

Cristal Ideal e Propriedades Cristalinas

Tecnologia dos Materiais 2024.2

01.12.2024

Aluno: Henrique Pedro da Silva

Professor: Edval J. P. Santos, PhD

Repositório: https://github.com/shapis/ufpe_ee/

Sumário

1 Contexto Histórico	5
1.a Johannes Kepler	6
1.b René Descartes	7
1.c Robert Hooke	8
1.d Wilson Bentley	9
1.e Ukichiro Nakaya	10
2 Introdução ao Cristal Ideal	11
2.a Cristal Ideal	12
2.b Exemplos de Materiais Cristalinos	13
3 Arranjo Cristalino	14
3.a Base e Rede	15
3.b Modelo de esfera rígida e célula unitária	16
3.c Cubica de Faces Centradas (CFC)	17
3.d Cúbica de Corpo Centrado. (CCC)	19
3.e Cúbica Cristalina Simples (CS).	22
3.f Propriedades do Arranjo	26

Sumário (ii)

4 Simetrias do Cristal	27
4.a Grupos Matemáticos de Simetria	28
4.b Propriedades Associadas à Simetria	29
4.c Pontos Cristalográficos	30
4.d Direções Cristalográficas	35
4.e Planos Cristalográficos	38
4.f Densidade Linear e Planar	42
4.g Policristais	45
4.h Piezoelectricidade	48
5 Manufatura	55
5.a Criando Um Cristal de Sal	56
6 Normas	64
6.a ISO 9001:2015	65
6.b ASTM E1941-18	66
6.c ISO 17274:2016	67
7 Aplicações	68

Sumário (iii)

7.a Marcapasso	69
7.b Lasers	70
7.c Semicondutores	71
8 Bibliografia	72
8.a Fontes	73

1 Contexto Histórico

Johannes Kepler

Each single plant has a single animating principle of its own, since each instance of a plant exists separately, and there is no cause to wonder that each should be equipped with its own peculiar shape. But to imagine an individual soul for each and any starlet of snow is utterly absurd, and therefore the shapes of snowflakes are by no means to be deduced from the operation of soul in the same way as with plants.

— Kepler, 1611

Fonte: Kepler, Johannes. «The Six-Cornered Snowflake», 1611.

René Descartes

I only had difficulty to imagine what could have formed and made so exactly symmetrical these six teeth around each grain in the midst of free air and during the agitation of a very strong wind, until I finally considered that this wind had easily been able to carry some of these grains to the bottom or to the top of some cloud, and hold them there, because they were rather small; and that there they were obliged to arrange themselves in such a way that each was surrounded by six others in the same plane, following the ordinary order of nature.

— René Descartes, 1635

Fonte: Descartes, René. «Observations on the Amsterdam Snowfalls», 1634.

Robert Hooke

By the help of microscopes, there is nothing so small, as to escape our inquiry; hence there's a new visible world discovered to the understanding.

— Robert Hooke, 1665

Fonte: Hooke, Robert. «Micrographia: Or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glass with observations and inquiries thereupon», 1665.

Wilson Bentley

Under the microscope, I found that snowflakes were miracles of beauty; and it seemed a shame that this beauty should not be seen and appreciated by others. Every crystal was a masterpiece of design and no one design was ever repeated. When a snowflake melted, that design was forever lost. Just that much beauty was gone, without leaving any record behind.

— Wilson Bentley, 1925

Ukichiro Nakaya

A snow crystal is a letter from the sky.

— Ukichiro Nakaya, 1954

Fonte: Nakaya, Ukichiro. «Snow Crystals: Natural and Artificial», 1954.

2 Introdução ao Cristal Ideal

Cristal Ideal

Um cristal ideal é uma estrutura geométrica composta por átomos, íons ou moléculas organizados de maneira periódica e repetitiva no espaço. Propriedades principais:

- **Perfeição geométrica**
- **Ausência de defeitos estruturais**
- **Modelo idealizado para estudos teóricos**

Fonte: Rethwisch, Callister Junior e. «Ciência e engenharia de materiais : uma introdução», 2008.

Exemplos de Materiais Cristalinos

- Metais: Cobre, Alumínio
- Semicondutores: Silício, Germânio
- Minerais: Quartzo, Diamante

Fonte: Rethwisch, Callister Junior e. «Ciência e engenharia de materiais : uma introdução», 2008.

3 Arranjo Cristalino

Base e Rede

O arranjo cristalino é composto por:

- 1. Base:** Grupo de átomos que se repetem.
- 2. Rede Cristalina:** Estrutura geométrica abstrata de pontos no espaço.

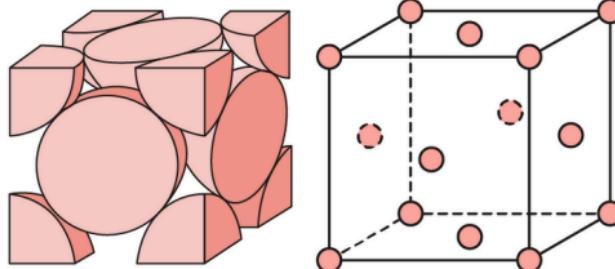
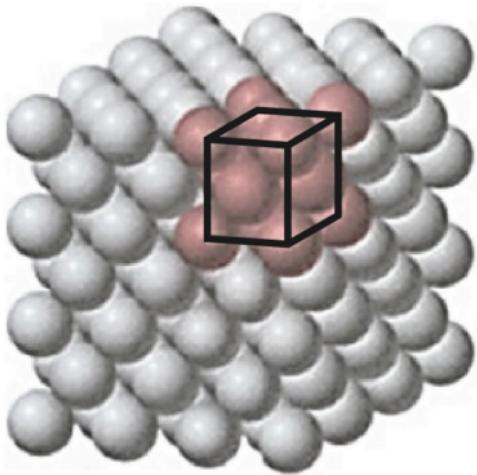
Exemplos de redes:

- Cúbica de corpo centrado (CCC)**
- Cúbica de face centrada (CFC)**
- Cúbica simples (CS)**

Fonte: Rethwisch, Callister Junior e. «Ciência e engenharia de materiais : uma introdução», 2008.

Fonte: Professor!, Explica. «Aula 10 – Estruturas Cristalinas Cúbicas de Face Centrada, Corpo Centrado e Hexagonal Compacta. », 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=dC-tdrhKAAw&list=PL92zIL5bZDE29eyNePossb4kUEJiiCBM9>.

Modelo de esfera rígida e célula unitária



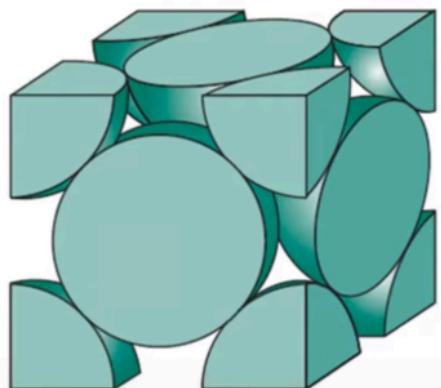
- Rede cristalina: matriz tridimensional de pontos que coincidem com as posições dos átomos (centros das esferas).

Figura 1: Modelo de esfera rígida e célula unitária.

Cubica de Faces Centradas (CFC)

Estrutura Cristalina Cúbica de Faces Centradas (CFC)

- Exemplos: Cobre, Alumínio, Prata e Ouro



Relação parâmetro de rede (a) x raio atômico (R)

$$(4R)^2 = a^2 + a^2$$

$$\frac{16R^2}{2} = a^2$$

$$a = 2R\sqrt{2}$$

$$V = a^3$$

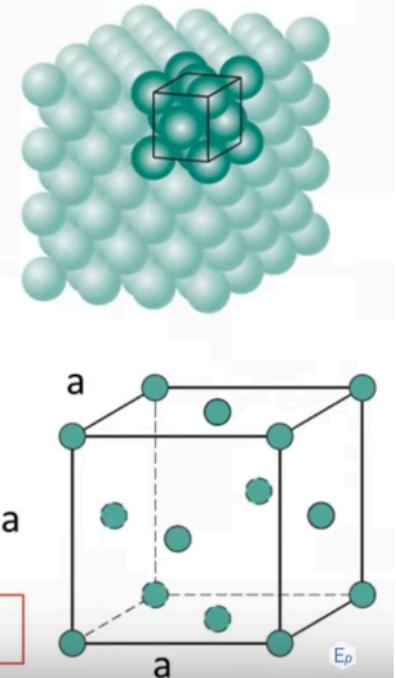


Figura 2: Cálculo de parâmetro de rede CFC.

Cubica de Faces Centradas (CFC) (ii)

Número de átomos na célula unitária

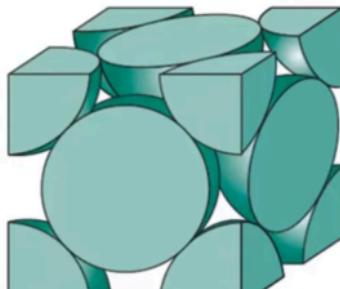
$$N = N_i + \frac{N_f}{2} + \frac{N_c}{8}$$

∅

N_i =Número de átomos no interior

N_f =Número de átomos na face

N_c =Número de átomos no vértice



Fator de Empacotamento Atômico (FEA)

$$FEA = \frac{\text{volume dos átomos em uma célula unitária}}{\text{volume total da célula unitária}}$$

Número de coordenação

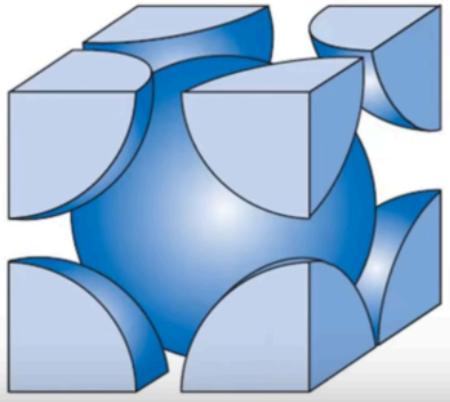
Número de vizinhos mais próximos ou átomos de contato

Figura 3: Cálculo de número de átomos, FEA e número de coordenação.

Cúbica de Corpo Centrado. (CCC)

Estrutura Cristalina Cúbica de Corpo centrado (CCC)

- Exemplos: Cromo, Ferro (a), Molibdênio



Relação parâmetro de rede (a) x raio atômico (R)

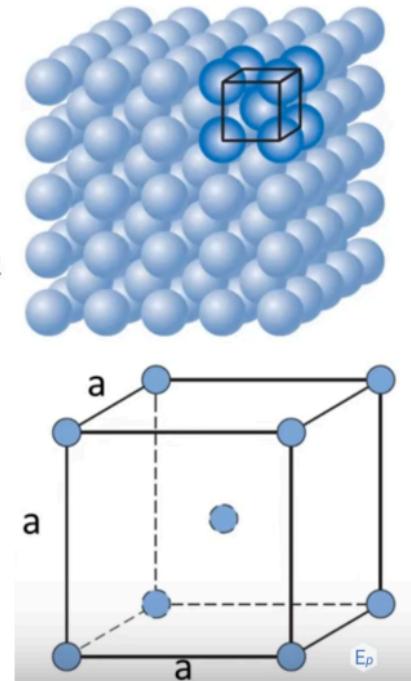
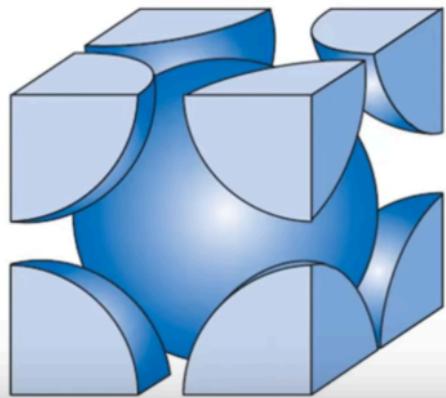


Figura 4: Cálculo de parâmetro de rede CCC.

Cúbica de Corpo Centrado. (CCC) (ii)

Estrutura Cristalina Cúbica de Corpo centrado (CCC)

- Exemplos: Cromo, Ferro (a), Molibdênio



Relação parâmetro de rede (a) x raio atômico (R)

$$(4R)^2 = a^2 + a^2 + a^2$$

$$\frac{16R^2}{3} = a^2$$

$$a = \frac{4\sqrt{3}R}{3}$$

$$V = a^3$$

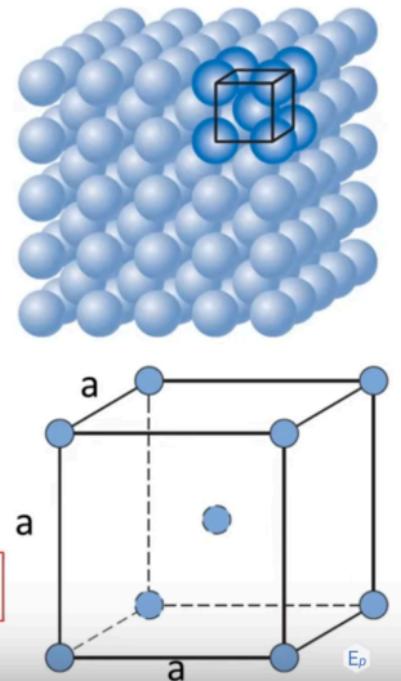
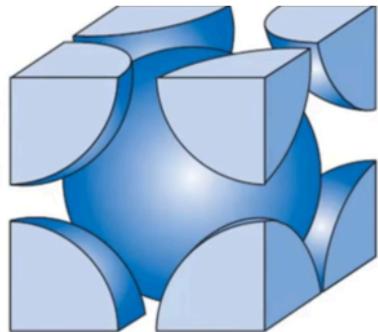


Figura 5: Cálculo de parâmetro de rede CCC.

Cúbica de Corpo Centrado. (CCC) (iii)

CCC



Número de átomos na célula unitária

$$N = 1 + 0 + \frac{8}{8} = 2$$

Número de coordenação

8

FEA

0,68

Body-Centred
Cubic Unit Cell

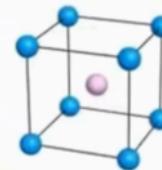
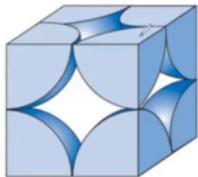


Figura 6: Cálculo de número de átomos, FEA e número de coordenação.

Cúbica Cristalina Simples (CS).

Estrutura Cristalina Cúbica Simples (CS)

Relação parâmetro de rede (a) x raio atômico (R)



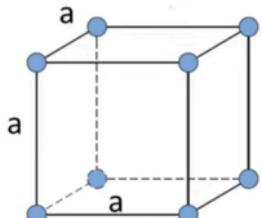
$$a = 2R$$

$$V = a^3$$

Número de coordenação

6

FEA
0,52



CS

$$N = 0 + 0 + \frac{8}{8} = 1$$

Simple Cubic Unit Cell



Figura 7: Cálculo de parâmetro de rede CS.

Cúbica Cristalina Simples (CS). (ii)

Cálculos da Massa Específica

$$\rho = \frac{nA}{V_C N_A}$$

n = Número de átomos associadas a cada célula unitária

A = Peso Atômico

V_C = Volume da célula unitária

N_A = número de Avogadro (6,022 X 10²³)

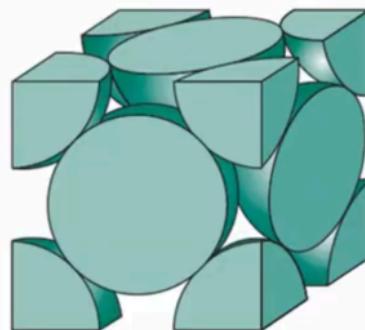


Figura 8: Cálculo da massa específica.

Cúbica Cristalina Simples (CS). (iii)

Exemplo: Calcule a massa específica do cobre, o qual possui raio atômico de 0,128nm, uma estrutura cristalina CFC e um peso atômico de 63,5g/mol.

$$\rho = \frac{nA_{Cu}}{V_C N_A}$$

$$V_C = 16R^3\sqrt{2}$$

$$a = 2\sqrt{2}R$$

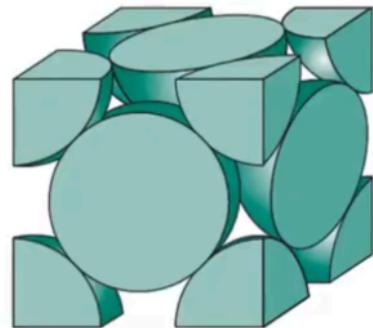


Figura 9: Cálculo da massa específica do cobre.

Cúbica Cristalina Simples (CS). (iv)

Exemplo: Calcule a massa específica do cobre, o qual possui raio atômico de 0,128nm, uma estrutura cristalina CFC e um peso atômico de 63,5g/mol.

$$\rho = \frac{nA_{Cu}}{V_C N_A}$$

$$V_C = 16R^3\sqrt{2}$$

$$a = 2\sqrt{2}R$$

$$\rho = \frac{4 \left[\frac{\text{átomo}}{\text{célula}} \right] \cdot 63,5 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]}{16\sqrt{2}(1,28 \times 10^{-8})^3 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{célula}} \right] \cdot 6,022 \times 10^{23} \left[\frac{\text{átomo}}{\text{mol}} \right]}$$

$$\rho = 8,89 \text{ g/cm}^3$$

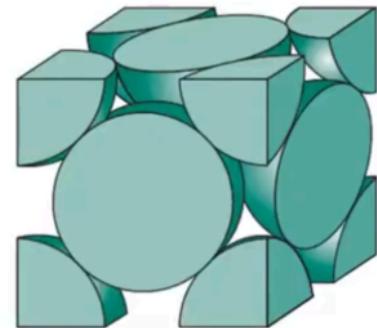


Figura 10: Cálculo da massa específica do cobre.

Propriedades do Arranjo

- Regularidade no espaço tridimensional
- Definem propriedades mecânicas, ópticas e térmicas do material
- Influenciam a densidade do material

Fonte: Rethwisch, Callister Junior e. «Ciência e engenharia de materiais : uma introdução», 2008.

4 Simetrias do Cristal

Grupos Matemáticos de Simetria

Os cristais podem ser classificados com base em sua simetria:

- **Grupos pontuais:** Rotação, reflexão e inversão.
- **Grupos espaciais:** Combinação de translações e simetrias pontuais.

Fonte: Rethwisch, Callister Junior e. «Ciência e engenharia de materiais : uma introdução», 2008.

Propriedades Associadas à Simetria

- 1. Anisotropia:** Propriedades variam com a direção.
- 2. Piezoelectricidade:** Geração de carga elétrica por deformação.
- 3. Ferroelectricidade:** Polarização espontânea reversível.

O conhecimento das simetrias ajuda a prever propriedades físicas e químicas dos cristais.

Fonte: Rethwisch, Callister Junior e. «Ciência e engenharia de materiais : uma introdução», 2008.

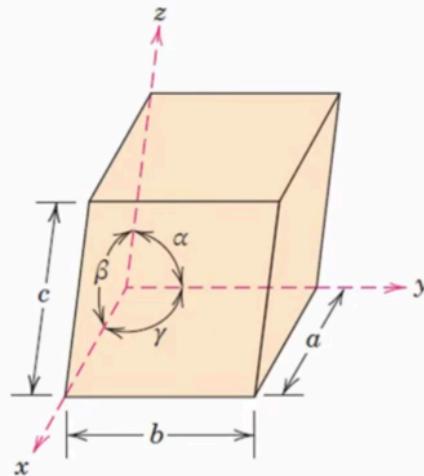
Fonte: Professor!, Explica. «Aula 12 – Sistemas Cristalinos e Pontos Cristalográficos», 2020. https://www.youtube.com/watch?v=wo8K2vLXr3I&list=PL92zIL5bZDE3DXmMW_DCkcdyOp26vUIjg&index=13.

Fonte: Mould, Steve. «Piezoelectricity - why hitting crystals makes electricity», 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=wcJXA8IqYl8>.

Pontos Cristalográficos

Parâmetros da rede cristalina:

- ❑ A geometria da célula unitária é completamente definida em termos de seis parâmetros:
 - ❑ Os comprimentos das três arestas, a , b , c .
 - ❑ Três ângulos entre os eixos, α , β , γ .



Pontos Cristalográficos (ii)

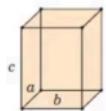
Sistemas cristalinos:

Qual a diferença entre estrutura e sistema cristalino?

Orthorhombic

$$a \neq b \neq c$$

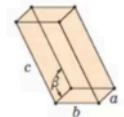
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Monoclinic

$$a \neq b \neq c$$

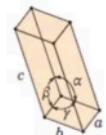
$$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$$

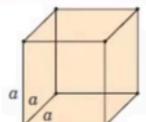
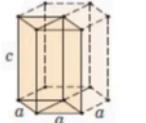
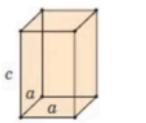
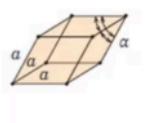


Triclinic

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$



Crystal System	Axial Relationships	Interaxial Angles	Unit Cell Geometry
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Rhombohedral (Trigonal)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	

Pontos Cristalográficos (iii)

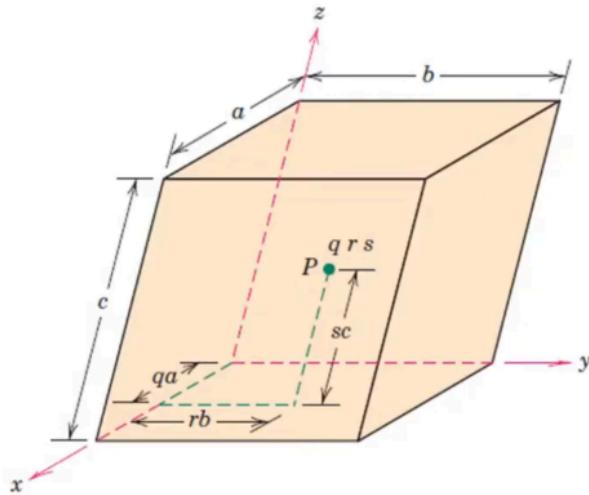
Pontos Cristalográficos:

- Coordenadas
 - Utiliza-se múltiplos fracionários

$$P_x = qa$$

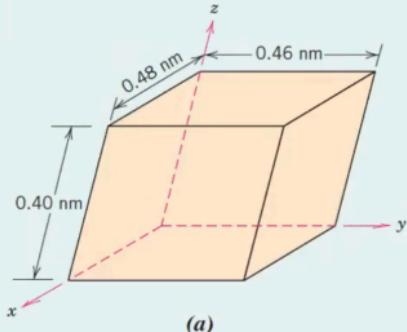
$$P_y = rb$$

$$P_z = sc$$

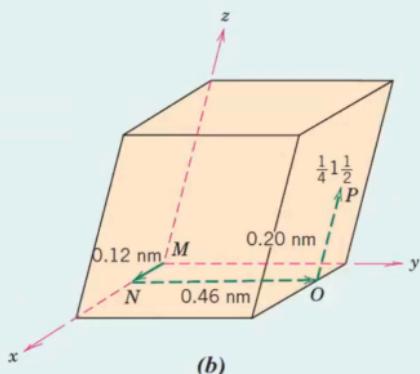


Pontos Cristalográficos (iv)

Exemplo: Para a célula unitária mostrada em (a) localize o ponto com coordenadas $\frac{1}{4} \ 1 \ \frac{1}{2}$.

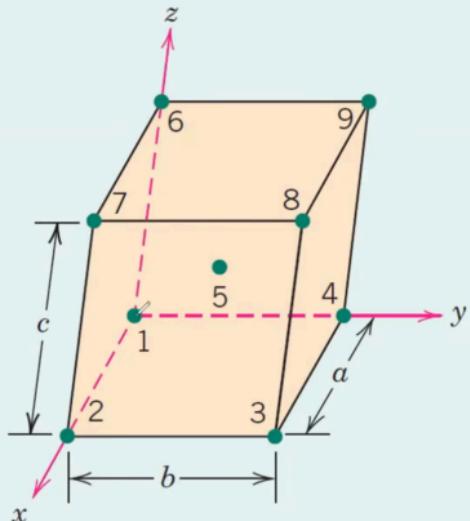


$$\begin{aligned}q &= \frac{1}{4}, r = 1, s = \frac{1}{2}. \\P_x &= qa \\&= \left(\frac{1}{4}\right)a = \frac{1}{4}(0.48 \text{ nm}) = 0.12 \text{ nm} \\P_y &= rb \\&= (1)b = 1(0.46 \text{ nm}) = 0.46 \text{ nm} \\P_z &= sc \\&= \left(\frac{1}{2}\right)c = \frac{1}{2}(0.40 \text{ nm}) = 0.20 \text{ nm}\end{aligned}$$



Pontos Cristalográficos (v)

Exemplo: Especifique os índices das coordenadas para todos os pontos numerados da célula unitária na ilustração a seguir



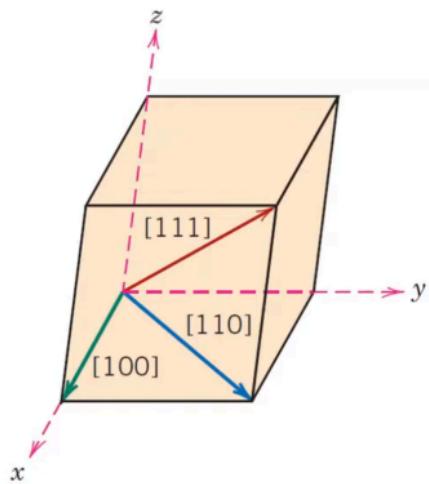
$$\begin{aligned}P_x &= qa \\P_y &= rb \\P_z &= sc\end{aligned}$$

Point Number	q	r	s
1	0	0	0
2	1	0	0
3	1	1	0
4	0	1	0
5	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
6	0	0	1
7	1	0	1
8	1	1	1
9	0	1	1

Direções Cristalográficas.

Direção cristalográfica:

- I. Criar um sistema de coordenadas x-y-z no vértice da célula unitária
- II. Determinar as coordenadas de dois pontos que estão sobre o mesmo vetor direção. $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$
- III. As coordenadas do ponto inicial são subtraídas do ponto final ->
 $x_2-x_1, y_2-y_1, z_2-z_1$
- IV. As diferenças são então normalizadas por seus respectivos parâmetros de rede a, b, c .



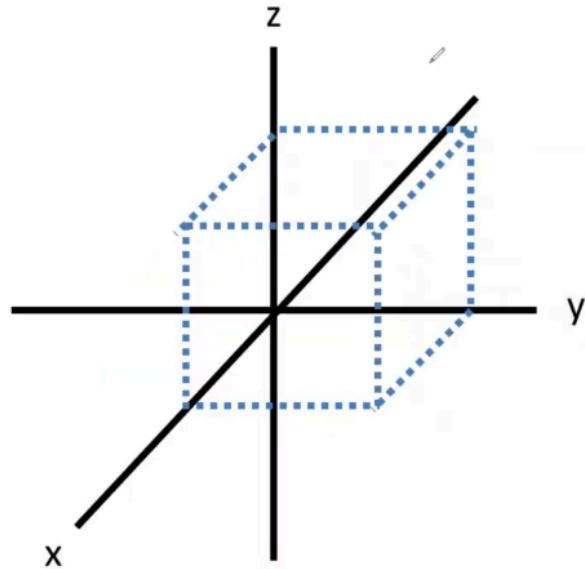
$$\frac{x_2 - x_1}{a}$$

$$\frac{y_2 - y_1}{b}$$

$$\frac{z_2 - z_1}{c}$$

Direções Cristalográficas. (ii)

Famílias:



[100] [−100] [010] [0−10] [001] [00−1]

$\langle 100 \rangle$

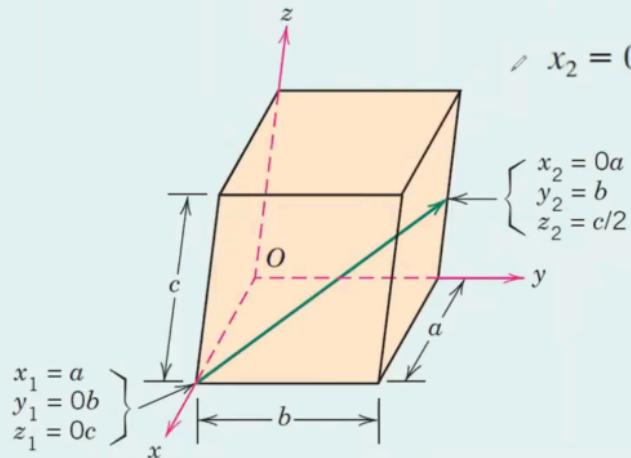
[−1−10] [1−10] [01−1] [011] [−101] [−101]

[110] [−110] [011] [0−11] [101] [10−1]

$\langle 100 \rangle$

Direções Cristalográficas. (iii)

Exemplo 1: Determine os índices para a direção mostrada na figura:



$$x_1 = a \quad y_1 = 0b \quad z_1 = 0c$$

$$\nearrow x_2 = 0a \quad y_2 = b \quad z_2 = c/2$$

$$x_2 - x_1 = 0a - a = -a$$

$$y_2 - y_1 = b - 0b = b$$

$$z_2 - z_1 = c/2 - 0c = c/2$$

$$u = n\left(\frac{x_2 - x_1}{a}\right) = 2\left(\frac{-a}{a}\right) = -2$$

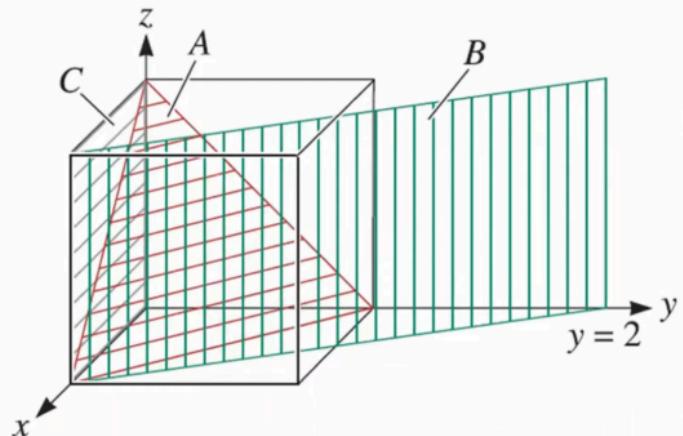
$$v = n\left(\frac{y_2 - y_1}{b}\right) = 2\left(\frac{b}{b}\right) = 2$$

$$w = n\left(\frac{z_2 - z_1}{c}\right) = 2\left(\frac{c/2}{c}\right) = 1$$

[221]

Planos Cristalográficos

Determinação do índice (hkl):



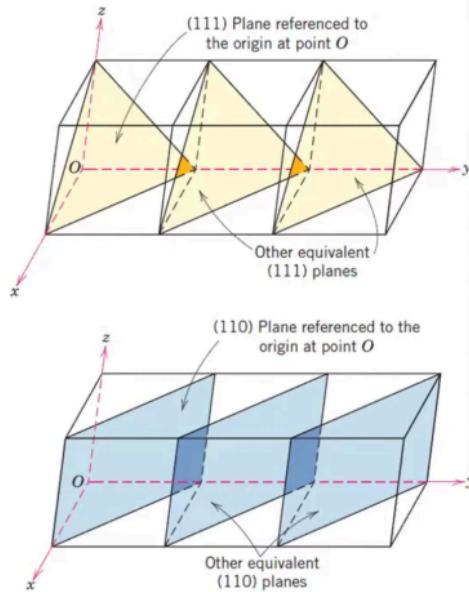
- Os planos são determinados pelos índices de Miller (hkl)
- Determinar os pontos de interseção nos eixos x, y e z, designando-os como A, B e C respectivamente
- Obter os inversos dos valores A, B e C.
- Normalizar os inversos, ou seja, multiplicar por seus respectivos parâmetros de rede a, b e c.

$$\frac{a}{A} \quad \frac{b}{B} \quad \frac{c}{C}$$

- Utilizar o menor valor inteiro para os números

Planos Cristalográficos (ii)

Determinação do índice (hkl):



- Os índices inteiros então são separados, sem vírgulas e colocados entre parênteses:
(hkl)
- Os números inteiros hkl correspondem aos inversos normalizados das interseções

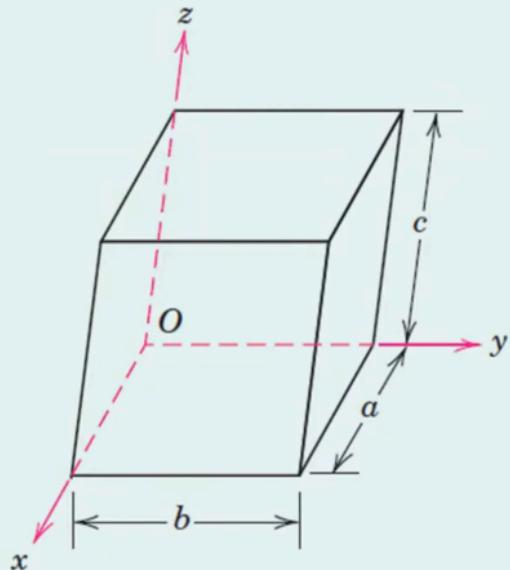
$$h = \frac{na}{A}$$

$$k = \frac{nb}{B}$$

$$l = \frac{nc}{C}$$

Planos Cristalográficos (iii)

Construa um plano (101) dentro da célula unitária.



$$h = 1$$

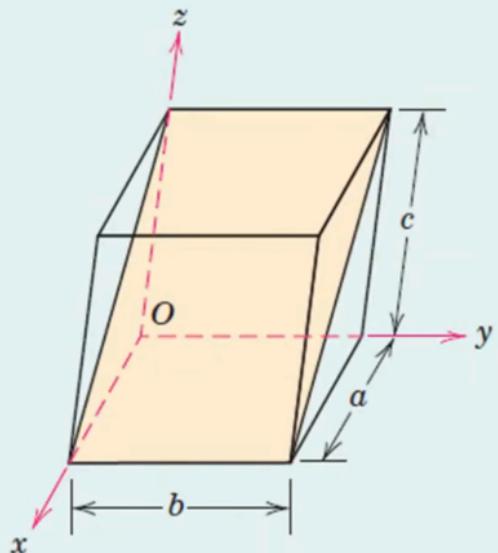
$$k = 0$$

$$l = 1$$

$$A = \frac{na}{h} = \frac{(1)(a)}{1} = a$$

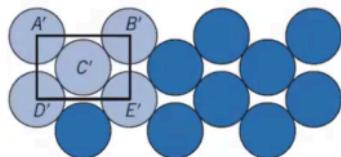
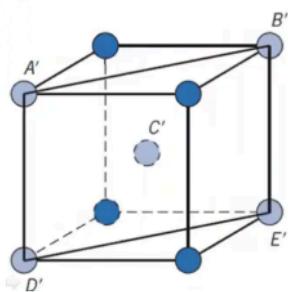
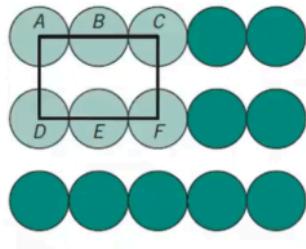
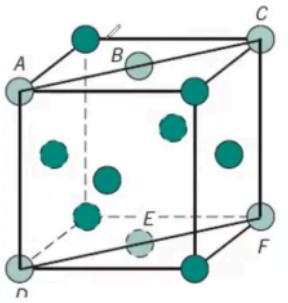
$$B = \frac{nb}{k} = \frac{(1)(b)}{0} = \infty b$$

$$C = \frac{nc}{l} = \frac{(1)(c)}{1} = c$$



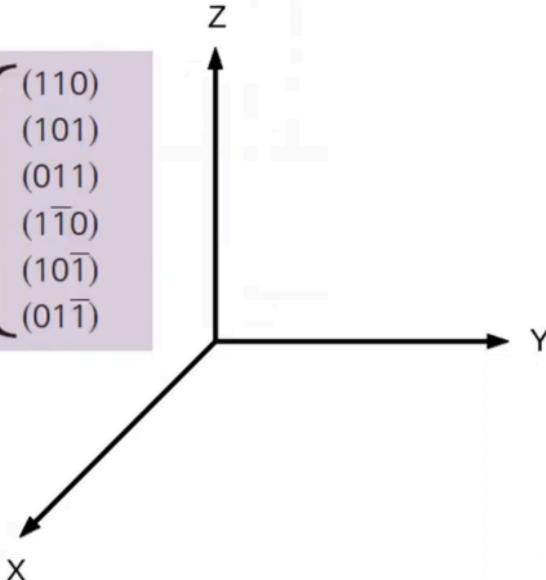
Planos Cristalográficos (iv)

Arranjos Atômicos



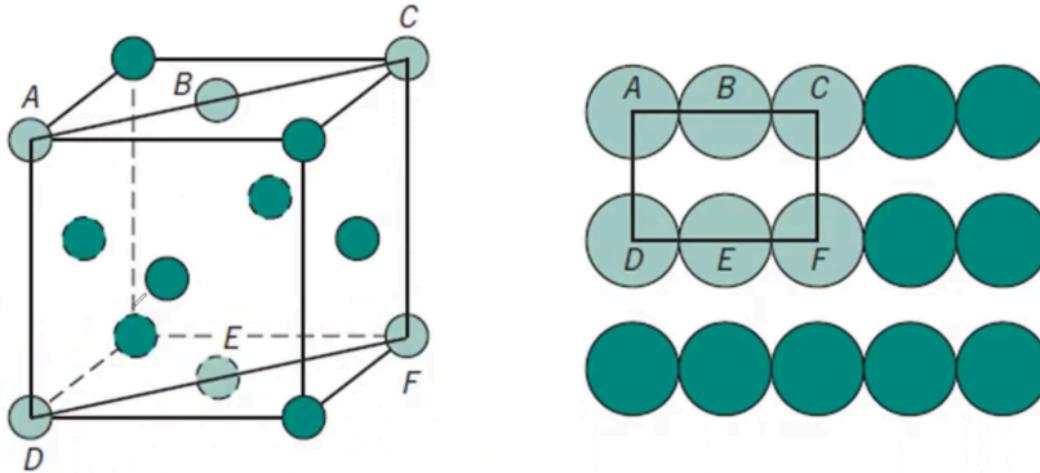
Família de planos

$$\{110\} = \left\{ \begin{array}{l} (110) \\ (101) \\ (011) \\ (1\bar{1}0) \\ (10\bar{1}) \\ (01\bar{1}) \end{array} \right\}$$



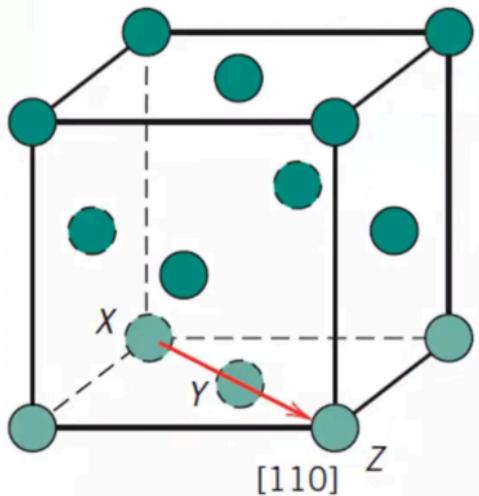
Densidade Linear e Planar

Direções/Planos equivalentes x Densidade Linear e Planar



Densidade Linear e Planar (ii)

Densidade Linear



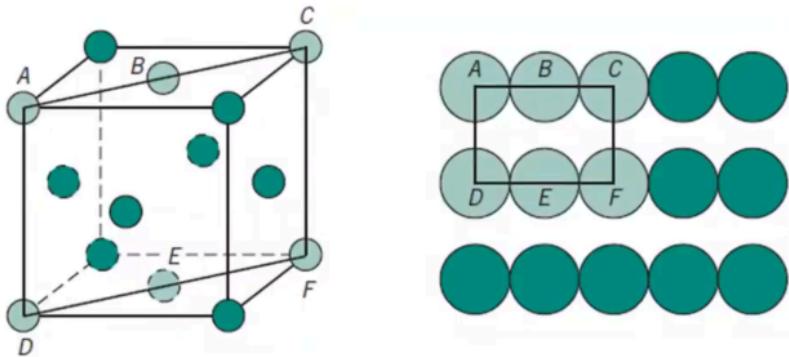
$$\text{Densidade Linear} = \frac{\text{nº de átomos centrados sobre o vetor direção}}{\text{comprimento do vetor direção}}$$

$$DL_{110} = \frac{2\text{átomos}}{4R} = \frac{1}{2R}$$

Densidade Linear e Planar (iii)

Densidade Planar

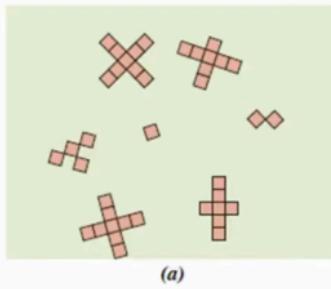
$$\text{Densidade Planar} = \frac{\text{nº de átomos centrados sobre um plano}}{\text{Área do Plano}}$$



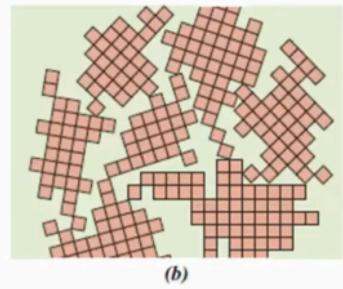
$$DP_{110} = \frac{\text{Átomas}}{8R^2\sqrt{2}} = \frac{1}{4R^2\sqrt{2}}$$

Policristais

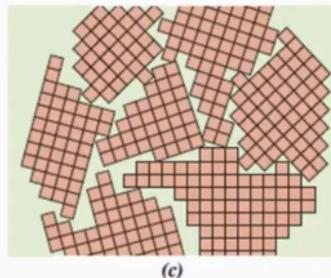
- ❑ A maioria dos sólidos cristalinos é composta de um conjunto de muitos cristais pequenos ou grãos, que são chamados de policristalinos.
- ❑ Inicialmente pequenos cristais ou **núcleos** se formar em várias posições. Esses cristais possuem orientações cristalográficas **aleatórias**.
- ❑ Os pequenos grãos crescem pela adição sucessiva de átomos à sua estrutura. As extremidades de grãos adjacentes são forçadas umas contra as outras, devido ao desajuste da orientação cristalográfica formam-se **contornos de grão**.



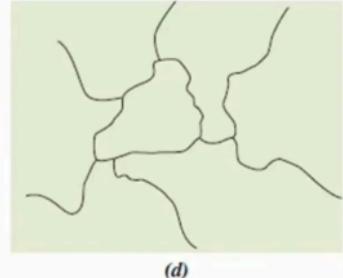
(a)



(b)



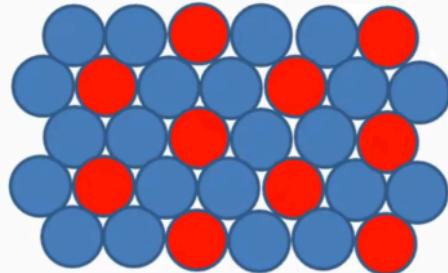
(c)



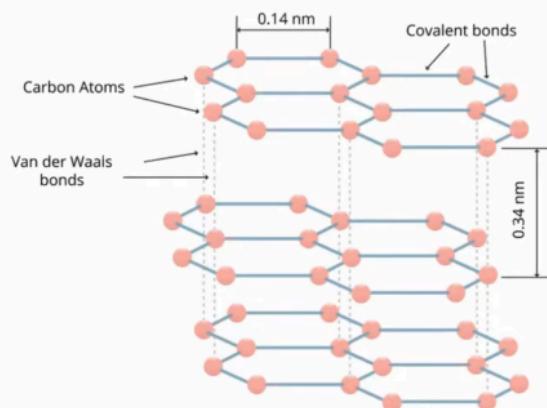
(d)

Policristais (ii)

- As propriedades físicas dos monocrystalos de algumas substâncias dependem da direção cristalográfica na qual as medições são feitas.
- Essa **direcionalidade** das propriedades é denominada **anisotropia**.
- Substâncias nas quais as propriedades medidas são independentes da direção da medição são **isotrópicas**.

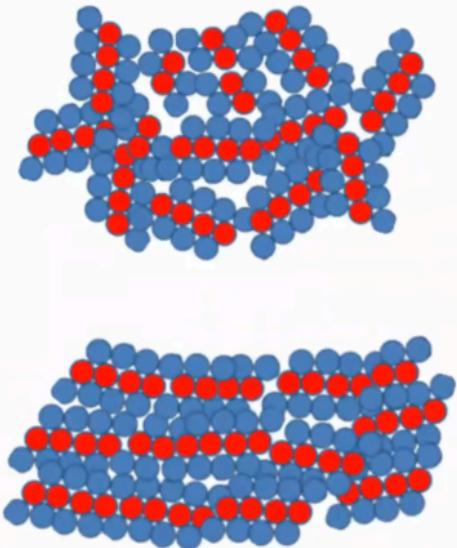
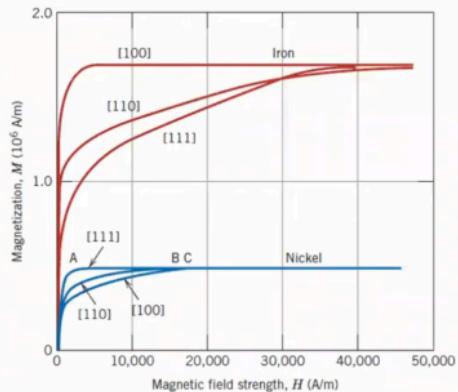
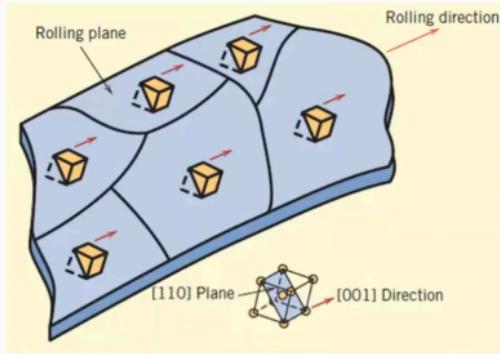


Metal	Modulus of Elasticity (GPa)		
	[100]	[110]	[111]
Aluminum	63.7	72.6	76.1
Copper	66.7	130.3	191.1
Iron	125.0	210.5	272.7
Tungsten	384.6	384.6	384.6

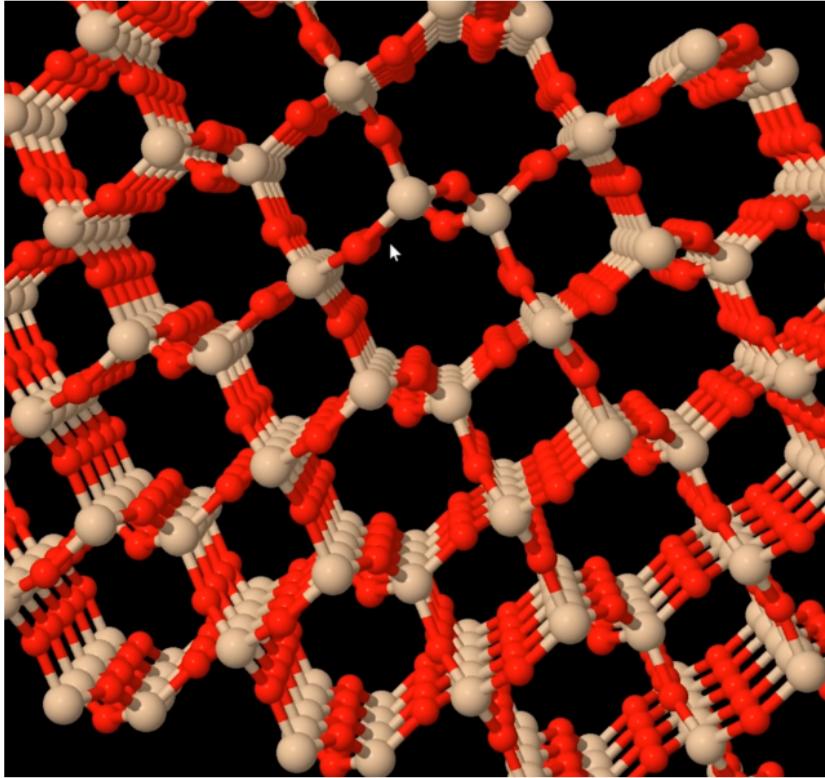


Policristais (iii)

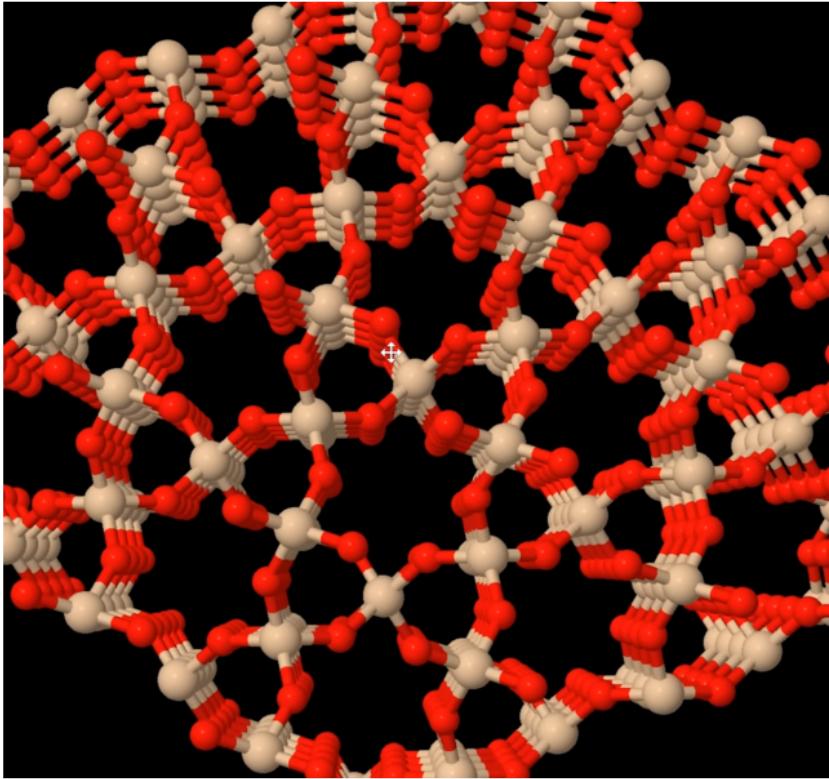
- Um grão pode ser anisotrópico enquanto o material macroscopicamente falando pode ser anisotrópico.
- Alguns materiais podem ter uma orientação cristalográfica preferencial, para esses dizemos que o material possui uma **textura**.



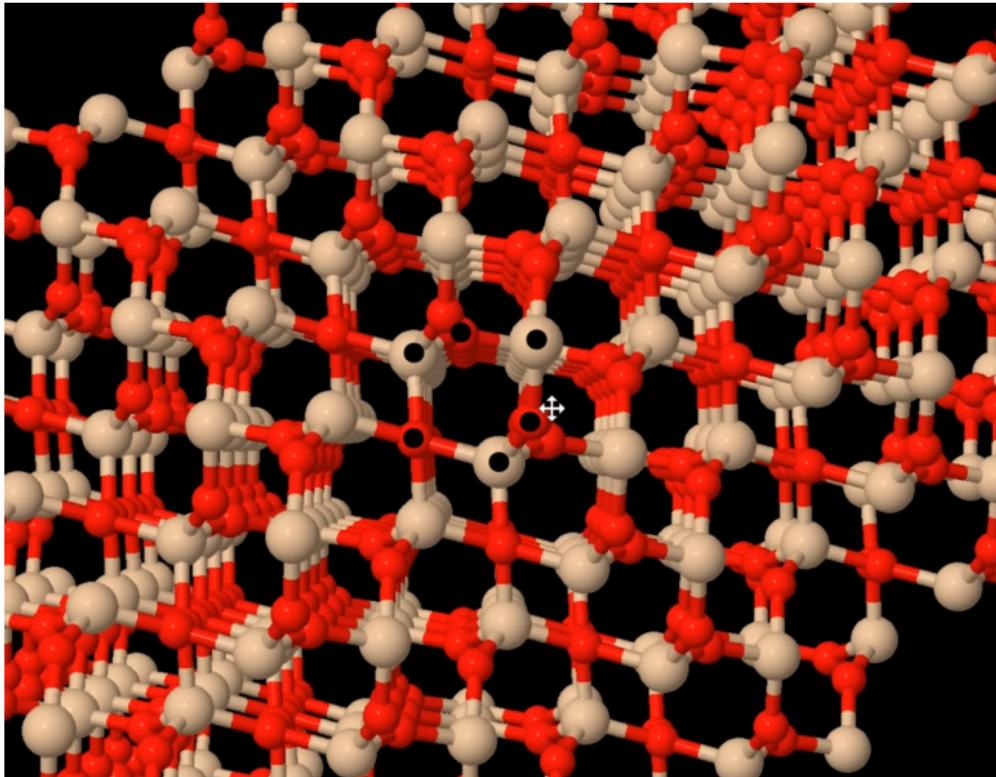
Piezoelectricidade



Piezoelectricidade (ii)



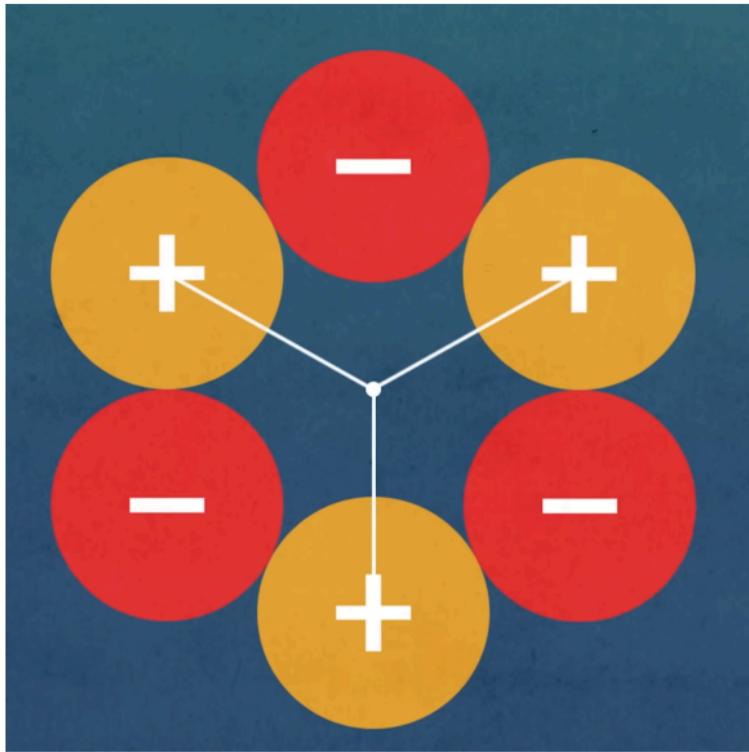
Piezoelectricidade (iii)



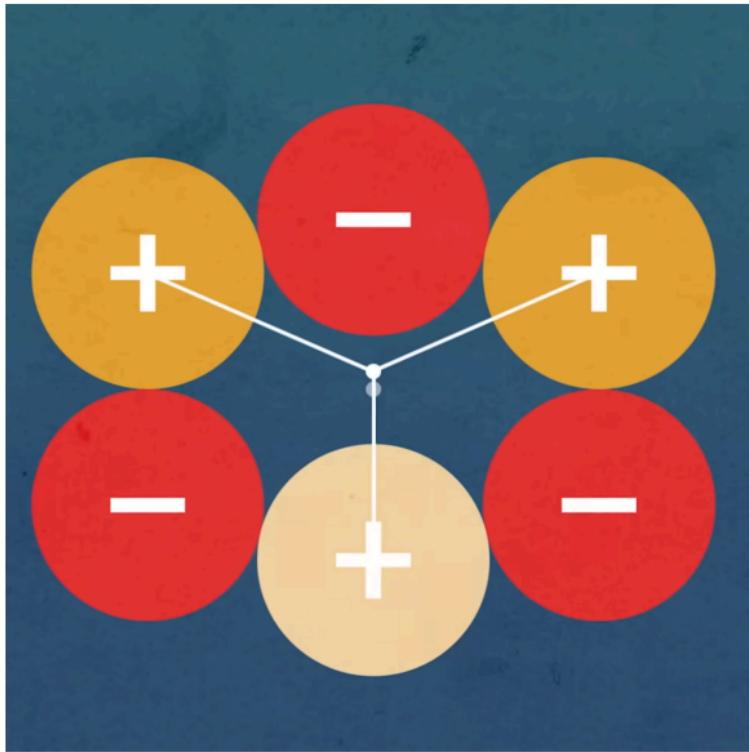
Piezoelectricidade (iv)



Piezoelectricidade (v)



Piezoelectricidade (vi)



Piezoelectricidade (vii)



5 Manufatura

Criando Um Cristal de Sal

Neste experimento, busca-se recriar cristais de sal utilizando princípios aprendidos, com materiais facilmente encontrados em casa. O objetivo é demonstrar como fatores como temperatura, concentração e tempo influenciam a cristalização, permitindo uma compreensão prática do processo de formação de cristais.

Fonte: Chase. «How to Grow Big Table Salt or Sodium Chloride Crystals at Home», 2021. <https://crystalverse.com/sodium-chloride-crystals/>.

Criando Um Cristal de Sal (ii)

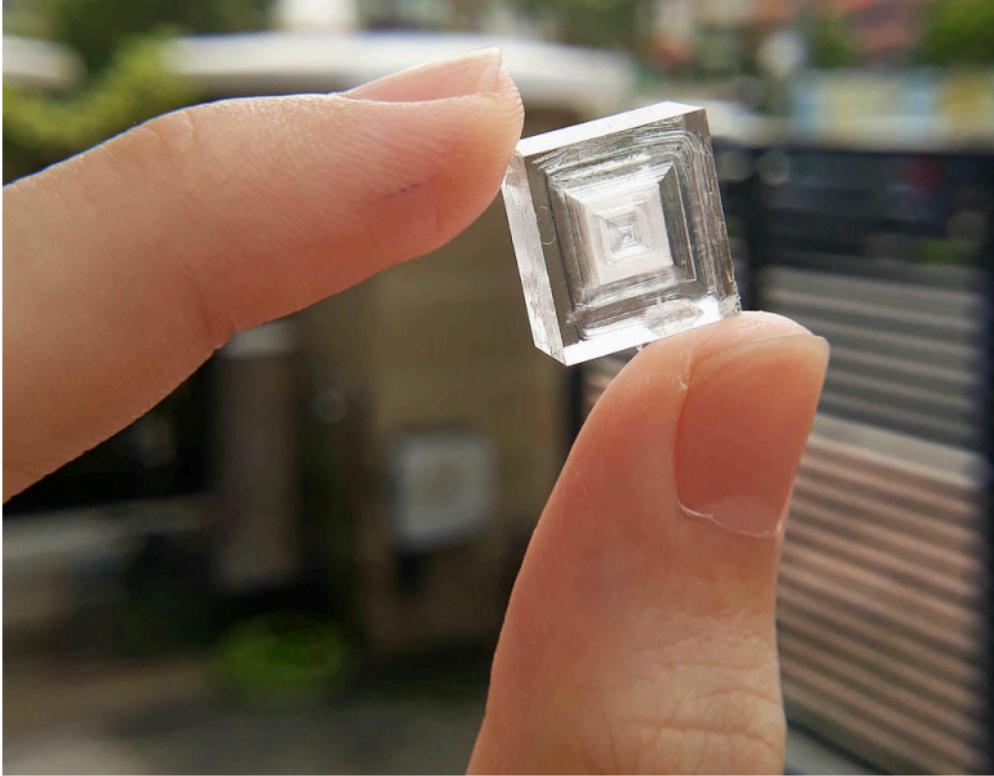


Figura 36: Cristal de cloreto de sódio.

Criando Um Cristal de Sal (iii)



Figura 37: Criando a solução.

Criando Um Cristal de Sal (iv)

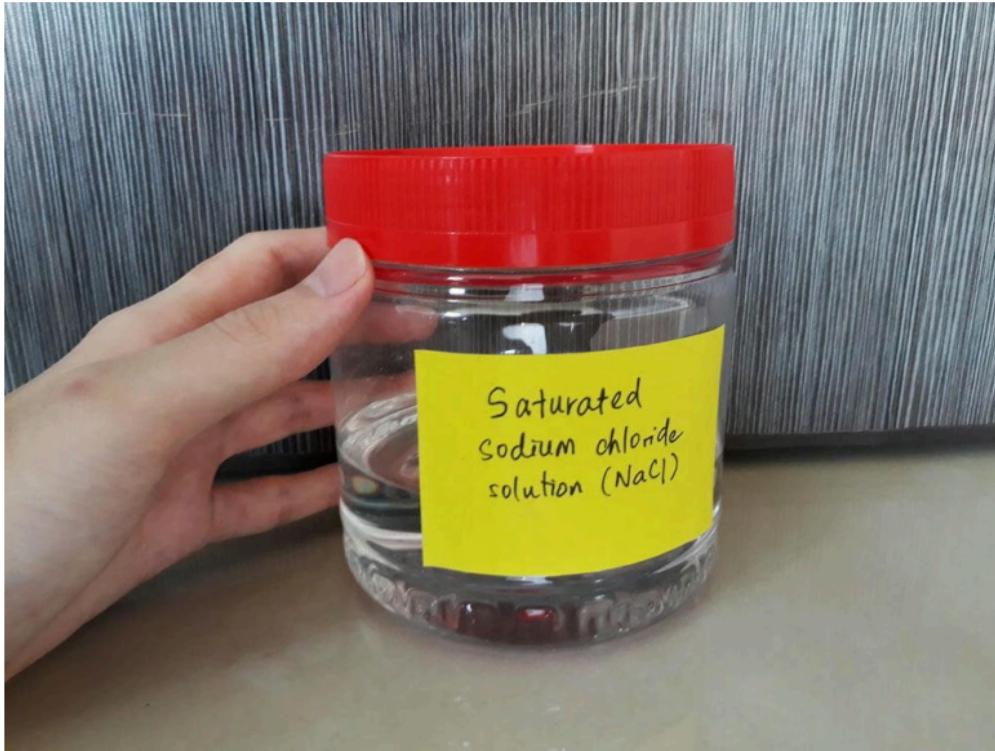


Figura 38: Solução criada.

Criando Um Cristal de Sal (v)



Figura 39: Gerando uma semente.

Criando Um Cristal de Sal (vi)

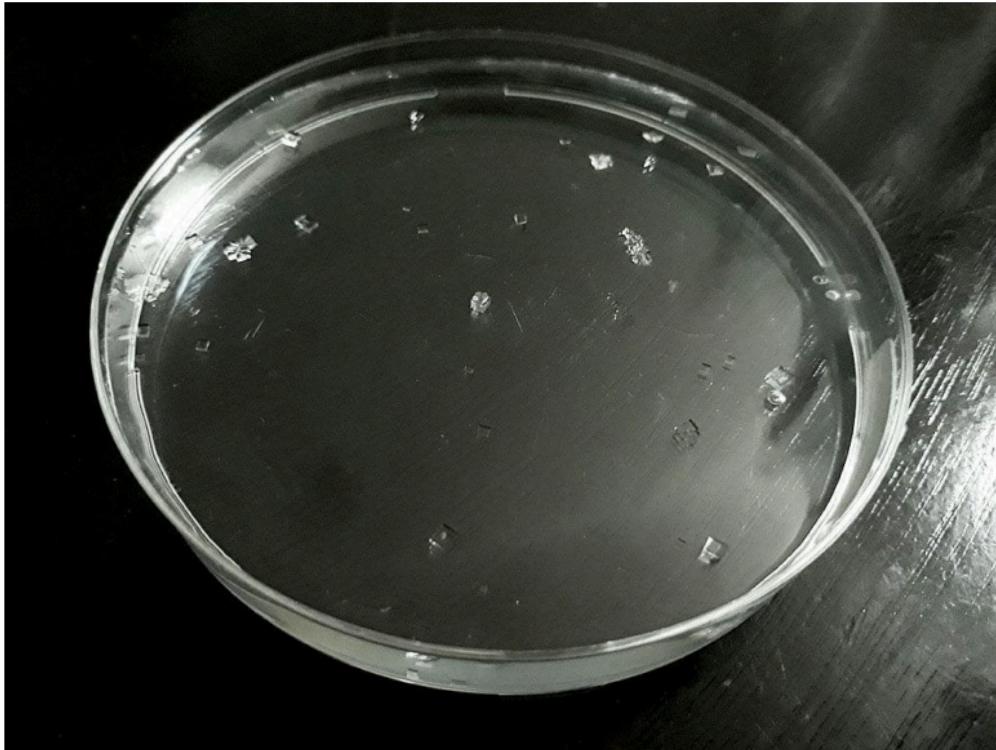


Figura 40: Sementes formadas.

Criando Um Cristal de Sal (vii)



Figura 41: Gerando cristais a partir das sementes.

Criando Um Cristal de Sal (viii)



Figura 42: Cristais formados.

6 Normas

ISO 9001:2015

- ISO 9001:2015 (Gestão da Qualidade)

Um padrão internacional que define requisitos para a implementação de um sistema de gestão da qualidade eficaz. Ele é usado para garantir consistência, melhorar processos e aumentar a satisfação do cliente em organizações de diversos setores.

Fonte: ISO. «Quality management systems – Requirements», 2015.

ASTM E1941-18

- ASTM E1941-18 (Guias para Materiais Cristalinos)

Um guia técnico publicado pela ASTM que aborda práticas e métodos padronizados para a caracterização de materiais cristalinos. Inclui recomendações para medições, análises e validação de propriedades cristalográficas.

Fonte: Standards, ASTM. «Standard Test Method for Determination of Carbon in Refractory and Reactive Metals and Their Alloys by Combustion Analysis», 2016.

ISO 17274:2016

- ISO 17274:2016 (Determinando a Estrutura Cristalina)

Especifica métodos para determinar a estrutura cristalina de materiais utilizando técnicas como difração de raios X. É aplicado na análise de materiais para fins de pesquisa e controle de qualidade.

Fonte: ISO. « Water quality – Application of inductively coupled plasma mass spectrometry», 2016.

7 Aplicações

Marcapasso

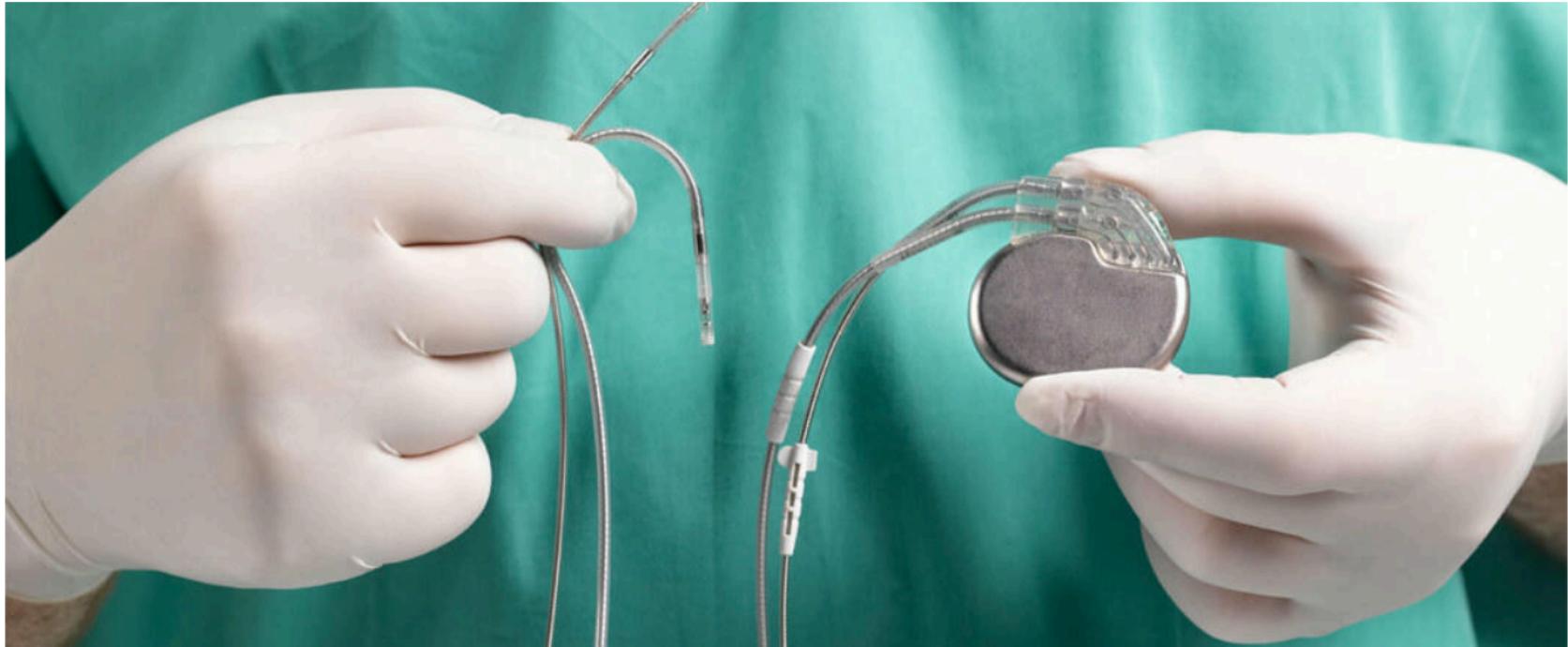


Figura 43: Utiliza-se a propriedade da piezoelectricidade na manufatura de marcapassos.

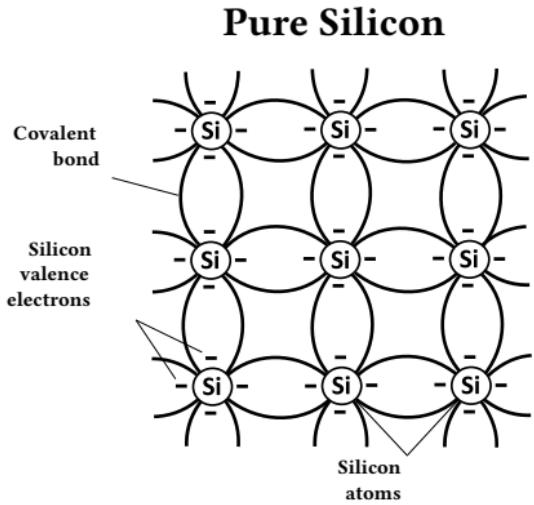
Lasers



Figura 44: Láseres são outro exemplo que utilizam propriedades de cristais para serem fabricados.

Semicondutores

Intrinsic (Undoped)



Extrinsic (Doped)

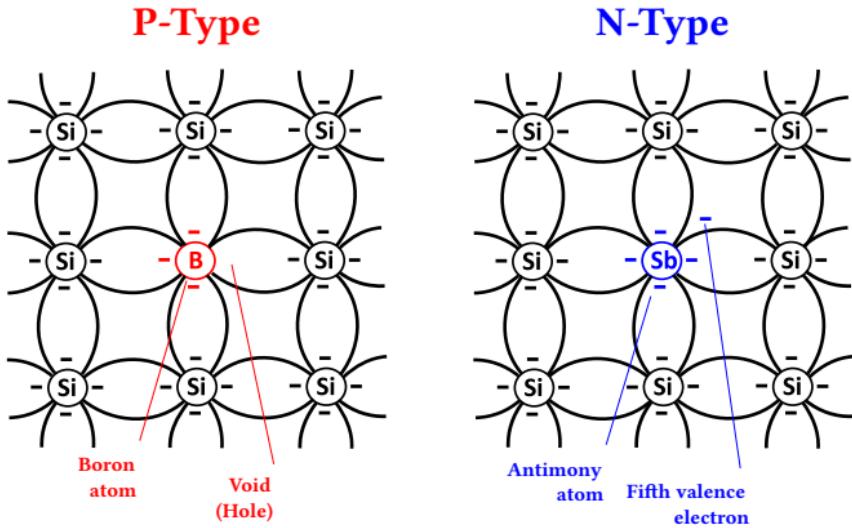


Figura 45: Exemplo de dopagem de semicondutores.

8 Bibliografia

Fontes

- [1] J. Kepler, «The Six-Cornered Snowflake», 1611.
- [2] R. Descartes, «Observations on the Amsterdam Snowfalls», 1634.
- [3] R. Hooke, «Micrographia: Or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glass with observations and inquiries thereupon», 1665.
- [4] U. Nakaya, «Snow Crystals: Natural and Artificial», 1954.
- [5] C. J. e Rethwisch, «Ciência e engenharia de materiais : uma introdução», 2008.
- [6] E. Professor!, «Aula 10 – Estruturas Cristalinas Cúbicas de Face Centrada, Corpo Centrado e Hexagonal Compacta. », 2020, [Online]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=dC-tdrhKAAw&list=PL92zIL5bZDE29eyNePossb4kUEJiiCBM9>
- [7] E. Professor!, «Aula 12 – Sistemas Cristalinos e Pontos Cristalográficos», 2020, [Online]. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=wo8K2vLXr3I&list=PL92zIL5bZDE3DXmMW_DCkcdyOp26vUIjg&index=13

Fontes (ii)

- [8] S. Mould, «Piezoelectricity - why hitting crystals makes electricity», 2019, [Online]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=wcJXA8IqYl8>
- [9] Chase, «How to Grow Big Table Salt or Sodium Chloride Crystals at Home», 2021, [Online]. Disponível em: <https://crystalverse.com/sodium-chloride-crystals/>
- [10] ISO, «Quality management systems – Requirements», 2015.
- [11] A. Standards, «Standard Test Method for Determination of Carbon in Refractory and Reactive Metals and Their Alloys by Combustion Analysis», 2016.
- [12] ISO, « Water quality – Application of inductively coupled plasma mass spectrometry», 2016.