



Universidade Federal do ABC

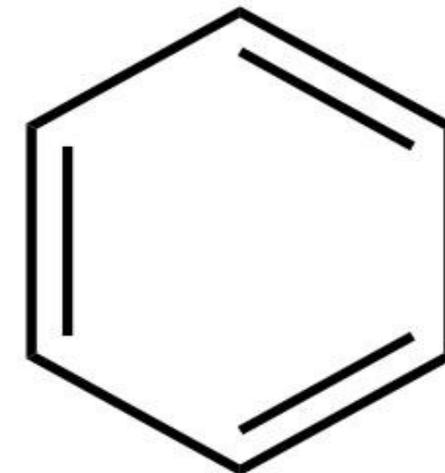
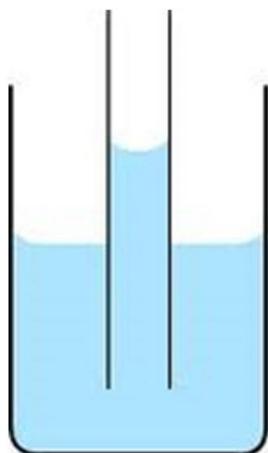
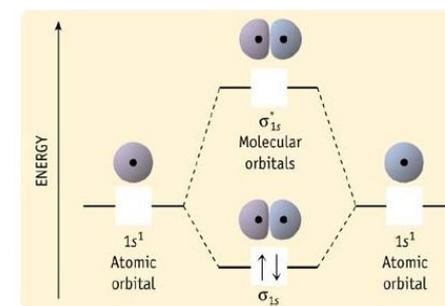
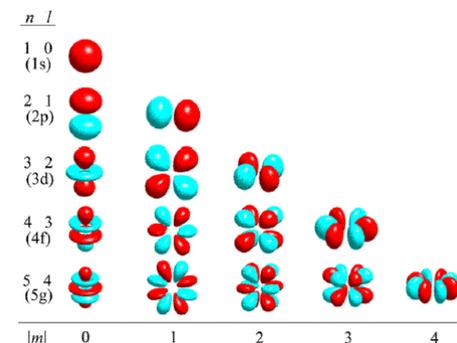
Interações Atômicas e Moleculares

11. Sólidos: Demais Propriedades

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/IAM.html>



As Cores dos Sólidos

As cores dos sólidos são determinadas pelo balanço entre a luz absorvida, a luz não-absorvida (espelhada) e a luz re-emitida, quando luz (branca) incide neles.

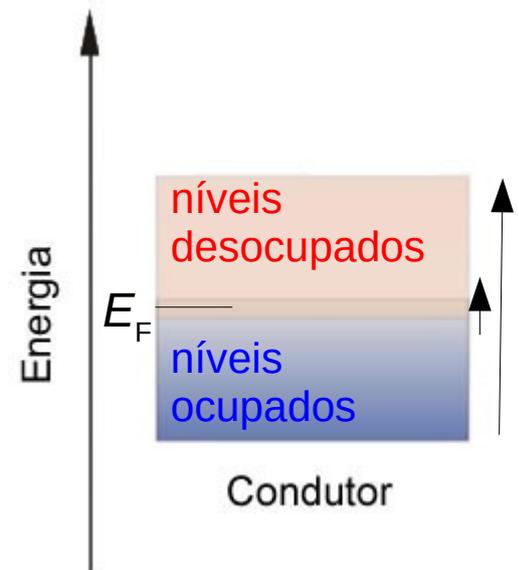
A estrutura de bandas de energia do material determina a cor.

As Cores dos Sólidos

Em **metais**, maior parte da **energia absorvida** é **re-emitida** como **fótons**.

Fótons podem ser **absorvidos** e **re-emitidos** no **espectro inteiro**, do rádio até o UV (eles são transparentes em raios X e γ).

A **cor** depende dos **detalhes** da **estrutura** de bandas.



As Cores dos Sólidos

Exemplos

Em prata, a luz é re-emitida no espectro inteiro (óptico e além).



=> A cor de prata é meio “branca”.

Em cobre, mais luz é re-emitida em frequências baixas (amarelo, laranja, vermelho), do que em frequências altas (violeta, azul, verde).



=> cobre é vermelho

Argumentos similares explicam as cores de outros metais.

As Cores dos Sólidos

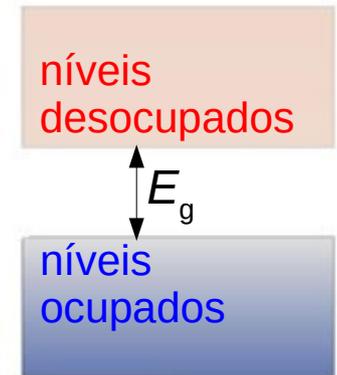
Em **semicondutores/isolantes**, a energia de elétrons excitados é mais frequentemente emitida como **calor**, a e luz pode ser **absorvida** só **a partir** de certa **frequência** $\nu_{\min} = E_g/h$.

Luz com **frequência** **baixo** deste valor é **espeelhada** e constitui a **cor** do semicondutor.

Ex. Sulfídio de Cadmium (CdS), $E_g = 2.4 \text{ eV}$
 $\Rightarrow \nu_{\min} = 5.8 \cdot 10^{14} \cdot \text{Hz}$ ou $\lambda_{\max} = 517 \text{ nm}$ (verde).

Luz verde, azul e violeta é absorvida.

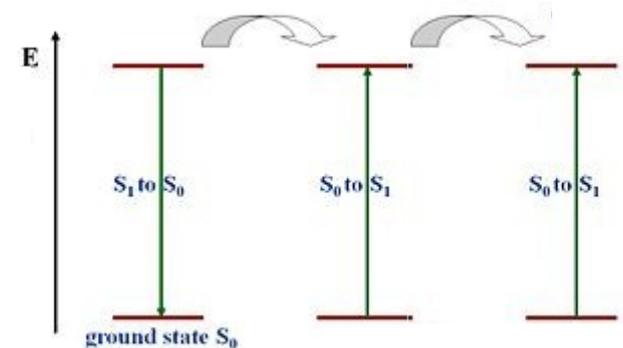
Luz amarela, laranja e vermelho não é absorvida \Rightarrow CdS aparece amarelo-laranja.



Transporte de Energia em Sólidos

Considere um sistema de moléculas (átomos) idênticas acopladas.

Se uma das moléculas está num nível excitado, a energia liberada quando ela cai para o estado fundamental é exatamente a energia necessária para excitar uma molécula vizinha.



=> A excitação “pula” da molécula pra vizinha e de lá pra próxima.

=> A excitação se propaga como uma partícula.

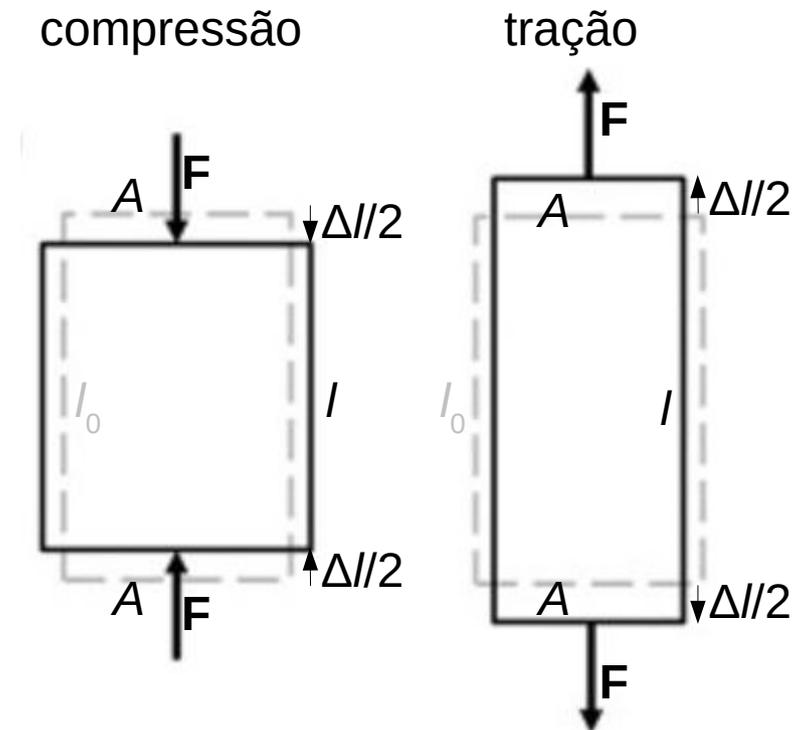
Uma pseudo-partícula destes se chama exciton.

Quanto mais forte é o acoplamento entre as moléculas num material, tanto mais rapidamente se propagam os excitons.

Propriedades Mecânicas dos Sólidos

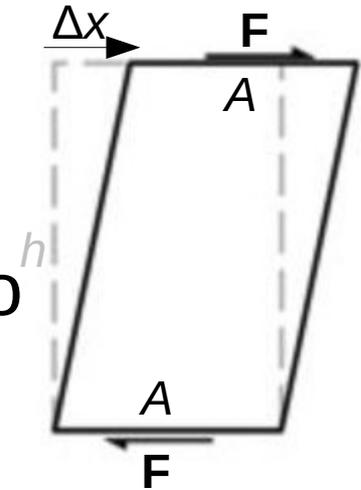
Para uma **força** F tentando **deformar** um **corpo rígido**, definimos como **tensão** a **força** por unidade de **área** de **aplicação** da força, F/A ; unidade: N/m^2 , e como **deformação**, a **variação fracional** da grandeza sendo alterada (um comprimento ou volume).

- Se as forças estão agindo em **um eixo**, a tensão, F/A , é chamada **uniaxial**, e a deformação, Δ/l_0 , **compressão** ou **tração**.



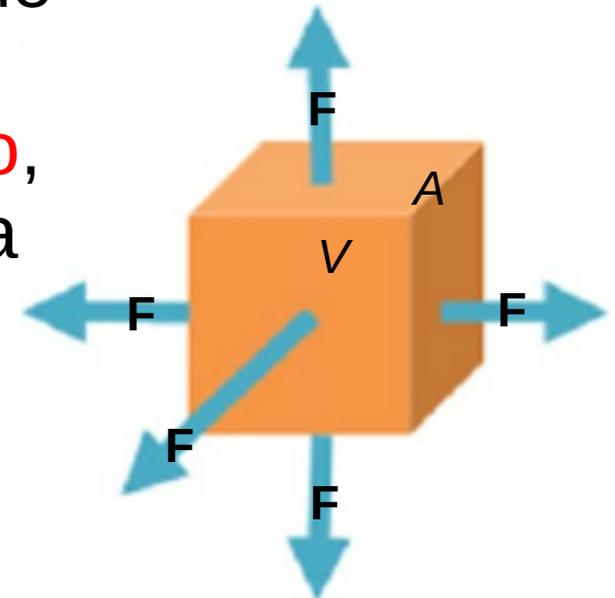
Propriedades Mecânicas dos Sólidos

- Se as forças são **perpendiculares** ao eixo que liga os pontos de aplicação da força, F/A é a **tensão de cisalhamento**, ou tensão cisalhante, e a deformação, $\Delta x/h$, é o próprio **cisalhamento**



- Se as forças agem de **todos os lados** do corpo com **intensidade igual**, $F/A = P$ é chamado **tensão hidrostática** ou **pressão**, e a **deformação** $\Delta V/V$ também se chama **hidrostática**.

(volume de corpo V , variação do volume ΔV , área de superfície A)

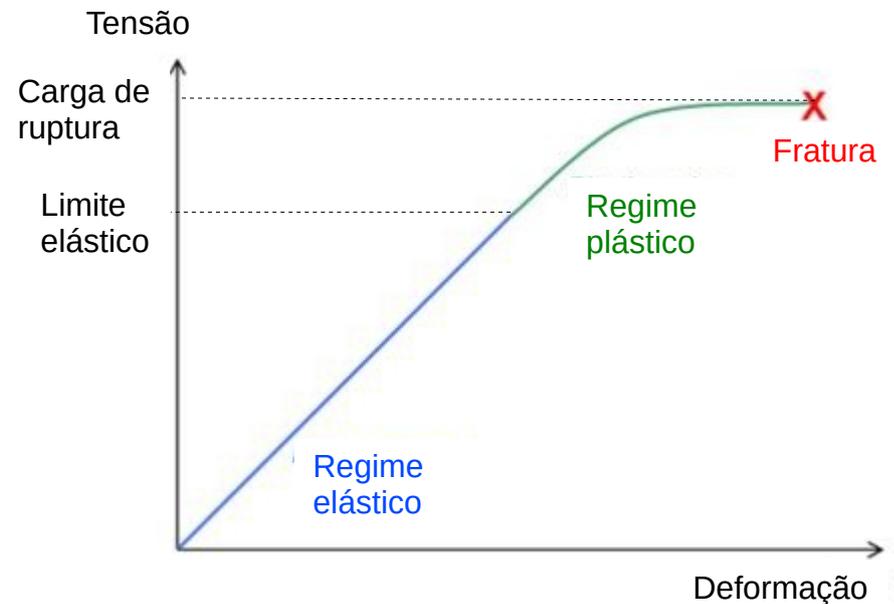


Propriedades Mecânicas dos Sólidos

Para **tensões fracas**, a **deformação é proporcional à tensão e reversível** (ela se desfaz quando a tensão é removida)
=> **deformação elástica**

A partir de um certo limite, o **limite elástico**, a deformação cresce **mais rapidamente** com a tensão, e **não é mais reversível**
=> **deformação plástica**

Chegando a um segundo limite, a **carga de ruptura**, o corpo **“quebra”**.



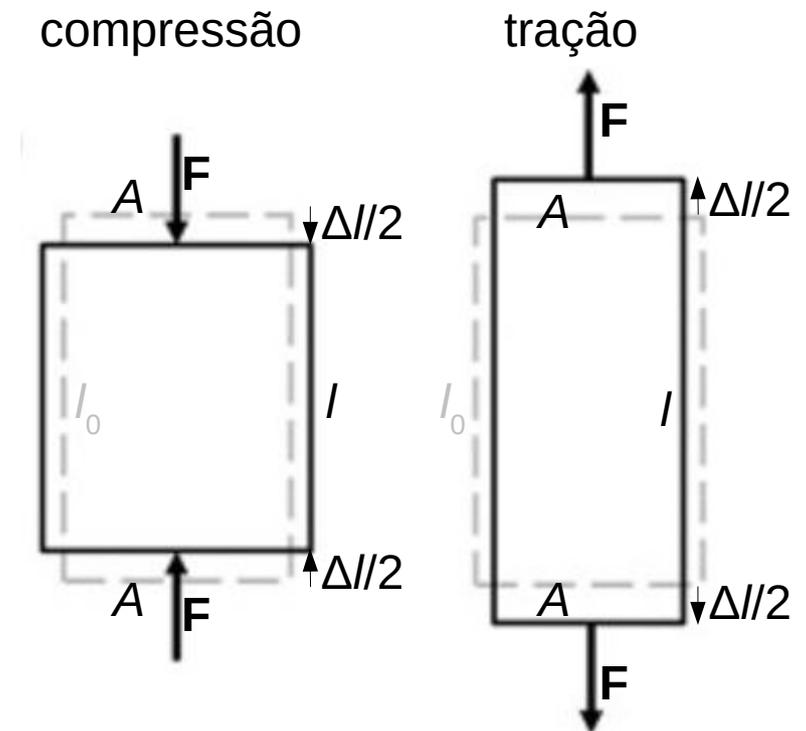
Propriedades Mecânicas dos Sólidos

No **regime elástico** (o regime plástico é mais complicado, e não vamos tratar aqui), as **deformações** são governadas pelos seguintes **módulos**, cada um sendo a **tensão** em uma direção, **dividida** pela **deformação** resultante, e todos tendo como unidade N/m^2 ou, mais frequentemente, GPa :

- Tensão **uniaxial**:
módulo de Young
ou módulo elástico:

$$E := (F/A)/(\Delta/l/l_0)$$

varia de 0.01-0.1 GPa (borracha)
a 1050-1210 GPa (diamante)

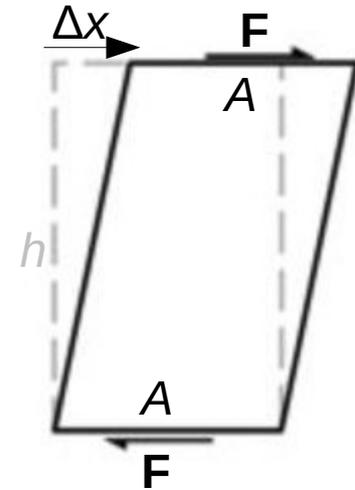


Propriedades Mecânicas dos Sólidos

- **Cisalhamento:**
módulo de cisalhamento:

$$G := (F/A)/(\Delta x/h)$$

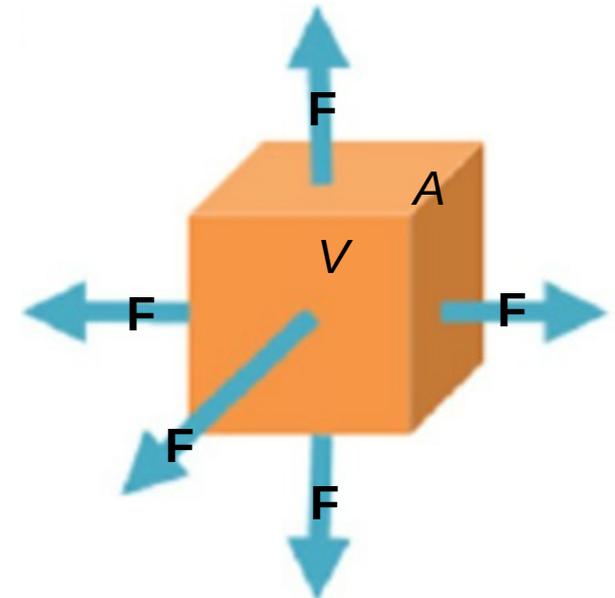
varia de 0.0006 GPa (borracha)
a 478 GPa (diamante)



- Tensão **hidrostática:**
módulo de compressibilidade:

$$K := P/(\Delta V/V)$$

valores típicos de 33-35 GPa (vidro)
a 443 GPa (diamante)

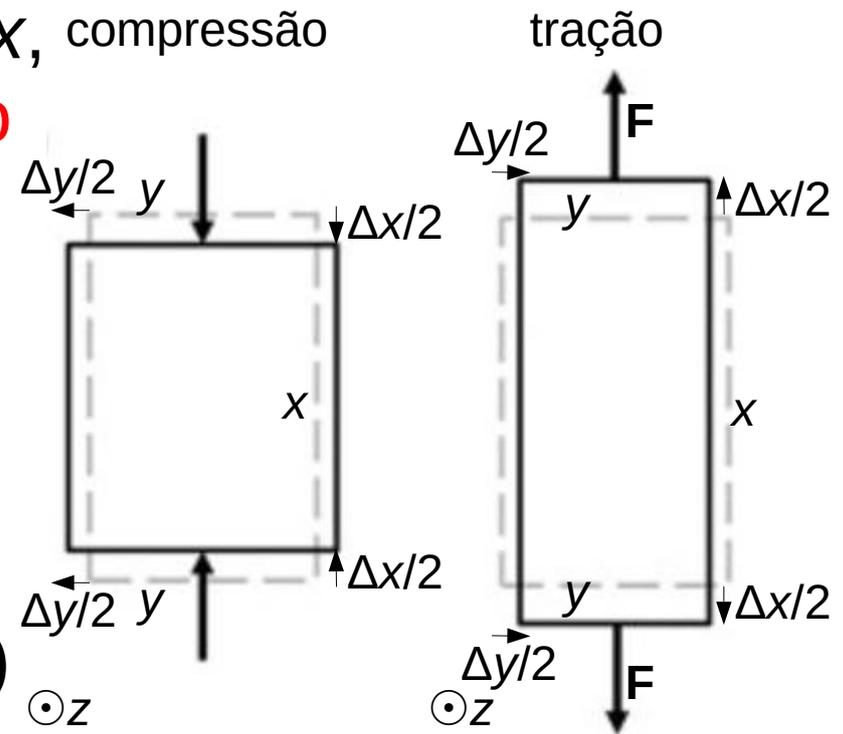


Propriedades Mecânicas dos Sólidos

Em uma **deformação uniaxial** $\Delta x/x$, compressão normalmente há uma **deformação transversal** $\Delta y/y = \Delta z/z$ também.

Definimos a **Razão de Poisson** como a razão entre as **deformações transversal e uniaxial**:

$$\nu_p := (\Delta y/y)/(\Delta x/x) \text{ ou } (\Delta z/z)/(\Delta x/x)$$



Para **deformações pequenas** existem as seguintes **relações** entre os **módulos de deformação**:

$$G = E / 2(1 + \nu_p) \quad \text{e} \quad K = E / 3(1 - 2\nu_p)$$

Propriedades Magnéticas dos Sólidos

Aplicando um **campo magnético externo \mathbf{H}** num material, um **momento magnético \mathbf{M} é induzido**, proporcional e paralelo ou antiparalelo a \mathbf{H} :

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H},$$

onde χ é a **susceptibilidade magnética por volume** do material. Ainda se pode definir a **susceptibilidade magnética molar**:

$\chi_m = \chi V_m$, onde $V_m = \text{volume molar} = V/n = N_A V/N = N_A / \mathcal{N}$
($n = \text{quantidade de substância}$, $N = nN_A = \text{número de partículas}$, $\mathcal{N} = N/V = \text{no. de partículas por volume}$)

=> o campo total no interior do material é $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$,
 μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Js}^2/\text{C}^2\text{m}$

Propriedades Magnéticas dos Sólidos

A **susceptibilidade magnética** por volume χ pode ser escrita como:

$$\chi = \mathcal{N}\mu_0 (\xi + \mu^2/3k_B T),$$

onde μ é o **momento magnético permanente** das moléculas, **proporcional** ao **spin** $S = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar$; o termo $\mu^2/3k_B T$ é devido ao **alinhamento** deste momento com o **campo externo**

(análogo ao alinhamento de um momento dipolo elétrico, $\mu^2 E / 3k_B T \Rightarrow$ **aula interações intermoleculares**),

ξ é a **magnetizabilidade** das moléculas, a **capacidade** de **adquirir** um **momento magnético induzido**

(análogo à polarizabilidade para o momento elétrico);

ξ é normalmente **negativo**, resultado da **Lei** de Faraday-**Lenz** (\Rightarrow Fen. EM).

Propriedades Magnéticas dos Sólidos

Escrito **por mol** em lugar de por unidade de volume:

$$\chi_m = N_A \mu_0 (\xi + \mu^2/3k_B T) = A + C/T,$$

que é a **Lei de Curie** (com $A = N_A \mu_0 \xi$ e $C = N_A \mu_0 \mu^2/3k_B$).

=> A **susceptibilidade magnética diminui**, quando a **temperatura aumenta**.

Dependendo do valor de χ e da orientação do momento induzido em relação ao campo externo (o sinal de χ), existem vários **classes de materiais**.

As três seguintes são as mais importantes:

Propriedades Magnéticas dos Sólidos

1. Materiais Diamagnéticos

Moléculas com **spin zero**, isto é, **sem momento magnético permanente** ($\mu = 0$):

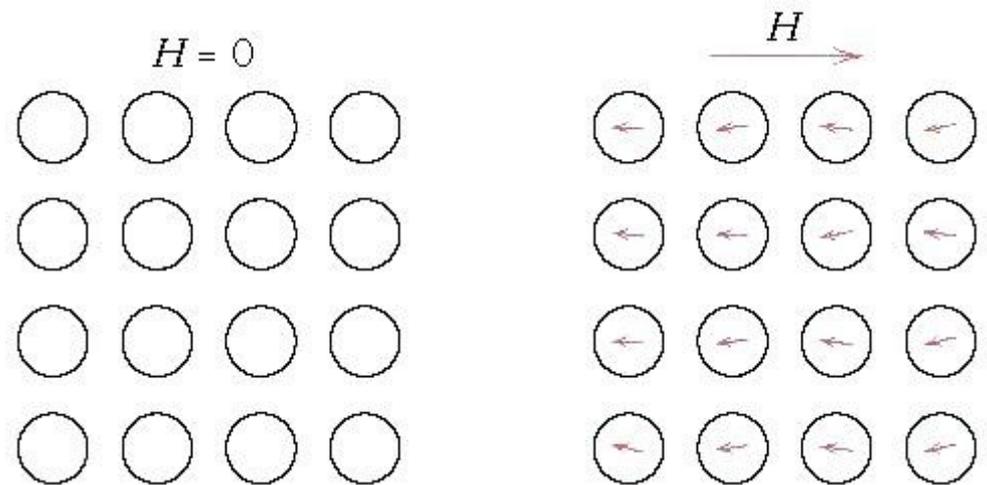
$$\chi = \mathcal{N}\mu_0 \xi < 0 \text{ (normalmente)}$$

=> O **momento induzido M** é **antiparalelo** a **H**

=> O **campo** no **interior** do material é **reduzido** em relação ao campo externo $\mathbf{B} < \mu_0 \mathbf{H}$,

mas só um **pouquinho** (exceto em supercondutores).

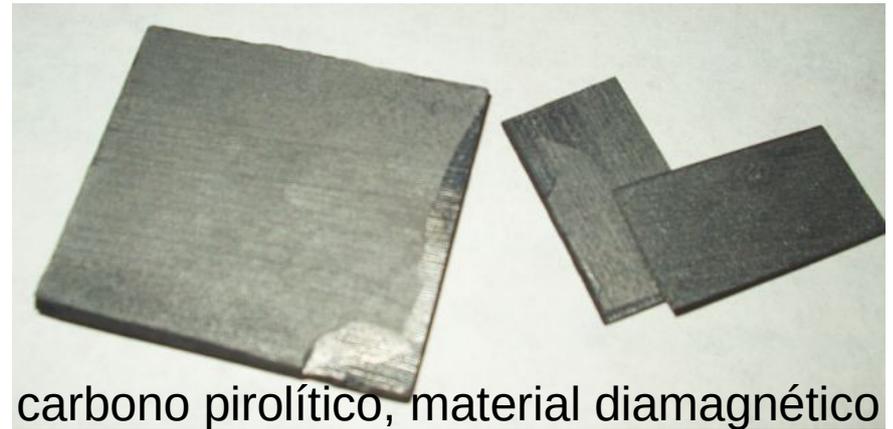
As susceptibilidades magnéticas de materiais diamagnéticos são da ordem de -10^{-5} .



Propriedades Magnéticas dos Sólidos

1. Materiais Diamagnéticos

Materiais diamagnéticos são aqueles que os não-físicos consideram **não magnéticos**, tais como água, madeira, a maioria dos compostos orgânicos, como petróleo e alguns plásticos, e muitos metais, incluindo o cobre, especialmente os pesados com muitos elétrons, como o mercúrio, o ouro e o bismuto.



Supercondutores podem ser vistos como materiais **perfeitamente diamagnéticos**:

No interior temos $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = 0$

$$\Rightarrow \mathbf{H} = -\mathbf{M}$$

$$\Rightarrow \chi = -1$$

Propriedades Magnéticas dos Sólidos

2. Materiais Paramagnéticos

Moléculas com **spin** $\neq 0$

$\Rightarrow \mu \neq 0$.

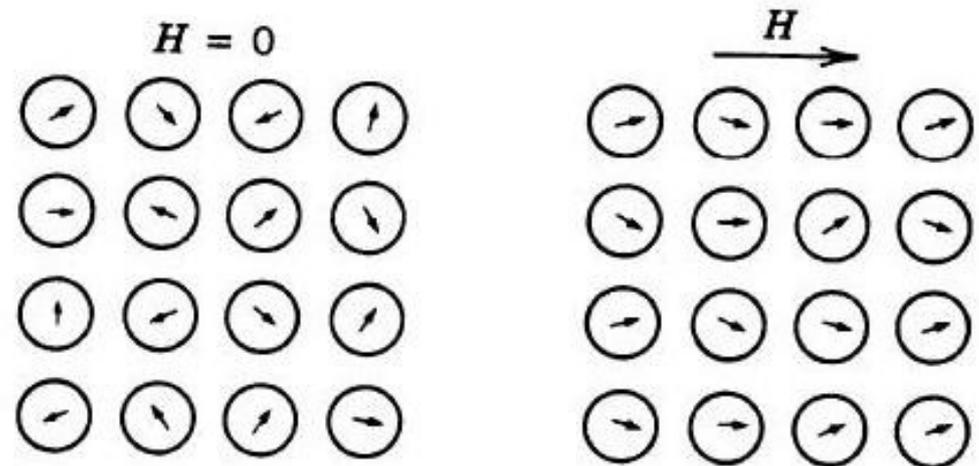
O termo devido ao **alinhamento** deste momento **domina**:

$$\chi = \mathcal{N}\mu_0\mu^2/3k_B T > 0$$

$\Rightarrow \mathbf{M} \parallel \mathbf{H}$,

o **campo** é um pouco **magnificado** no interior, $\mathbf{B} > \mu_0\mathbf{H}$,

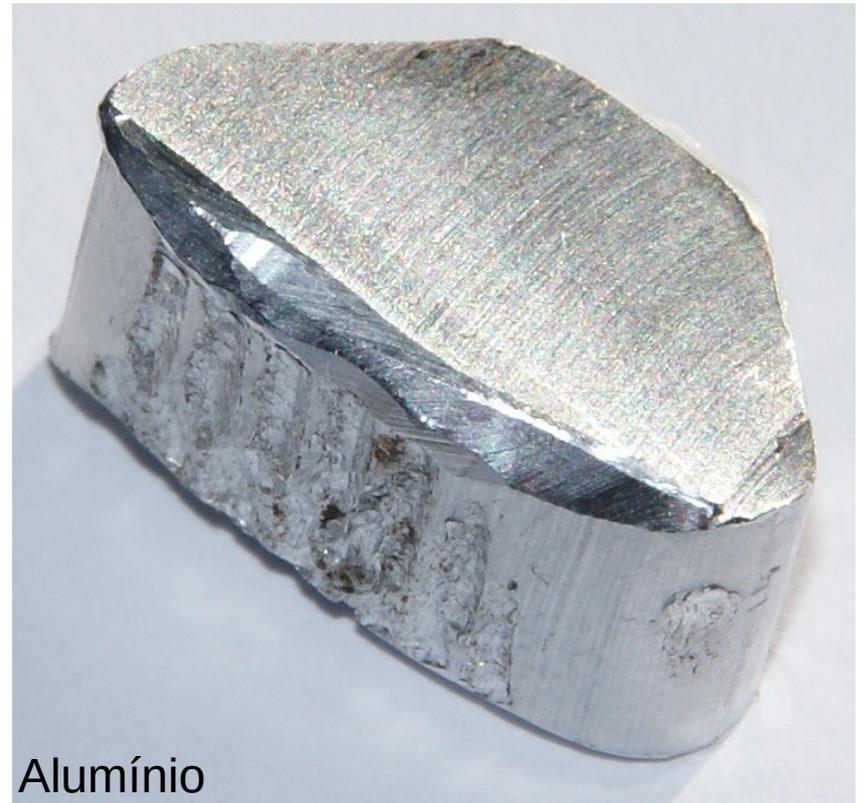
mas também **não muito**, as susceptibilidades magnéticas de materiais paramagnéticos são da ordem de $+10^{-4}$ a $+10^{-3}$.



Propriedades Magnéticas dos Sólidos

2. Materiais Paramagnéticos

Exemplos de materiais paramagnéticos são Sódio, Magnésio, Cálcio, Estrôncio, Bário, Alumínio, Oxigênio, Tecnécio, Platina, Urânio, ...

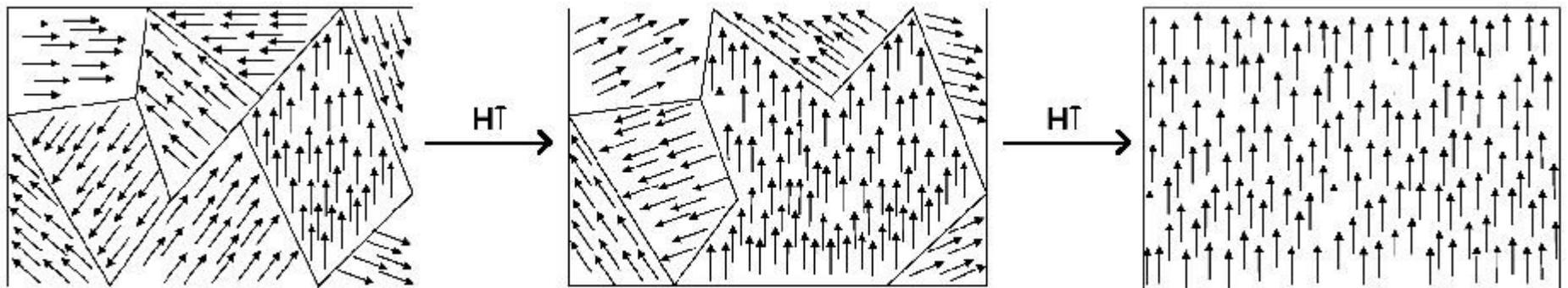


Alumínio

Propriedades Magnéticas dos Sólidos

3. Materiais Ferromagnéticos

Materiais **paramagnéticos** a **baixo** de uma certa temperatura limite, a **temperatura de Curie** (que não precisa ser muito baixa): O **alinhamento** de todas as moléculas (em domínios grandes do material) é **total**.



=> **Aumento enorme** do **campo**:

$\chi \gg 1$ ($\sim 10^3 - 10^4$), $\mathbf{M} \parallel \mathbf{H}$,

$\mathbf{B} \gg \mu_0 \mathbf{H}$ por um fator de mil a dez mil!

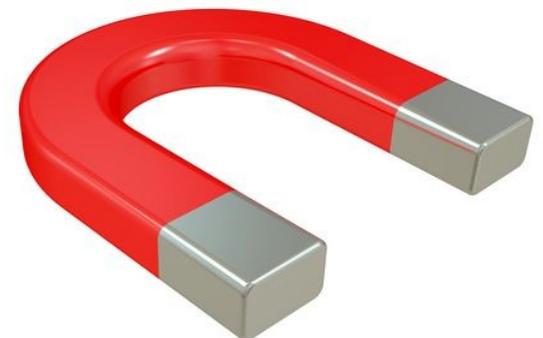
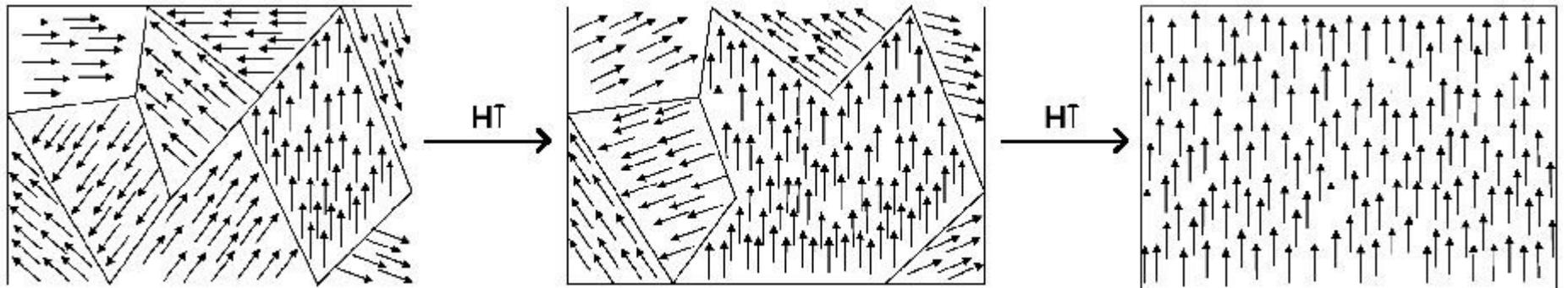
Exemplos: ferro, cobalto, níquel, ...



Propriedades Magnéticas dos Sólidos

3. Materiais Ferromagnéticos

Em alguns materiais **ferromagnéticos**, o **momento induzido permanece**, quando o campo externo é “desligado”, e vira um **momento magnético permanente**.
=> **ímã** (ou magneto)



Propriedades Magnéticas dos Sólidos

3. Materiais Ferromagnéticos

Ímãs permanentes encontrados na natureza podem ser feitos de magnetita, um óxido de Ferro (Fe_3O_4), material que deu o nome ao fenômeno.

Ímãs industriais são frequentemente feitos de aço magnetizado (ferro com alto teor de carbono)





Universidade Federal do ABC

Interações Atômicas e Moleculares

FIM PRA HOJE

