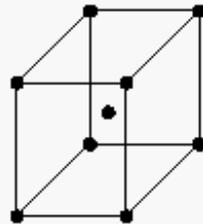
Tetragonal Simples  
tetragonal



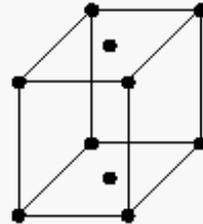
Tetragonal de Corpo Centrado



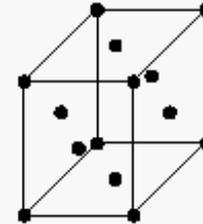
Ortorrômica Simples



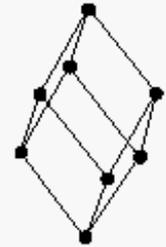
Ortorrômica de Corpo Centrado



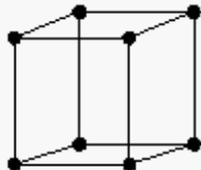
Ortorrômica de Base Centrada



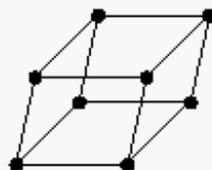
Ortorrômica de Face Centrada



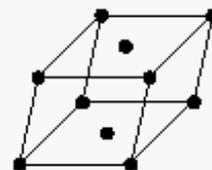
Romboédrica Simples



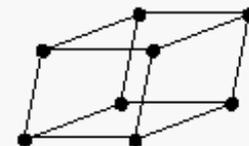
Hexagonal



Monoclínica Simples



Monoclínica de Base Centrada

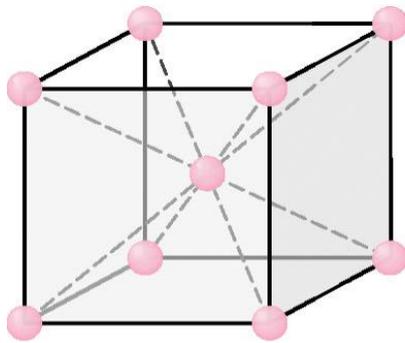


Triclínica



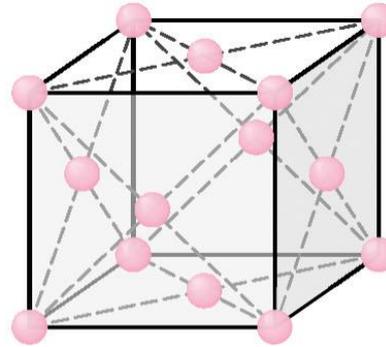
# Princípios estruturais dos metais

A maior parte dos elementos metálicos (~90%) se cristaliza, ao se solidificar, em três estruturas cristalinas compactas: cúbica de corpo centrado, cúbica de face centrada e hexagonal compacta.



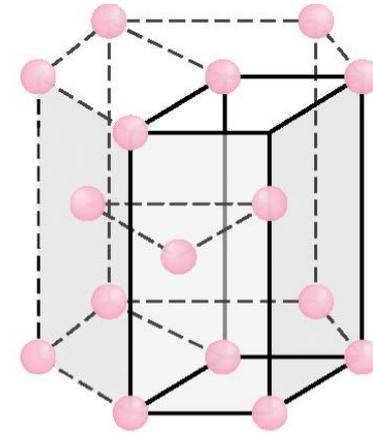
(a)

**BCC**



(b)

**FCC**



(c)

**HCP**