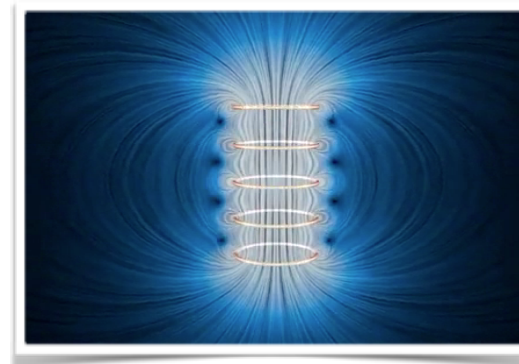
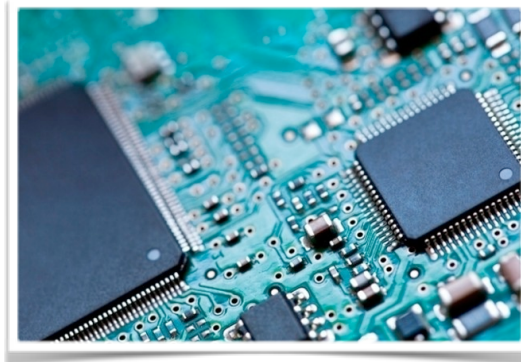




ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

## PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS

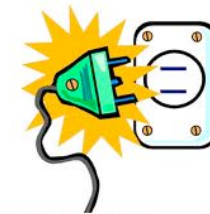
PMT 3110 - Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia  
2º semestre de 2017



# ROTEIRO DA AULA

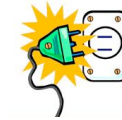
## PARTE 1: PROPRIEDADES ELÉTRICAS

- Fundamentos
- Resistividade e condutividade elétrica
- Lei de Ohm
- Condutividade elétrica
- Bandas de energia nos sólidos
- Condutividade elétrica dos metais
- Condutividade elétrica dos semicondutores intrínsecos
- Condutividade elétrica dos semicondutores extrínsecos tipo n
- Condutividade elétrica dos semicondutores extrínsecos tipo p



Observação: Slides ou ítems indicados com o selo “+info” correspondem a conteúdos complementares, que não serão cobrados em provas.

## FUNDAMENTOS



- O comportamento dos materiais, em resposta à aplicação de um **CAMPO ELÉTRICO** externo (**E**), caracteriza suas **PROPRIEDADES ELÉTRICAS**.
  - Nomenclatura: **CAMPO ELÉTRICO** (Força por unidade de carga) = **TENSÃO ELÉTRICA** por unidade de comprimento = **DIFERENÇA DE POTENCIAL (ddp)** por unidade de comprimento = **GRADIENTE DE POTENCIAL** = “**VOLTAGEM**” por unidade de comprimento.
  - Unidades SI para o **campo elétrico**:  $[\text{Newton}].[Coulomb]^{-1} = [\text{Joule}].[Coulomb]^{-1}.[\text{Metro}]^{-1} = [\text{Volt}].[\text{Metro}]^{-1}$
- As propriedades elétricas são função de diversas características dos materiais, dentre as quais mencionamos: a **configuração eletrônica**, o tipo de **ligação química** e os tipos de **macroestrutura**, **microestrutura** e **nanoestrutura** que compõem o material.
- Uma manifestação elétrica fundamental dos materiais, de grande interesse tecnológico, é avaliada a partir da denominada **DENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA (J)**. J resulta de um processo de movimentação de partículas portadoras de carga elétrica (condução elétrica) que ocorre no interior de certos materiais, quando sob a ação de um campo elétrico externo E. A função  $J = J(E)$  é característica do material, sendo sua magnitude equivalente à quantidade de carga que atravessa uma unidade de área do material por unidade de tempo (fluxo de carga).
  - Unidades SI para a **densidade de corrente elétrica**:  $[Coulomb].[Segundo]^{-1}.[Metro]^{-2} = [Ampere].[Metro]^{-2}$
- Podem ser portadores de carga: **elétrons**, **buracos eletrônicos**, **cátions** e **ânions**.

- Para um dado material, a magnitude de  $J$  em função de  $E$  depende de uma grandeza denominada **CONDUTIVIDADE ELÉTRICA** ( $\sigma$ ).  $\sigma$  caracteriza a eficácia do processo de condução, ou seja, a facilidade com que os portadores de carga se movimentam no interior do material considerado. A magnitude de  $\sigma$  corresponde à quantidade de carga que atravessa uma área unitária do material por unidade de tempo e por unidade de campo elétrico.

- Unidades SI para a **condutividade elétrica**:

$$[\text{Coulomb}].[\text{Segundo}]^{-1}.[\text{Volt}]^{-1}.[\text{Metro}]^{-1} = [\text{Ampere}].[\text{Volt}]^{-1}.[\text{Metro}]^{-1} = [\text{Ohm}]^{-1}.[\text{Metro}]^{-1}$$

- A eficácia do processo de condução também é frequentemente avaliada por meio da grandeza denominada **RESISTIVIDADE ELÉTRICA** ( $\rho$ ).  $\rho$  avalia a dificuldade com que os portadores de carga se movimentam no interior do material considerado. Para materiais isotrópicos,

$$\sigma = 1 / \rho .$$

- Unidades SI para a **resistividade elétrica**:  $[\text{Ohm}].[\text{Metro}]$

- Pode-se correlacionar as grandezas  $J$ ,  $\sigma$  e  $E$  para uma gama bastante abrangente de materiais sólidos, por meio da regra empírica denominada **LEI DE OHM**. Para o caso de materiais isotrópicos sujeitos a campos elétricos constantes, não é necessário considerar o caráter vetorial dessa lei, e para cada ponto do material vale a relação,

$$J = \sigma E .$$

A expressão acima representa a chamada versão microscópica da Lei de Ohm.



## FUNDAMENTOS

- A versão macroscópica da **LEI DE OHM** é representada pela equação

$$U = R I ,$$

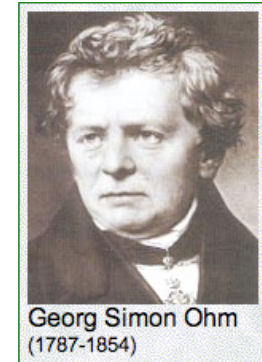
onde **I** corresponde à **CORRENTE ELÉTRICA** que atravessa um dado corpo de **RESISTÊNCIA R**, quando sob a ação de uma **tensão elétrica U**.

- Unidades SI:

**corrente elétrica:** [Coulomb].[Segundo]<sup>-1</sup> = [Ampere]

**resistência:** [Volt].[Ampere]<sup>-1</sup> = [Ohm]

**tensão elétrica:** [Joule].[Coulomb]<sup>-1</sup> = [Volt]



- Para um corpo cilíndrico homogêneo com seção transversal de área  $A$  e comprimento  $\ell$ , a **RESISTÊNCIA (R)** do corpo se correlaciona com a **RESISTIVIDADE ELÉTRICA ( $\rho$ )** do material por meio da relação,

$$R = \rho (\ell / A)$$

- EXERCÍCIO

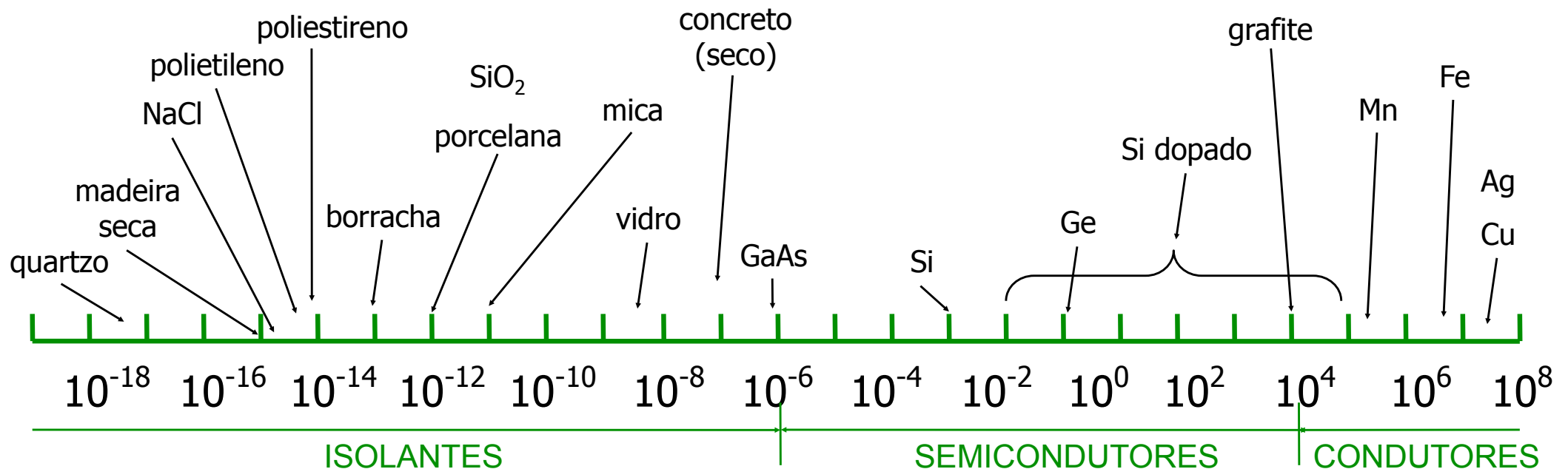
Uma tensão elétrica constante  $U$  é aplicada sobre um corpo cilíndrico homogêneo com seção transversal de área  $A$ , comprimento  $\ell$  e resistência  $R$ . Supondo que o corpo obedece à Lei de Ohm, mostre que as versões macroscópica e microscópica dessa lei são equivalentes.

✓ A simulação gráfica interativa “Circuito Bateria-Resistor” que pode ser acessada em <<https://phet.colorado.edu/en/simulation/battery-resistor-circuit>>, permite estudar o comportamento de um circuito formado por um resistor e uma bateria. Pode-se variar a resistência do resistor e a tensão elétrica gerada pela bateria e observar a corrente que flui no circuito e a temperatura do resistor.

## CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Os materiais sólidos podem ser classificados de acordo com a magnitude de sua condutividade elétrica, em três grupos principais: **CONDUTORES**, **SEMICONDUCTORES** e **ISOLANTES**.

Condutividade elétrica  $\sigma$  de diversos materiais, à temperatura ambiente, expressa em  $(\Omega \cdot m)^{-1}$ .



- **+info:** O **MODELO DOS ELÉTRONS LIVRES** dos metais supõe que o material é composto por uma espécie de gás de elétrons que se movimentam num retículo cristalino formado por íons pesados. Esse modelo prevê corretamente a forma funcional da lei de Ohm, no entanto, prevê incorretamente a magnitude da condutividade elétrica dos metais.

Por exemplo, para o cobre temos:

$$\sigma_{\text{calculado}} = 5,3 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1} \quad \text{e} \quad \sigma_{\text{experimental}} = 59 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}.$$

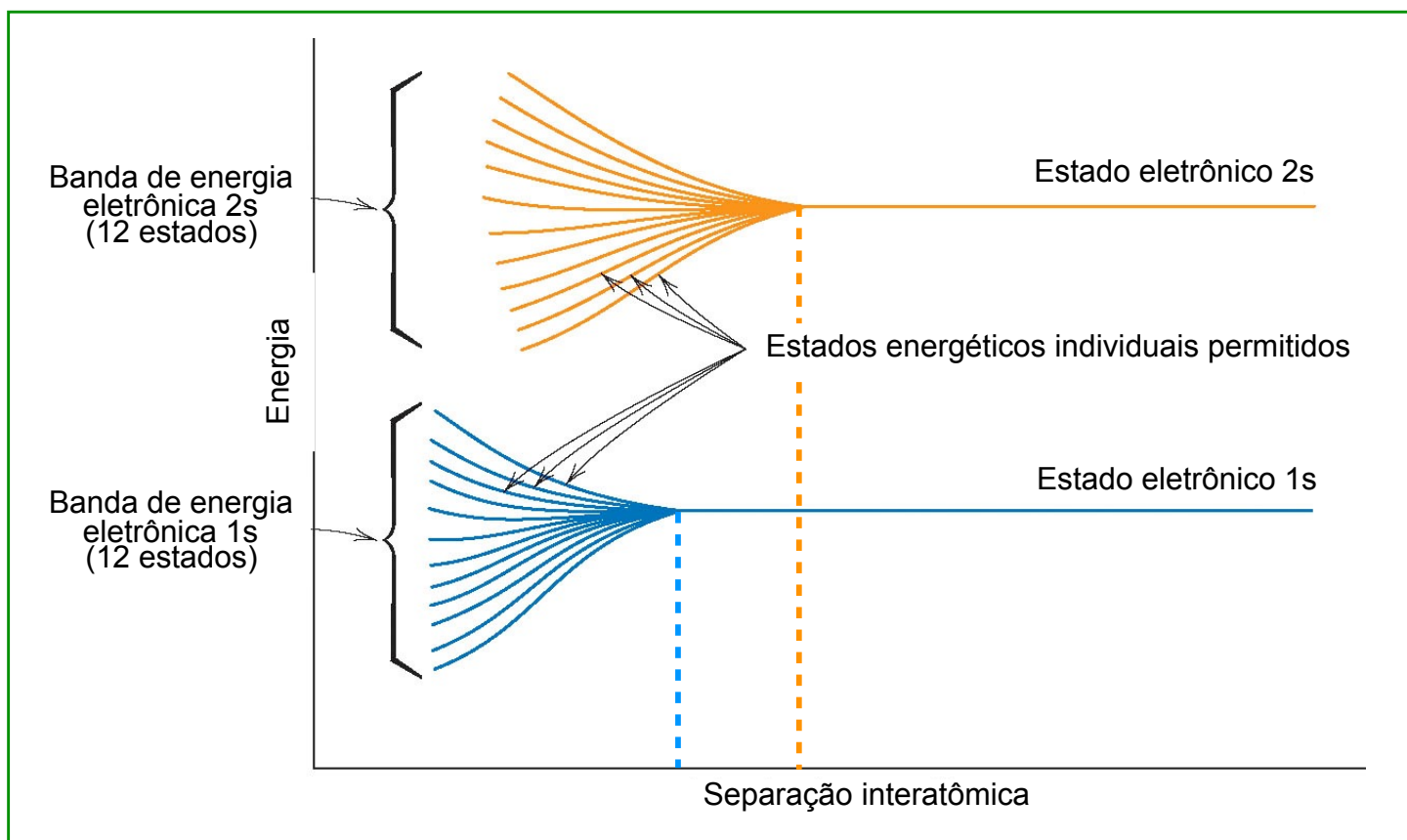
- **+info:** Para uma compreensão aprofundada das propriedades elétricas dos materiais necessitamos considerar o caráter ondulatório dos elétrons e fazer uso de conceitos da mecânica quântica, mas isto está além do escopo desta disciplina.
- Neste tópico da disciplina estudaremos a condutividade elétrica dos materiais, utilizando de forma simplificada alguns conceitos provindos da mecânica quântica. Em particular, consideraremos o **MODELO DE BANDAS DE ENERGIA ELETRÔNICA NOS SÓLIDOS**.

## BANDAS DE ENERGIA ELETRÔNICA NOS SÓLIDOS

- Considere um conjunto de  $N$  átomos. A distâncias de separação relativamente grandes, cada átomo é independente de todos os demais, e tem os níveis de energia atômica e a configuração eletrônica de um átomo isolado. Contudo, à medida que os átomos se aproximam uns dos outros, os elétrons sentem a ação dos elétrons e dos núcleos dos átomos adjacentes. Como consequência, estados eletrônicos equivalentes nos átomos isolados dão origem a um grupo de estados eletrônicos com energias distribuídas em torno do valor da energia correspondente à do estado do átomo isolado. A esse grupo de estados denominamos **BANDA DE ENERGIA ELETRÔNICA**.
- Dentro de cada banda, **os estados de energia são discretos**, embora a diferença de energia entre estados adjacentes seja muito pequena.
- Com a diminuição da distância entre os átomos, a formação das bandas se inicia pelas camadas eletrônicas mais externas, uma vez que elas são as primeiras a serem perturbadas no processo de coalescência dos átomos. A diferença em energia entre estados eletrônicos adjacentes em uma dada banda depende da separação interatômica no sólido.

## BANDAS DE ENERGIA ELETRÔNICA NOS SÓLIDOS

Gráfico esquemático da energia eletrônica em função da separação interatômica para um agregado de 12 átomos ( $N = 12$ ). Com a aproximação dos átomos, cada um dos estados eletrônicos 2s e 1s varia ligeiramente sua energia para assim formar as bandas de energia eletrônica 2s e 1s, respectivamente. Cada banda consiste de 12 estados e cada estado é capaz de acomodar dois elétrons que devem possuir spins com sentidos opostos.



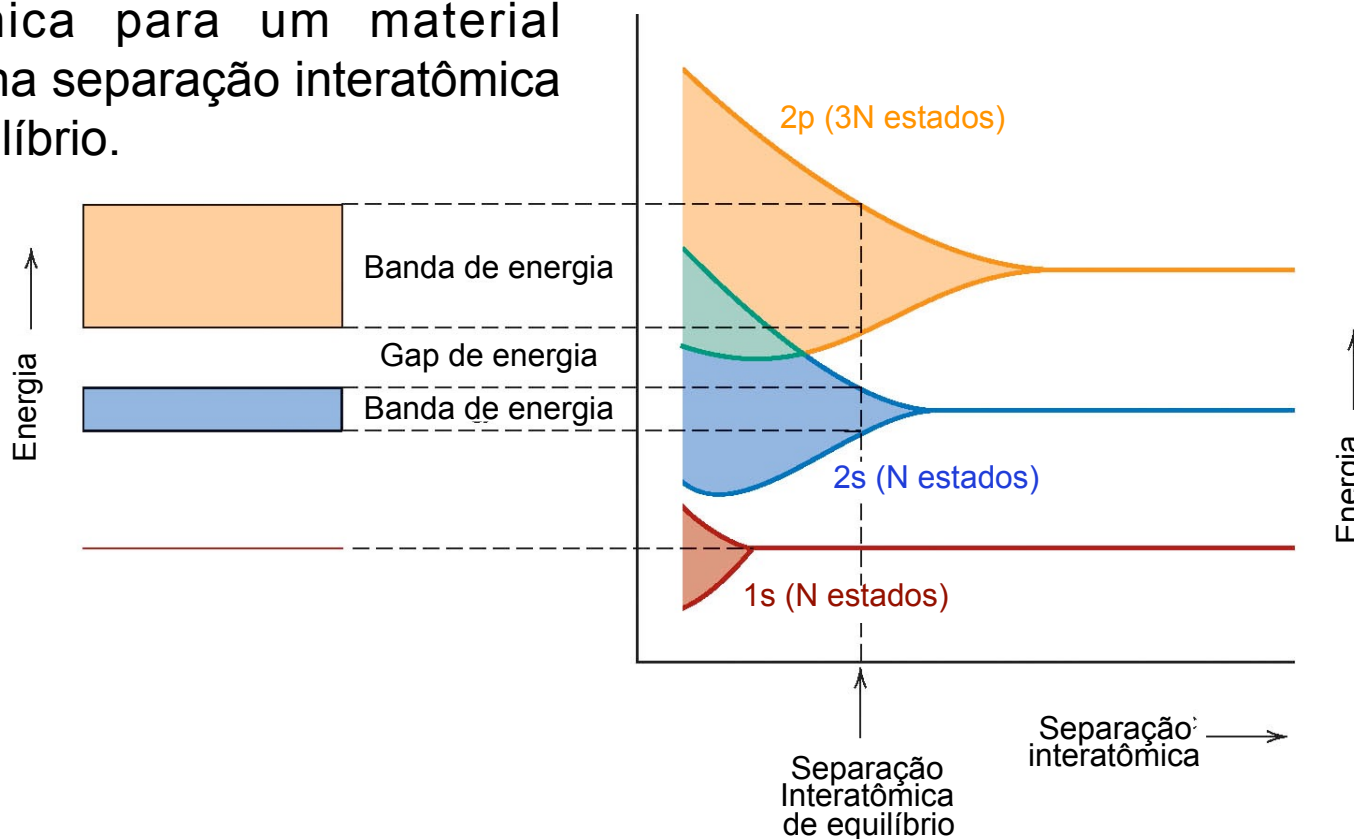
Referência: W.D. Callister e D.G. Rethwisch em “Materials Science and Engineering: An Introduction”, Wiley 8<sup>th</sup> ed, 2010, pág. 723.

## BANDAS DE ENERGIA ELETRÔNICA NOS SÓLIDOS

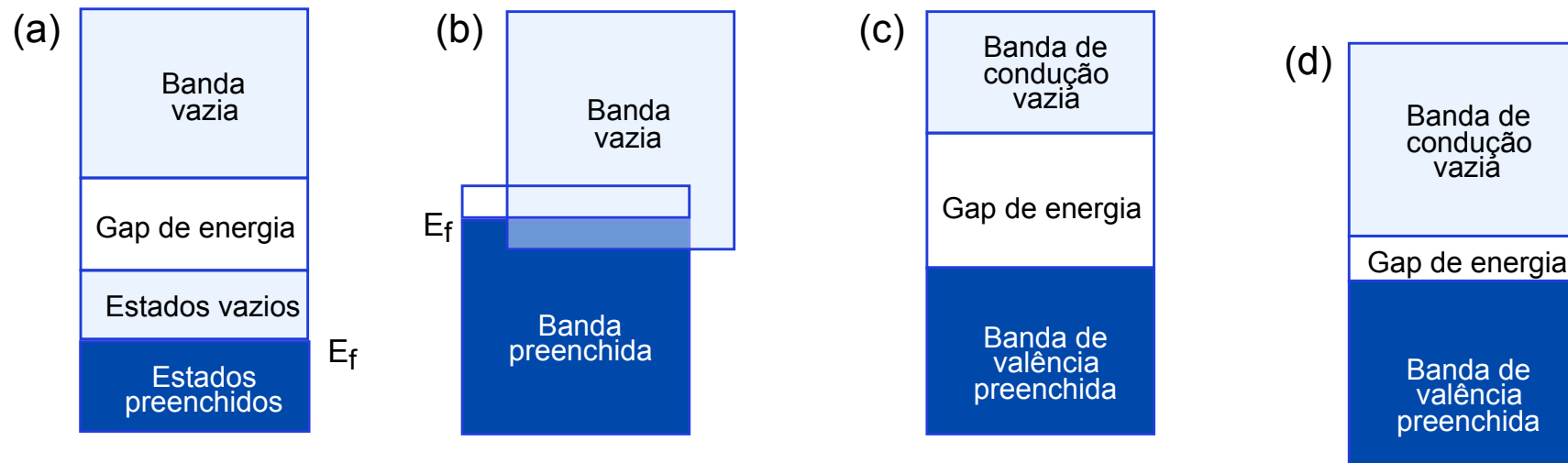
Bandas de energia eletrônica para um material sólido formado por  $N$  átomos.

Representação convencional da estrutura da banda de energia eletrônica para um material sólido na separação interatômica de equilíbrio.

Energia eletrônica em função da separação interatômica para um conjunto de  $N$  átomos, ilustrando como a estrutura da banda de energia eletrônica na separação interatômica de equilíbrio é gerada.



Estruturas de bandas de energia possíveis para sólidos a 0 K.



- (a) Bandas de energia de **METAIS**, tais como o cobre ( $Z = 29, \dots 3d^{10} 4s^1$ ), onde se encontram disponíveis na mesma banda de energia, estados eletrônicos não preenchidos acima e adjacentes aos estados eletrônicos preenchidos.
- (b) Bandas de energia de **METAIS**, tais como o magnésio ( $Z = 12, 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ ), onde ocorre a superposição das bandas de energia mais externas, a preenchida e a não-preenchida.
- (c) Bandas de energia de **ISOLANTES**: a BANDA DE VALÊNCIA (banda de energia preenchida) é separada da BANDA DE CONDUÇÃO (banda de energia não-preenchida) por uma barreira de energia denominada **GAP DE ENERGIA** (ou **BANDA DE ENERGIA PROIBIDA**, ou **POÇO DE POTENCIAL** ou **BARREIRA DE POTENCIAL**) de largura relativamente grande ( $> 2$  eV).
- (d) Bandas de energia de **SEMICONDUCTORES**: a estrutura de bandas de energia é semelhante à dos isolantes, mas com gaps de energia de larguras menores ( $< 2$  eV).

✓ A simulação gráfica interativa “Estrutura de Bandas” que pode ser acessada em <https://phet.colorado.edu/en/simulation/band-structure> estuda a origem das bandas de energia eletrônica em sólidos cristalinos.

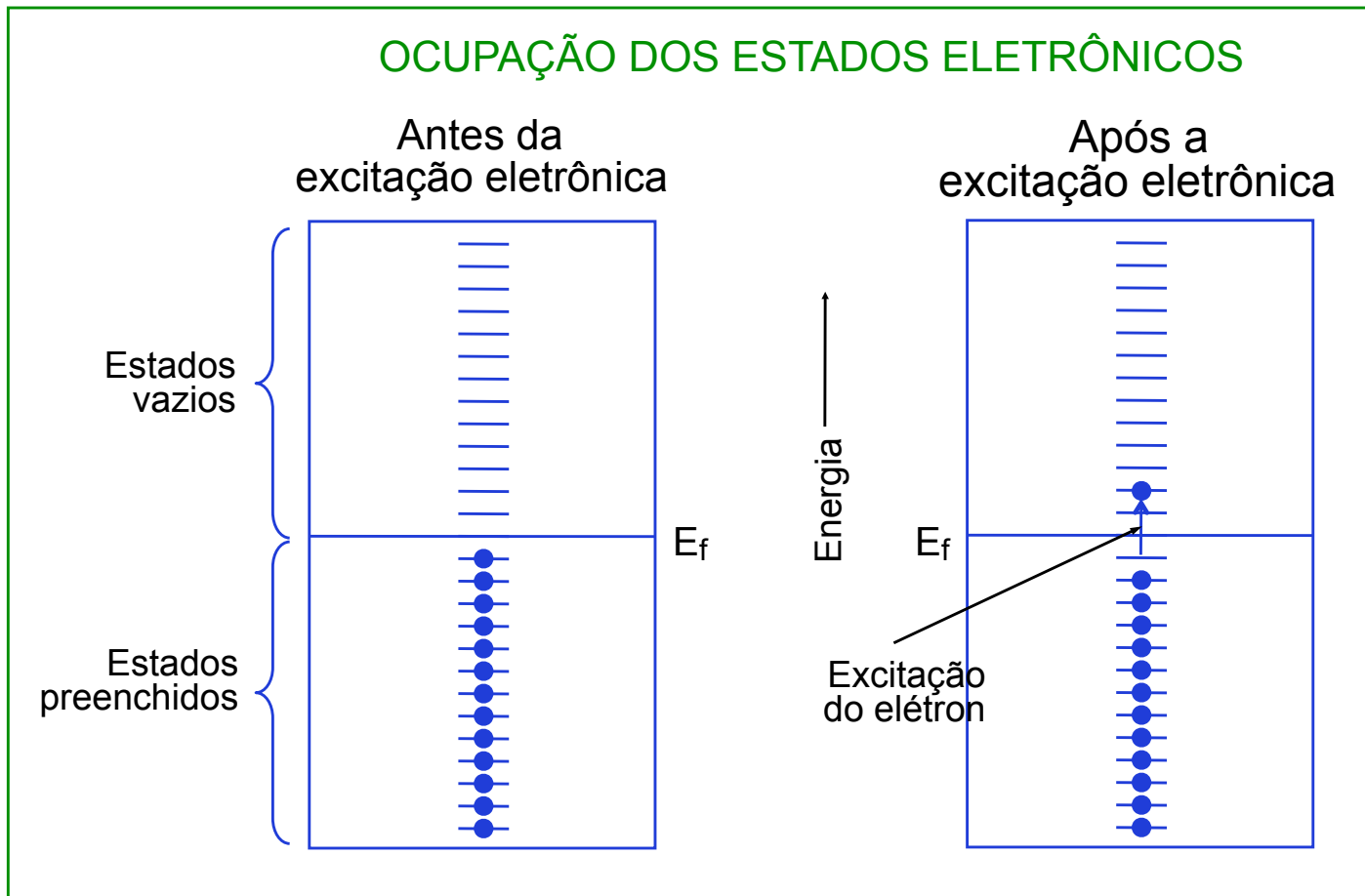
## CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

- A **ENERGIA DE FERMI ( $E_f$ )** é uma consequência do caráter estatístico do comportamento dos elétrons e do Princípio de Exclusão de Pauli. Para metais a  $T = 0\text{ K}$ ,  $E_f$  corresponde à energia máxima dos estados eletrônicos ocupados. Para semicondutores e isolantes  $E_f$  tem um valor situado na faixa de energias correspondente ao gap de energia.
- Num metal sujeito à ação de um campo elétrico, somente elétrons com energias maiores que  $E_f$  podem participar do processo de condução. Esses elétrons são chamados de **ELÉTRONS LIVRES**.
- Em semicondutores e isolantes, os **BURACOS ELETRÔNICOS** têm energia menor que  $E_f$ , mas podem participar do processo de condução quando os materiais estão sob a ação de campos elétricos externos.
- O processo de condução elétrica se origina fisicamente na mobilidade dos **PORTADORES DE CARGA** através do material.



## CONDUTIVIDADE ELÉTRICA - METAIS

- Em metais, um elétron torna-se livre quando passa a ocupar um estado de energia disponível acima de  $E_f$ ; nota-se que é pequena a energia necessária para tal mudança.
- A condutividade elétrica dos metais pode ser representada pela equação,



$$\sigma = n |e| \mu_e$$

$n$  = número de portadores de carga (elétrons) por unidade de volume

$|e|$  = magnitude da carga dos portadores ( $1,602 \times 10^{-19}$  C)

$\mu_e$  = mobilidade dos portadores de carga

✓ “Technische Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel” - aborda diversos tópicos relacionados às propriedades de materiais condutores. Veja em particular o item 2.1.1 que explica o conceito de condutividade elétrica.

<[http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat\\_en/kap\\_2/backbone/r2.html](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_2/backbone/r2.html)>

A condutividade elétrica dos metais condutores *diminui* à medida que a sua *temperatura aumenta*. Lembre que  $\sigma = 1 / \rho$ .

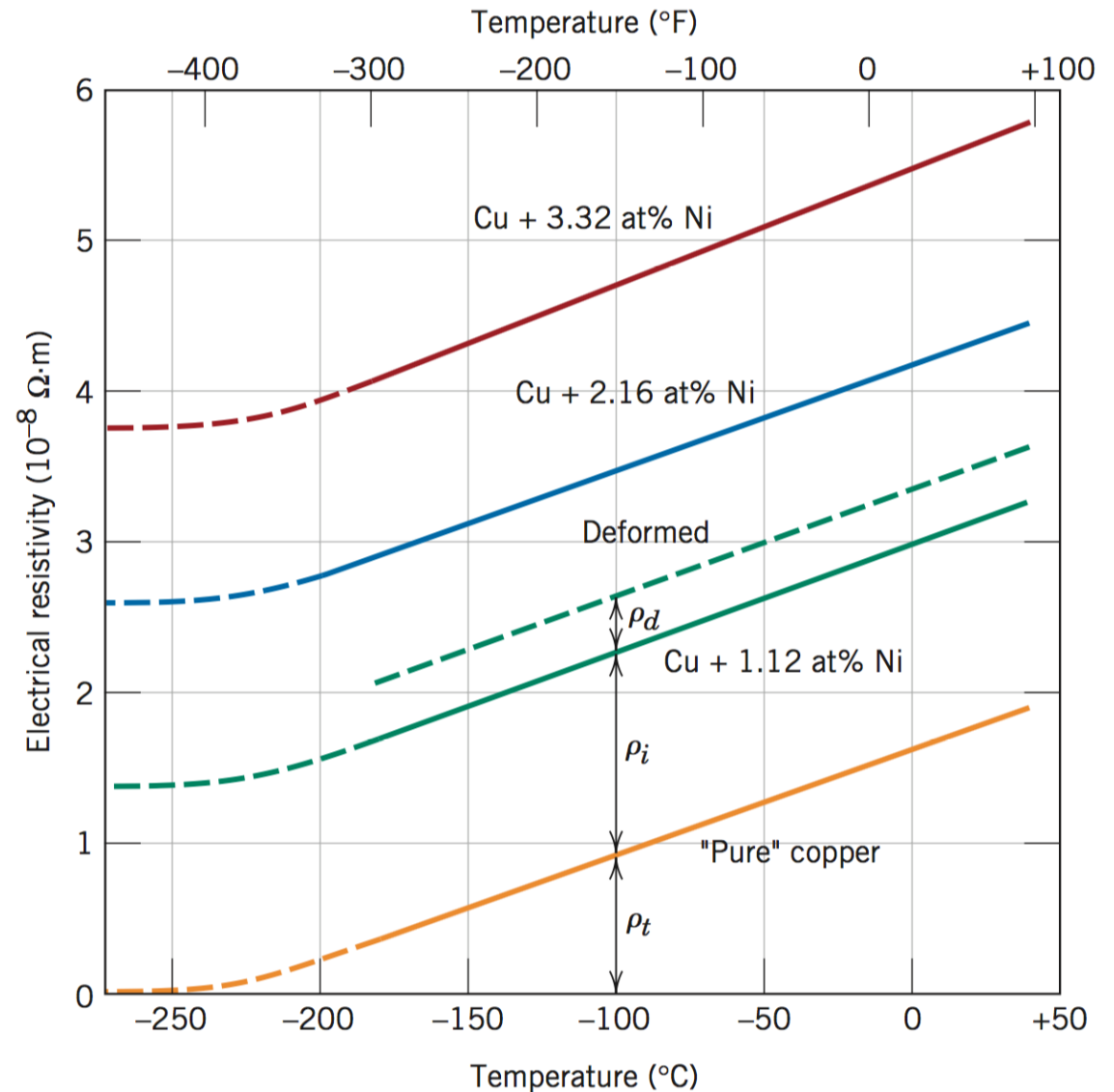
**Table 18.1 Room-Temperature Electrical Conductivities for Nine Common Metals and Alloys**

Metal	Electrical Conductivity [ $(\Omega \cdot m)^{-1}$ ]
Silver	$6.8 \times 10^7$
Copper	$6.0 \times 10^7$
Gold	$4.3 \times 10^7$
Aluminum	$3.8 \times 10^7$
Brass (70Cu–30Zn)	$1.6 \times 10^7$
Iron	$1.0 \times 10^7$
Platinum	$0.94 \times 10^7$
Plain carbon steel	$0.6 \times 10^7$
Stainless steel	$0.2 \times 10^7$

**+info** REGRA DE MATTHIESSEN

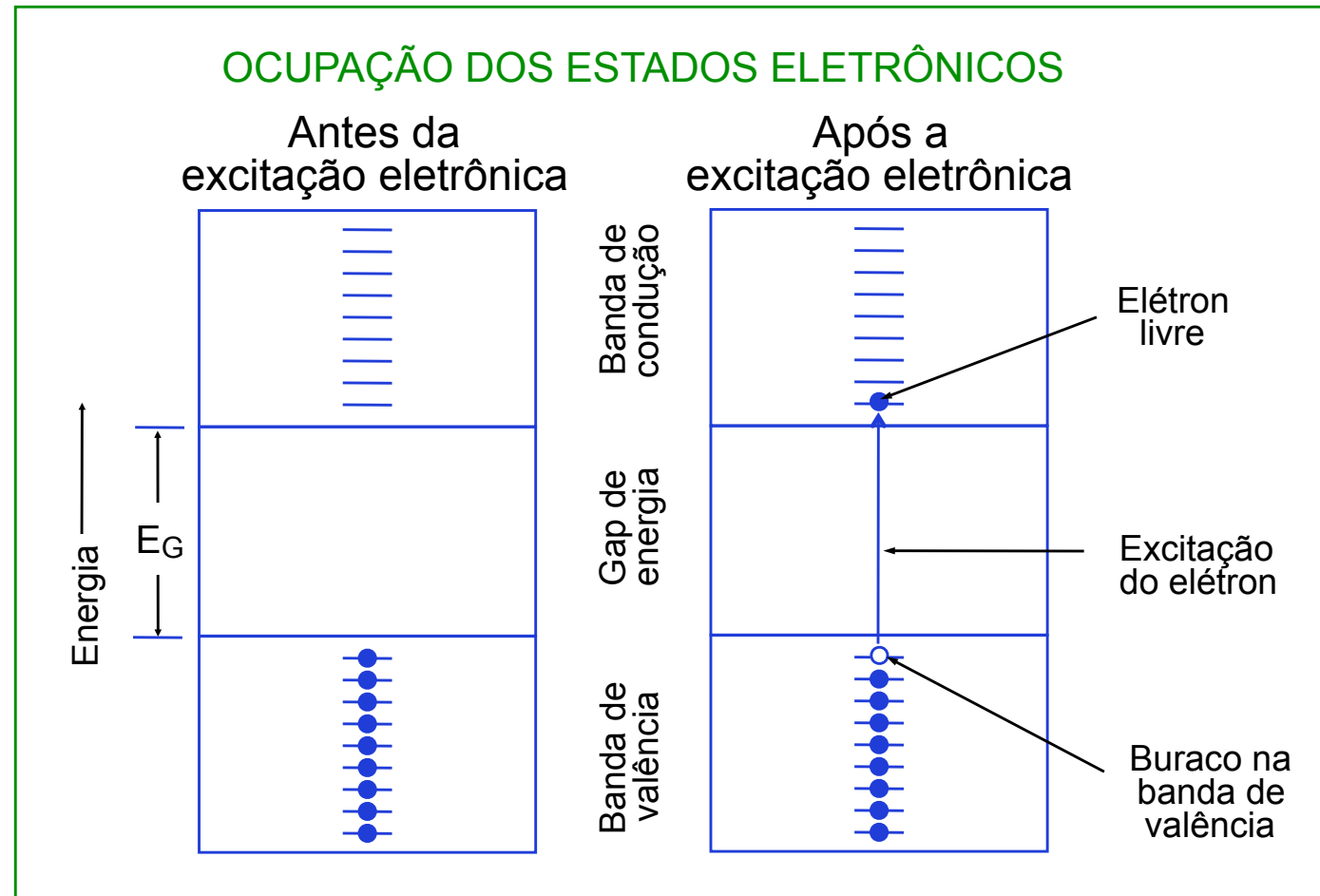
$$\rho_{total} = \rho_t + \rho_i + \rho_d$$

$\rho_t$  ... contribuição térmica  
 $\rho_i$  ... contribuição de impurezas  
 $\rho_d$  ... contribuição de deformações



## CONDUTIVIDADE ELÉTRICA - SEMICONDUTORES E ISOLANTES

- No caso de isolantes e semicondutores, um elétron torna-se livre quando salta da banda de valência para a banda de condução, atravessando o gap de energia. A energia de excitação necessária para tal mudança é aproximadamente igual à da largura do gap de energia.
- A diferença entre semicondutores e isolantes está na largura do gap de energia. Comparada com a largura da dos isolantes, a dos semicondutores é bastante pequena.
- Quando o elétron salta da banda de valência para a banda de condução, são gerados tanto um elétron livre quanto um buraco eletrônico.

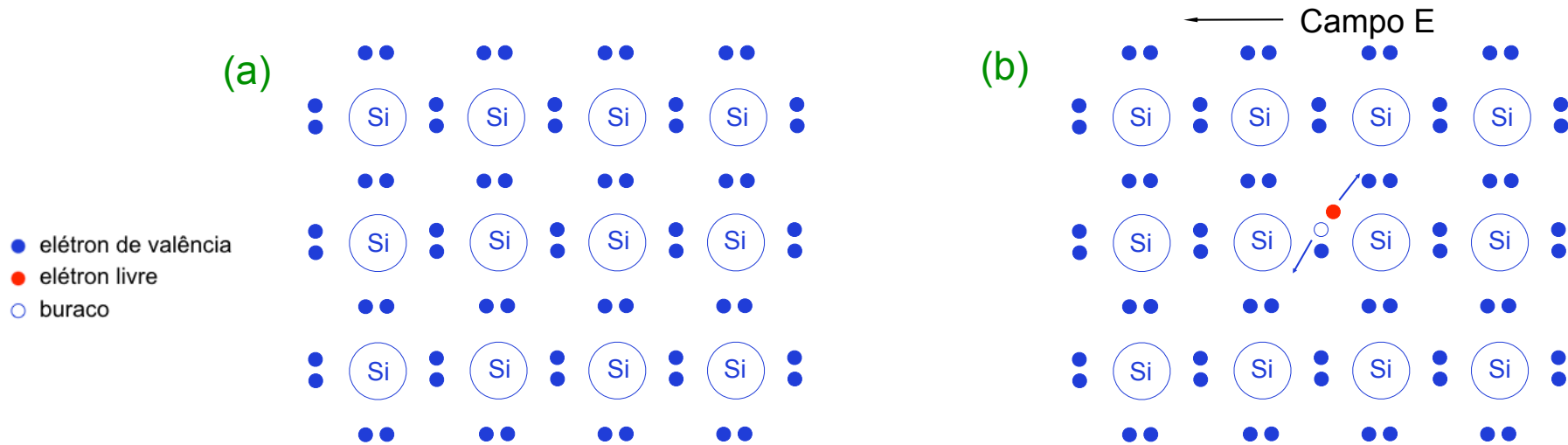


## MATERIAIS SEMICONDUTORES

- **SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS** são aqueles cujo comportamento elétrico depende basicamente da estrutura eletrônica de bandas do material puro. Sua condutividade elétrica geralmente é pequena e varia muito com a temperatura.
- **SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS** são aqueles cujo comportamento elétrico depende fortemente do tipo e da concentração de átomos de impurezas presentes no semicondutor hospedeiro. A adição de impurezas para a moldagem do comportamento elétrico dos semicondutores é chamada de **DOPAGEM**.
- A maioria dos semicondutores comerciais elementais são extrínsecos; o exemplo mais importante é o do Si, mas também estão nesta categoria o Ge e o Sn. É a possibilidade de adicionar, nas quantidades desejadas, impurezas diversas ao material hospedeiro, que permite a fabricação de uma variedade de dispositivos eletrônicos a partir do mesmo material semicondutor hospedeiro.
- Os semicondutores extrínsecos têm condutividade que varia pouco com a temperatura e cujo valor é, principalmente, controlado pela concentração e tipo de impurezas. As concentrações tipicamente utilizadas variam de  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  (1 parte em  $10^8$ , considerando  $10^{22}$  átomos por  $\text{cm}^3$ ) a  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  (1 parte em  $10^2$ , que é bastante alta).
- Semicondutores intrínsecos de compostos dos grupos III-V e II-VI vêm adquirindo crescente importância para a indústria eletrônica nos últimos anos.

# SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

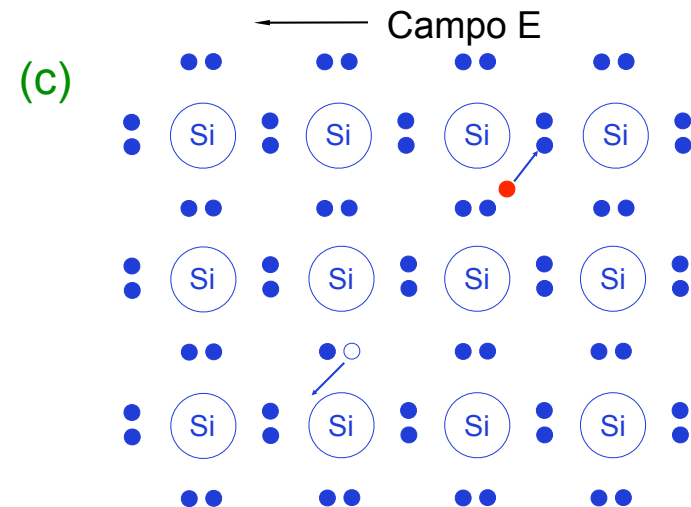
Modelo de ligação eletrônica para a condução elétrica no Silício intrínseco



(a) Antes da excitação eletrônica. Campo elétrico externo  $E = 0$ .

(b) A aplicação de um campo elétrico fornece a energia necessária para a promoção de um elétron da banda de valência para a banda de condução. Como consequência, um buraco eletrônico é gerado na banda de valência.

(c) O elétron promovido para a banda de condução e o buraco gerado na banda de valência movimentam-se em sentidos opostos, ambos contribuindo para a condutividade do material.



## SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

- A condutividade elétrica dos materiais semicondutores pode ser representada pela equação

$$\sigma = n |e| \mu_e + p |e| \mu_b$$

onde:  $n$  = número de elétrons livres por unidade de volume;

$p$  = número de buracos eletrônicos por unidade de volume;

$|e|$  = magnitude da carga dos portadores ( $1,6 \times 10^{-19}$  C);

$\mu_e$  = mobilidade dos elétrons livres;

$\mu_b$  = mobilidade dos buracos eletrônicos.

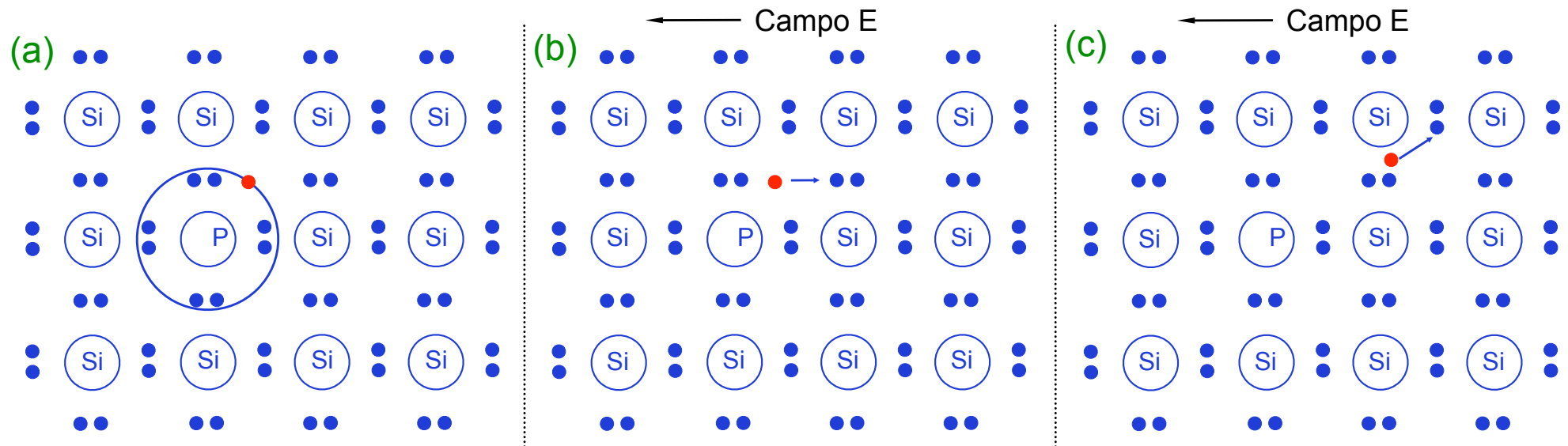
- Para semicondutores intrínsecos,  $n = p$ . Portanto,

$$\sigma = n |e| (\mu_e + \mu_b)$$

- Note que, para um dado material, sob condições físicas específicas:  $\mu_e > \mu_b$ .
- A condutividade elétrica dos semicondutores intrínsecos *umenta* à medida que a temperatura *umenta*.

- Modelo de ligação eletrônica para a semicondução extrínseca do tipo n.

*Exemplo:* a dopagem do Si (valência 4) com P (valência 5) gera elétrons livres; uma impureza desse tipo é chamada de **DOADORA**.

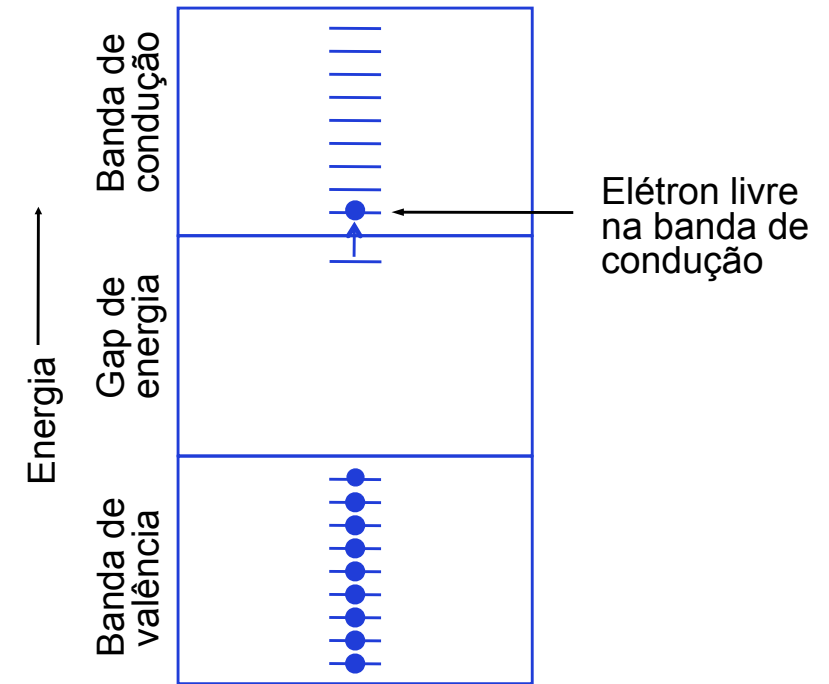
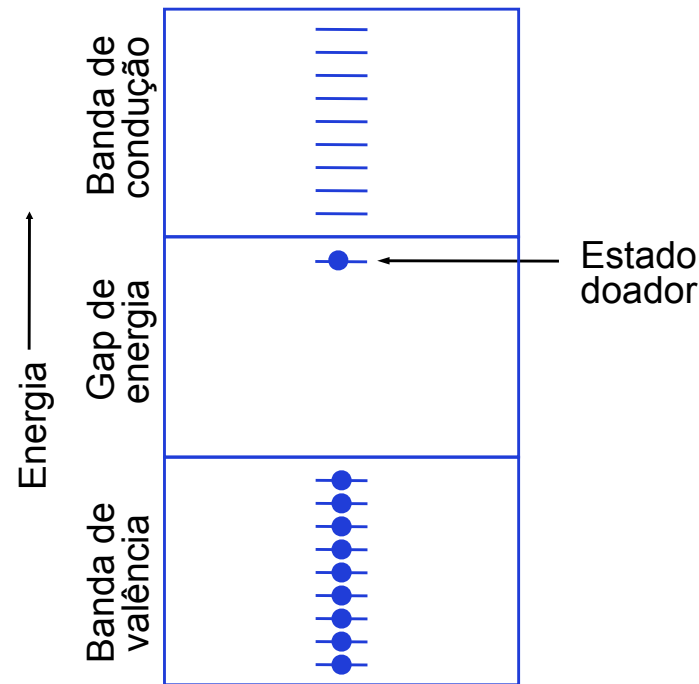


- (a) O átomo da impureza P substitui um átomo hospedeiro de Si na rede cristalina, resultando na geração de um elétron extra ligado ao átomo de impureza.
- (b) Promoção do elétron extra para a banda de valência como consequência da aplicação de um campo elétrico externo, originando, assim, um elétron livre.
- (c) Movimento do elétron livre em resposta ao campo elétrico externo.
- Para *semicondutores do tipo n*, os **elétrons livres são os principais portadores de corrente**, porque  $n \gg p$  e, portanto,

$$\sigma \approx n |e| \mu_e$$

## SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO n

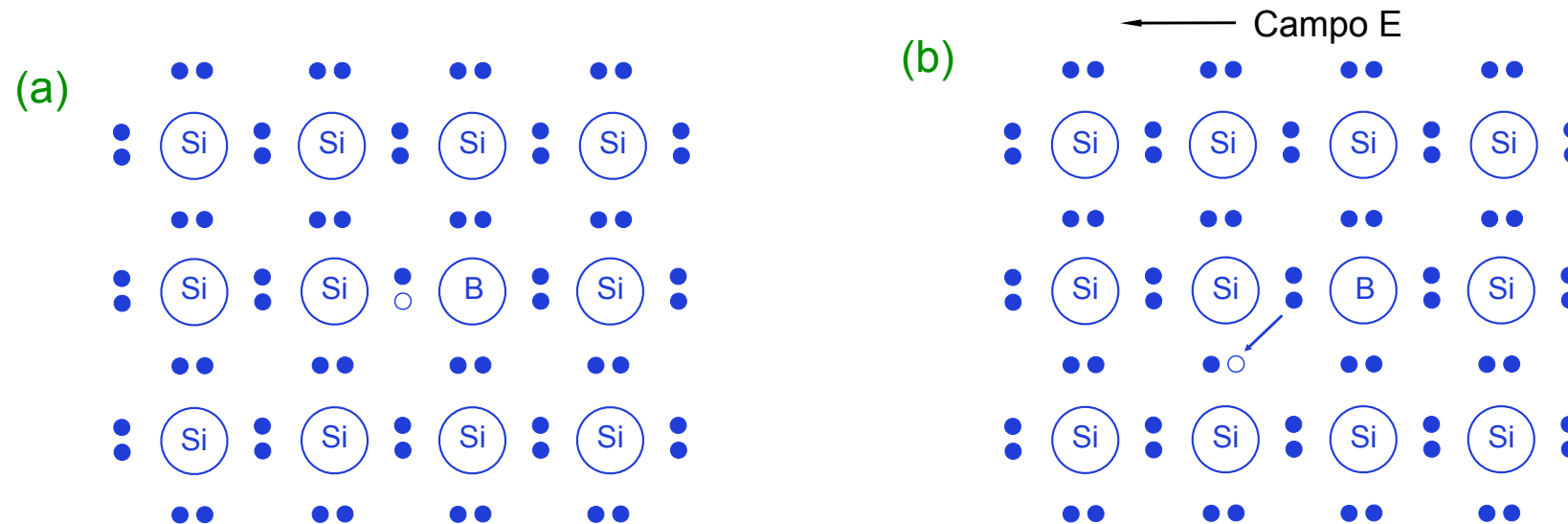
- Esquema da banda de energia eletrônica com um **NÍVEL DE IMPUREZA DOADORA** localizado dentro do gap de energia, imediatamente abaixo da parte inferior da banda de condução.
- Excitação do elétron do estado doador para a banda de condução, transformando-o num elétron livre.





## SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO p

- Modelo de ligação eletrônica para a condução extrínseca do tipo p.  
Exemplo: a dopagem do Si (valência 4) com B (valência 3) gera buracos eletrônicos; uma impureza desse tipo é chamada de **RECEPTORA**.

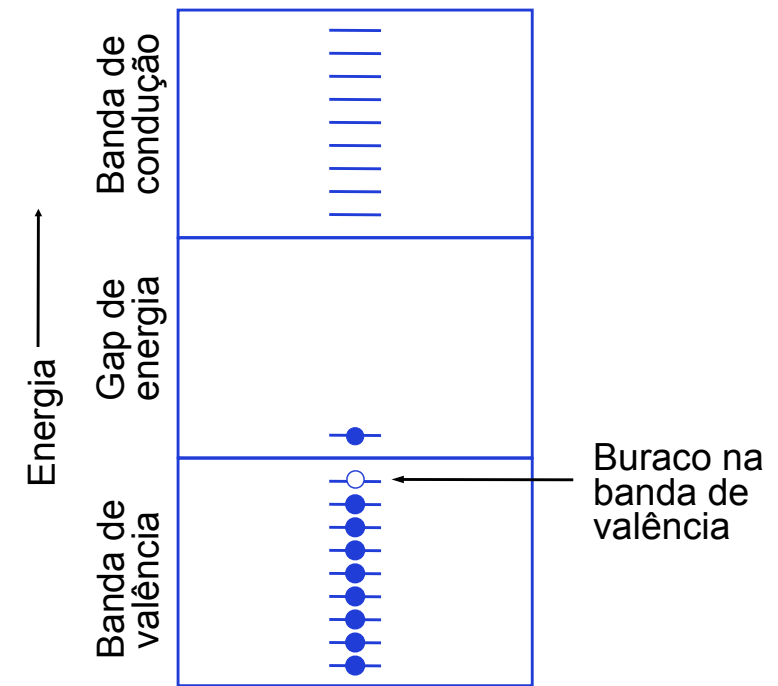
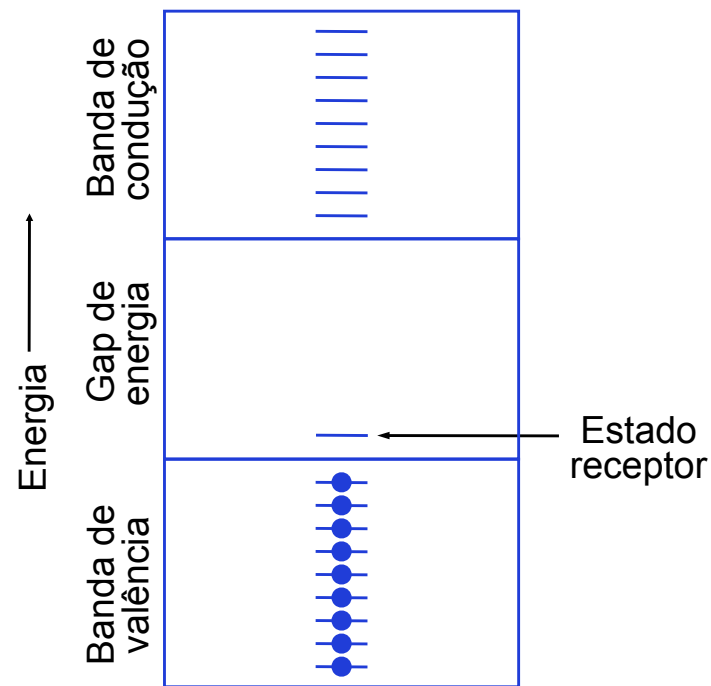


- (a) O átomo da impureza B substitui um átomo hospedeiro de Si na rede cristalina, causando a deficiência de um elétron de valência ou, equivalentemente, gerando um buraco eletrônico na banda de valência.
- (b) Movimento do buraco eletrônico em resposta a um campo elétrico externo.
- Para *semicondutores tipo p*, os **buracos eletrônicos são os principais portadores de corrente**, porque  $p \gg n$  e, portanto,

$$\sigma \approx p |e| \mu_b$$

## SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO p

- Esquema da banda de energia eletrônica com um **NÍVEL DE IMPUREZA RECEPTORA** localizado dentro do gap de energia, imediatamente acima da parte superior da banda de valência.
- Excitação de um elétron da banda de valência para o nível receptor, deixando para trás um buraco na banda de valência que contribui para a condução elétrica.



- **MATERIAIS SEMICONDUTORES EXTRÍNSECOS** são fundamentais para a operação de dispositivos eletrônicos de estado sólido, que são de grande importância para a tecnologia já há várias décadas. Os microprocessadores modernos, por exemplo, não poderiam existir sem os materiais semicondutores extrínsecos.
- Exemplos de alguns dispositivos básicos:
  - **Diodo de junção bipolar (p-n)**. Veja uma breve explicação do funcionamento da junção p-n em <<https://www.youtube.com/watch?v=bYJTsx0zXY8>>. (3:56 min)
  - **Transistor de junção bipolar (n-p-n ou p-n-p)**. Em <<https://www.youtube.com/watch?v=jKVPEIMybUg>> você encontrará uma boa explicação para a junção p-n e para o transistor n-p-n. (9:03 min)
  - **Transistor MOSFET** (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) - um dos pilares da tecnologia moderna de estado sólido. Entenda com a rápida explicação em <[https://www.youtube.com/watch?v=tz62t-q\\_KEc](https://www.youtube.com/watch?v=tz62t-q_KEc)> como um transistor MOSFET funciona. (3:41 min)
- Referências para um estudo introdutório sobre dispositivos semicondutores:
  - **Callister, W.D.** *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7<sup>th</sup> Ed. Wiley. 2007. Cap. 18, seção 15.
  - **Introduction to Semiconductors**, DoITPoMS - Teaching & Learning Packages - University of Cambridge, 2004-2015. <<https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/semiconductors/index.php>>
- Para um estudo mais avançado sobre dispositivos semicondutores veja:
  - **Brennan, K.F.** *Introduction to Semiconductor Devices For Computing and Telecommunications Applications*. Cambridge University Press. 2005.

## RESUMO

### PROPRIEDADES ELÉTRICAS

- A corrente elétrica é o resultado da movimentação dentro do material de **portadores de carga: elétrons, buracos eletrônicos, cátions e ânions**. A condutividade elétrica ( $\sigma$ ) do material é uma medida da facilidade de condução de corrente elétrica e depende da densidade, carga e mobilidade do(s) portador(es):

$$\sigma = n |carga| \mu$$

- Com relação à condutividade elétrica os materiais podem ser classificados em: condutor, semicondutor e isolante.
- O modelo de bandas de energia eletrônica dos materiais consegue prever a quantitativamente a condutividade observada nos materiais.
- Para **metais** a  $T = 0$  K, a **energia de Fermi  $E_f$**  é definida como a **energia máxima** dos estados eletrônicos ocupados. Para **semicondutores e isolantes**  $E_f$  tem um valor situado **na faixa de energias do gap**. Em semicondutores e isolantes, os **buracos eletrônicos** têm **energia menor que  $E_f$** .
- Semicondutores extrínsecos são obtidos pela dopagem (100 ppm - 1 %) formando semicondutores **p** ou **n**. Estes semicondutores apresentam condutividade elétrica e estabilidade térmica significativamente maiores que os semicondutores intrínsecos.

## REFERÊNCIAS: PROPRIEDADES ELÉTRICAS

- **Callister, W.D.** *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7<sup>th</sup> Ed. Wiley. 2007. Cap. 18, seções 1 a 7 e 9 a 11.
  - Obs.: outras edições do livro do Callister existentes nas bibliotecas da EP, em inglês ou português, também cobrem o conteúdo apresentado nesta Unidade. *Exemplo*: Callister, 5<sup>a</sup> ed, Capítulo 19: seções 1 a 7 e 9 a 11.
- **Introduction to thermal and electrical conductivity**, DoITPoMS - Teaching & Learning Packages - University of Cambridge, 2013. <[https://doitpoms.admin.cam.ac.uk/tlplib/thermal\\_electrical/index.php](https://doitpoms.admin.cam.ac.uk/tlplib/thermal_electrical/index.php)>
- **Introduction to Semiconductors**, DoITPoMS - Teaching & Learning Packages - University of Cambridge, 2007. <<https://doitpoms.admin.cam.ac.uk/tlplib/semiconductors/index.php>>
- **Shackelford, J. F.** *Introduction to Materials Science for Engineers*. 8th Ed, Prentice-Hall Inc., 2015. Capítulo 13.

## ROTEIRO DA AULA

### PARTE 2: PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

- Algumas Aplicações
- Campo Magnético  $H$
- Indução Magnética  $B$
- Magnetização  $M$
- Dipolos e Momentos Magnéticos
- O Magnetismo dos Materiais
- Ferromagnetismo
- Domínios Magnéticos e Paredes de Domínio
- Curva de Magnetização Inicial
- Curva de Histerese
- Materiais Magnéticos Moles e Duros



## INTRODUÇÃO

2

O magnetismo dos materiais é abundantemente explorado em aplicações tecnológicas tanto tradicionais, como estado da arte. Sob o ponto de vista de sua essência científica e de sua manifestação física fundamental, fenômenos magnéticos transcendem a realidade cotidiana e fascinam intelectualmente já há longa data.

O campo magnético resulta do movimento acelerado de partículas que possuem carga elétrica. Dessa forma, os elétrons dos átomos geram campos magnéticos e os átomos podem ser representados por momentos de dipolo magnéticos. A principal contribuição para o momento de dipolo magnético atômico vem dos momentos angulares de spin e orbital dos elétrons. O papel dos momentos de dipolo magnético atômicos no comportamento dos materiais e suas interações com campos magnéticos externos fundamentam as propriedades magnéticas dos materiais.

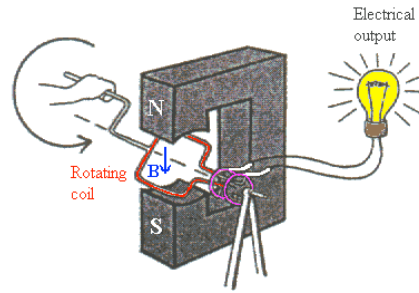
Neste tópico da disciplina estudaremos os fundamentos das propriedades magnéticas dos materiais.

Os slides indicados com o selo  possuem conteúdos complementares, que não serão cobrados em provas.

## ALGUMAS APLICAÇÕES

Muitos dos nossos dispositivos tecnológicos modernos dependem do magnetismo e dos materiais magnéticos.

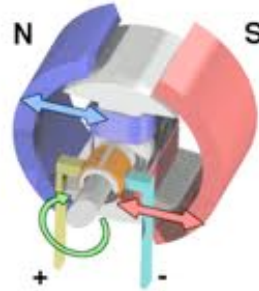
Geradores elétricos (máquinas que convertem movimento em eletricidade)



Dispositivos de armazenamento de dados (discos rígidos, fitas magnéticas etc)



Motores elétricos (máquinas que usam eletricidade para produzir movimento)



E muitos outros...



Rádios

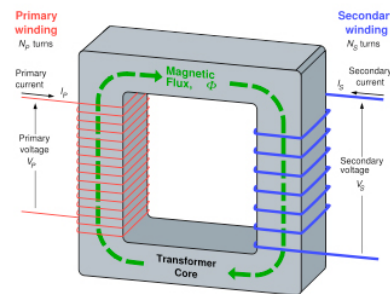


Televisões



Vídeos

Transformadores elétricos (dispositivos que mudam a voltagem e a corrente de uma fonte de eletricidade)



Telefones



Computadores

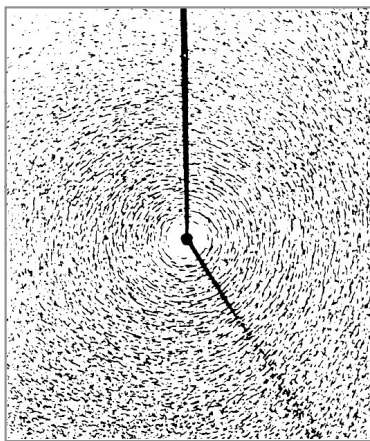


Cartões magnéticos

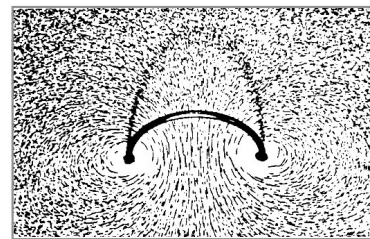


- **CAMPOS MAGNÉTICOS** são campos vetoriais que resultam do movimento de cargas elétricas. Assim, uma corrente elétrica em um material condutor pode gerar um campo magnético. Campos magnéticos também podem ser produzidos por magnetos permanentes (ímãs). Nesse caso, o movimento (spin e orbital) dos elétrons dos átomos que compõem o magneto é o responsável pela geração do campo magnético.
- **LINHAS DE FORÇA** podem ser utilizadas como uma representação dos campos magnéticos. Em cada ponto do espaço, a reta tangente à linha de força fornece a direção do campo. A intensidade do campo, por sua vez, se correlaciona com o número de linhas de força que atravessam uma área unitária na direção perpendicular à definida pelas linhas de força.

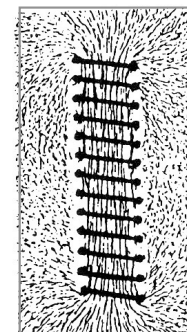
Configurações das linhas de força dos campos magnéticos, obtidas com limalha de ferro, para três geometrias diferentes de fios que conduzem corrente elétrica e para um magneto permanente.



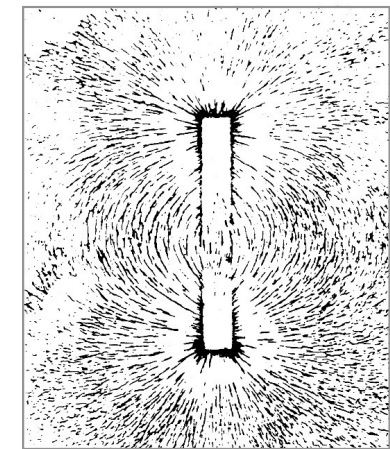
Fio retilíneo



Espira circular



Bobina



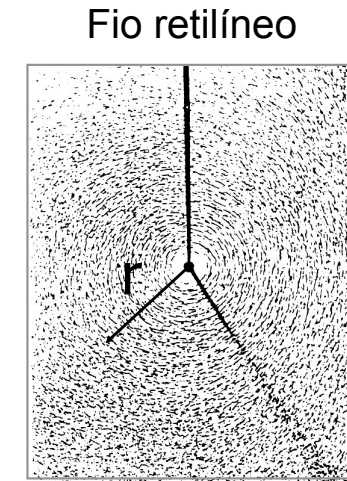
Magneto Permanente

## CAMPO MAGNÉTICO H

- A intensidade do campo magnético H criado por um **FIO RETILÍNEO** longo e que conduz uma corrente elétrica I vale,

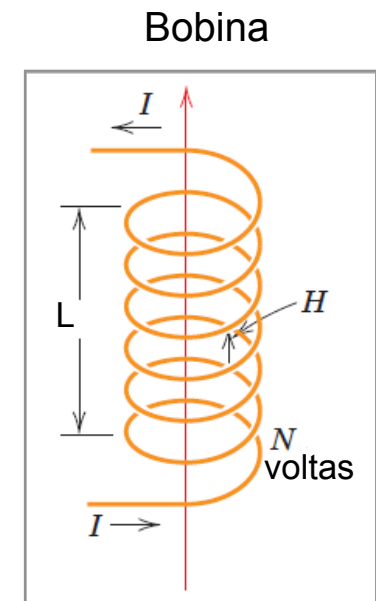
$$H = I / 2 \pi r \quad (\text{A/m})$$

onde r é a distância radial ao eixo definido pelo fio.

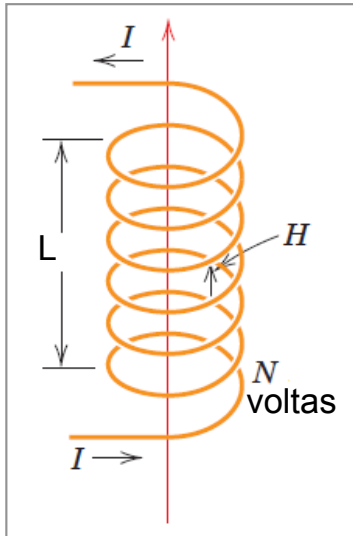


- Quando uma corrente elétrica I flui em uma **BOBINA formada por N espiras**, proximamente espaçadas, ao longo de um comprimento L, um campo magnético H, aproximadamente constante, é gerado na região central da bobina. A intensidade de H é

$$H = NI / L \quad (\text{A/m})$$



## INDUÇÃO MAGNÉTICA B



- A **INDUÇÃO MAGNÉTICA** ou **DENSIDADE DO FLUXO MAGNÉTICO B** representa a intensidade do campo no interior de um material sujeito a um campo magnético externo H.
- A indução magnética no vácuo  $B_0$  vale,

$$B_0 = \mu_0 H \quad (\text{T ou Wb/m}^2 = \text{V.s/m}^2)$$

onde  $\mu_0$  é a **PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO VÁCUO**;

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m (ou Wb/A.m).}$$

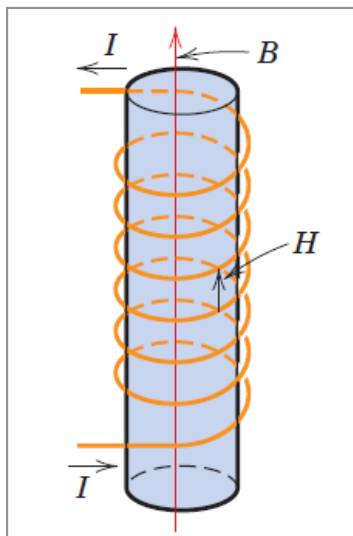
- A indução magnética **B** no interior de um material sólido vale,

$$B = \mu H \quad (1)$$

sendo  $\mu$  a **PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO MATERIAL**.

- A **PERMEABILIDADE MAGNÉTICA RELATIVA DO MATERIAL** é definida como,

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (2)$$



## ALGUNS COMENTÁRIOS...

A expressão  $B = \mu H$  pode ser pensada como sendo um análogo magnético da lei de Ohm da eletricidade  $J = \sigma E$ .

**Campo magnético (H)  $\leftrightarrow$  Campo elétrico (E)**

O campo magnético representa um gradiente de energia. Unidades SI: Ampère / metro.

**Indução magnética (B)  $\leftrightarrow$  Densidade de corrente (J)**

A indução magnética representa o número de linhas de campo magnético por unidade de área do material. Unidades SI: Tesla = Weber / metro<sup>2</sup>.

**Permeabilidade magnética ( $\mu$ )  $\leftrightarrow$  Condutividade elétrica ( $\sigma$ )**

A permeabilidade magnética é uma medida da facilidade com a qual B pode ser induzido em um material na presença de H.

Uma diferença importante é que, enquanto a condutividade é uma constante característica do material, a permeabilidade varia com H.

- A **MAGNETIZAÇÃO M** de um material indica como o material responde a um campo magnético externo. A magnetização é definida pela expressão,

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + \text{Polarização Magnética} \quad (3)$$

M é o campo magnético que leva em conta desvios no valor da indução magnética, em relação ao seu valor no vácuo, originados pela presença de um meio material.

- A magnetização pode ser correlacionada com o campo magnético por meio da relação

$$M = \chi_m H \quad (4)$$

onde  $\chi_m$  é denominada **SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA** do material.

- Combinando as equações (1) a (4) obtemos

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

## UNIDADES MAGNÉTICAS

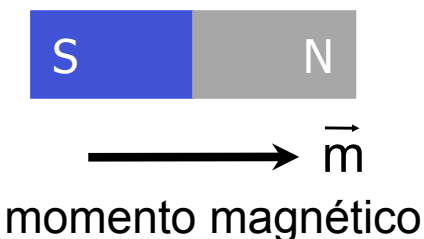
Grandeza	Símbolo	Unidade (SI)		CGS	Conversão
		derivada	primária		
Indução magnética	B	tesla (Wb/m <sup>2</sup> )	kg / s-C	gauss	1 Wb/m <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> gauss
Campo magnético	H	amp-volta/m	C/ m-s	oersted	1 amp-volta/m = 4 $\pi$ x 10 <sup>-3</sup> oersted
Magnetização	M	amp-volta/m	C/m-s	maxwell/cm <sup>2</sup>	1 amp-volta/m = 4 $\pi$ x 10 <sup>-3</sup> maxwell/cm <sup>2</sup>
Permeabilidade magnética	$\mu$	henry/m Wb / amp m	kg m / C <sup>2</sup>	sem unidade	4 $\pi$ x 10 <sup>-7</sup> henry/m = 1 emu
Permeabilidade relativa	$\mu_r$	sem unidade	sem unidade	sem unidade	
Susceptibilidade magnética	$\chi$	sem unidade	sem unidade	sem unidade	

## DIPOLOS E MOMENTOS MAGNÉTICOS

- Uma espira de corrente pode ser representada por um **DIPOLO MAGNÉTICO**. Um dipolo magnético, por sua vez, pode ser descrito pelo vetor **MOMENTO DE DIPOLO MAGNÉTICO**.

Exemplos:

- A magnitude do momento de dipolo magnético  $m_e$  de uma espira de área  $A$  que transporta uma corrente  $I$  é  $m_e = I A$ .
- A magnitude do momento de dipolo magnético  $m_i$  correspondente a um ímã composto por dois polos magnéticos de intensidade  $p$  e separados por uma distância  $d$  é  $m_i = p d$ .
- É possível mostrar que campos magnéticos idênticos podem ser produzidos por uma espira de corrente e por um ímã. Assim, um dipolo magnético pode ser considerado como sendo um ímã.

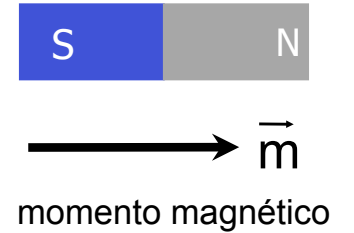


- O **TORQUE** num dipolo magnético de momento  $\vec{m}$  sob a ação de um campo magnético  $\vec{H}$  é  $\vec{\tau} = \vec{m} \wedge \mu_0 \vec{H}$ .
- Quando imerso em um campo magnético, um dipolo tende a se orientar na direção do campo devido à ação do torque  $\vec{\tau}$ .

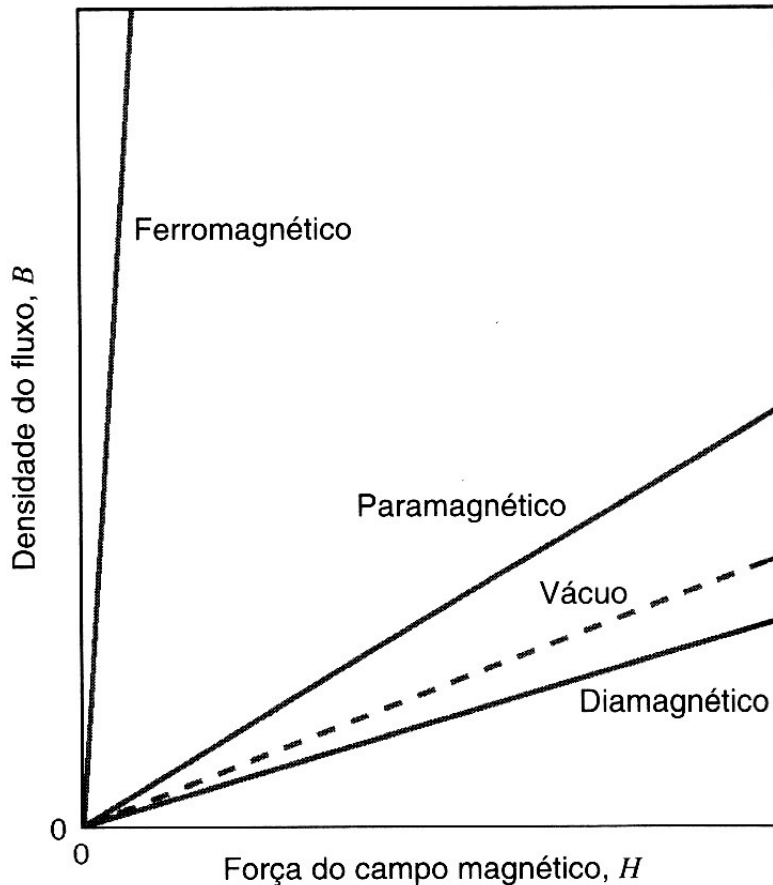


# O MAGNETISMO DOS MATERIAIS

- O momento angular (orbital e de spin) dos elétrons dos átomos origina dipolos magnéticos microscópicos. Esses dipolos permitem associar momentos magnéticos aos átomos, que podem, então, ser pensados como se fossem ímãs microscópicos.



Comportamento B vs. H, para H pequeno.

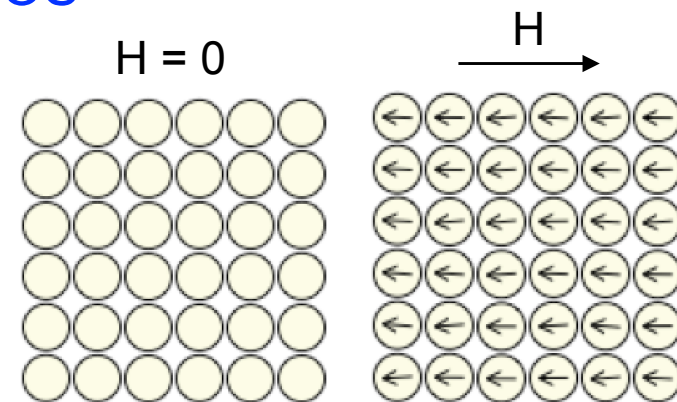


- A **MAGNETIZAÇÃO** de um material é definida como sendo o momento de dipolo magnético de seus átomos por unidade de volume.  
Unidades: Ampere.metro<sup>2</sup> / metro<sup>3</sup> = Ampere / metro
- Dependendo da origem dos dipolos magnéticos e da natureza da interação entre eles, os materiais podem ser classificados em uma das seguintes categorias:
  - DIAMAGNÉTICOS
  - PARAMAGNÉTICOS
  - FERROMAGNÉTICOS
  - ANTIFERROMAGNÉTICOS
  - FERRIMAGNÉTICOS
- Nos concentraremos nesta aula no caso dos materiais ferromagnéticos.



## MATERIAIS DIAMAGNÉTICOS

- Nos **MATERIAIS DIAMAGNÉTICOS** a magnetização deve-se exclusivamente ao momento angular orbital eletrônico induzido, portanto, existente apenas na presença de um campo magnético externo  $H$ .



- Esses materiais apresentam magnetização muito fraca, de mesma direção e de sentido oposto ao de  $H$  (dipolos magnéticos alinhados na mesma direção e em sentido oposto ao de  $H$ ). Dessa forma, o campo magnético no interior do material é um pouco menor do que o campo magnético externo.

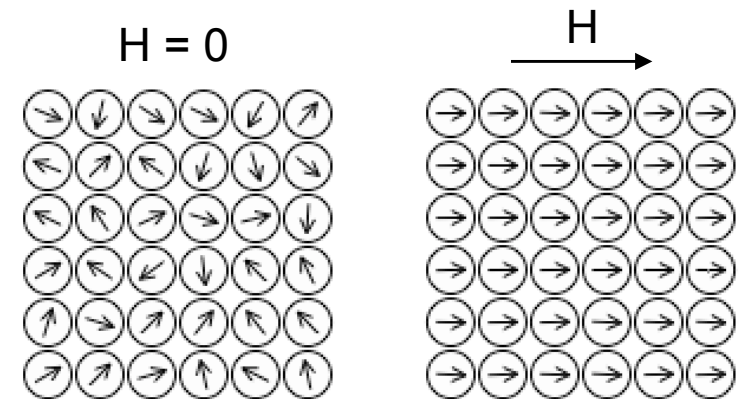
$$M = \chi_m H \Rightarrow \chi_m < 0 \text{ e muito pequeno (magnitude da ordem } 10^{-5} \text{ a } 10^{-3}).$$

$$\chi_m = \mu_r - 1 \text{ e } \chi_m < 0 \Rightarrow \mu_r = (\mu / \mu_0) < 1 \text{ e } \mu < \mu_0 .$$

- Materiais diamagnéticos são repelidos por ímãs, ou seja, quando sujeitos a campos  $H$  não uniformes são forçados a se afastar das regiões de campos mais intensos. Propriedades diamagnéticas são essencialmente independentes da temperatura do material.

- Nos **MATERIAIS PARAMAGNÉTICOS**, os átomos ou moléculas constituintes possuem momento de dipolo magnético permanente, resultante do momento angular de spin dos elétrons desemparelhados. Na ausência de  $H$ , as direções dos momentos de dipolo são aleatórias e o campo produzido pelo material é nulo. Nesses materiais, não ocorre um acoplamento magnético atômico porque a energia térmica dos átomos é mais significativa, governando o movimento local vibratório dos átomos.

- Quando um campo  $H$  é aplicado sobre um material paramagnético, os momentos de dipolo magnético dos átomos ou moléculas tendem a se alinhar por rotação na mesma direção e sentido de  $H$ . Esses materiais apresentam magnetização bastante fraca, de mesma direção e sentido de  $H$ , sendo o campo magnético no seu interior um pouco maior do que  $H$ .



$$M = \chi_m H \Rightarrow \chi_m > 0 \text{ e muito pequeno (magnitude da ordem } 10^{-5} \text{ a } 10^{-2}).$$

$$\chi_m = \mu_r - 1 \text{ e } \chi_m > 0 \Rightarrow \mu_r = (\mu / \mu_0) > 1 \text{ e } \mu > \mu_0 .$$

- O grau de alinhamento dos dipolos magnéticos com  $H$ , depende fundamentalmente da intensidade de  $H$  e da temperatura do material. Quanto mais baixa a temperatura, menor a energia térmica, e menos intenso é o campo necessário para atingir um dado grau de alinhamento. Tipicamente,  $\mu_r < 2$ .

**Table 20.2 Room-Temperature Magnetic Susceptibilities for Diamagnetic and Paramagnetic Materials**

<i>Diamagnetics</i>		<i>Paramagnetics</i>	
<i>Material</i>	<i>Susceptibility</i> $\chi_m$ (volume) (SI units)	<i>Material</i>	<i>Susceptibility</i> $\chi_m$ (volume) (SI units)
Aluminum oxide	$-1.81 \times 10^{-5}$	Aluminum	$2.07 \times 10^{-5}$
Copper	$-0.96 \times 10^{-5}$	Chromium	$3.13 \times 10^{-4}$
Gold	$-3.44 \times 10^{-5}$	Chromium chloride	$1.51 \times 10^{-3}$
Mercury	$-2.85 \times 10^{-5}$	Manganese sulfate	$3.70 \times 10^{-3}$
Silicon	$-0.41 \times 10^{-5}$	Molybdenum	$1.19 \times 10^{-4}$
Silver	$-2.38 \times 10^{-5}$	Sodium	$8.48 \times 10^{-6}$
Sodium chloride	$-1.41 \times 10^{-5}$	Titanium	$1.81 \times 10^{-4}$
Zinc	$-1.56 \times 10^{-5}$	Zirconium	$1.09 \times 10^{-4}$

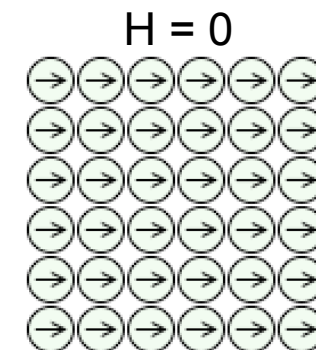
Referência: W.D. Callister e D.G. Rethwisch em “Materials Science and Engineering: An Introduction”, Wiley 8<sup>th</sup> ed, 2010, pág. 807.

## MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

- **MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS** possuem um momento de dipolo magnético permanente e manifestam magnetizações muito grandes e permanentes, mesmo na ausência de H. Suas propriedades representam o **FERROMAGNETISMO**, tendo como valores típicos:

$$10^3 \approx \chi_m \approx 10^6 \text{ e } \mu_r > 100.$$

- Os momentos de dipolo magnético permanente dos átomos ou moléculas resultam do momento angular de spins não cancelados, ou seja, resultam da existência de elétrons desemparelhados. Observa-se, em escala atômica, mesmo na ausência de H, um acoplamento entre os momentos de dipolo magnético atômicos.
- Além disso, no caso de materiais que nunca foram expostos a campos magnéticos externos, observa-se, para volumes grandes em relação ao volume atômico, uma espécie de rede magnética, cujas células são denominadas **DOMÍNIOS MAGNÉTICOS**. Os domínios magnéticos se caracterizam pelo alinhamento cooperativo entre os momentos de dipolo magnético atômicos em todo seu volume (**MAGNETIZAÇÃO DE SATURAÇÃO**). Também, possuem tamanhos, formas e direções de suas respectivas magnetizações, tais que, o campo magnético produzido pelo corpo seja nulo.

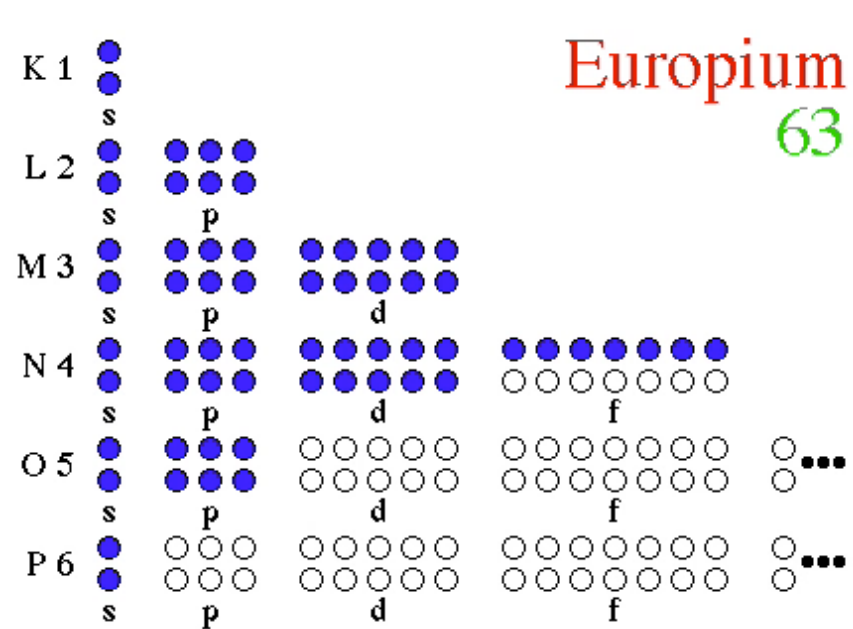
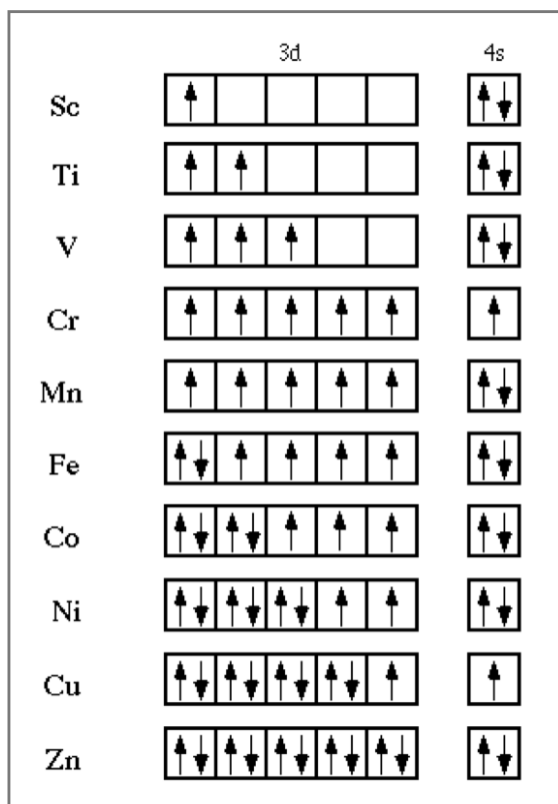


+ info

## MATERIAIS ANTIMAGNÉTICOS E FERRIMAGNÉTICOS

- Nos **MATERIAIS ANTIFERROMAGNÉTICOS** ocorre um acoplamento entre momentos de dipolos magnéticos atômicos de direções opostas, que leva a um cancelamento completo da magnetização do material. Exemplos: Cr, Mn, MnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CoO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Nos **MATERIAIS FERRIMAGNÉTICOS** também ocorre um acoplamento entre momentos de dipolos magnéticos atômicos de direções opostas, mas que agora levam a um cancelamento incompleto da magnetização do material. Exemplos: ferritas cúbicas compostas de óxidos de ferro, Al, Co, Ni, Mn, Zn, algumas ferritas hexagonais.

- São materiais ferromagnéticos na forma elementar alguns **metais de transição** (orbital 3d não preenchido) e algumas **terras raras** (orbital 4f não preenchido). Ferromagnetismo também é observado em **diversos compostos** (óxidos, carbonetos, nitretos etc).

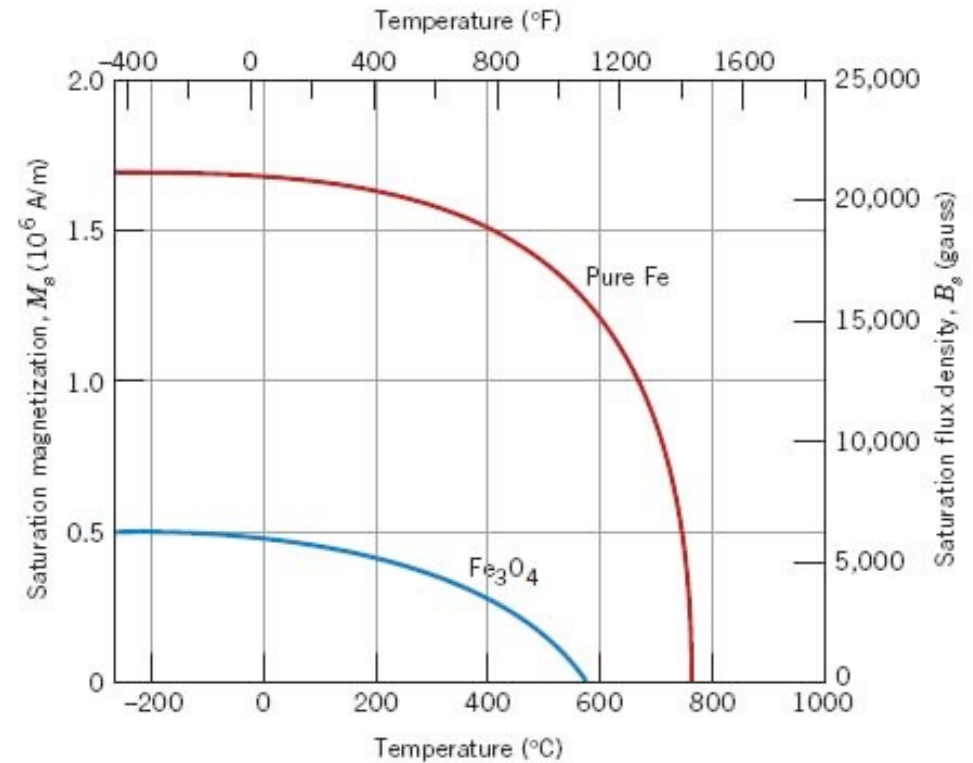


A animação "Electron\_Orbitals.mov" mostra o preenchimento dos orbitais eletrônicos para os elementos da tabela periódica.

- A magnitude do momento de dipolo magnético associada ao spin de um elétron é conhecida como **MAGNETON DE BOHR** e vale  $9,27 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2$ .

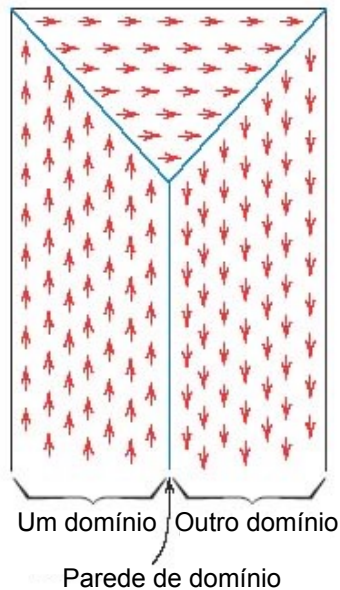
# A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO

- À medida que a temperatura de um material aumenta, a energia vibracional térmica associada aos seus átomos também aumenta.
- Nos materiais ferromagnéticos, as forças de acoplamento entre os momentos de dipolos magnéticos atômicos adjacentes são enfraquecidas pelo movimento vibracional térmico dos átomos, levando assim a uma diminuição na magnitude da **magnetização de saturação** com o aumento da temperatura.
- A magnetização de saturação tende a um valor máximo na temperatura 0K. Com o aumento da temperatura seu valor diminui gradualmente até que abruptamente torna-se nulo numa temperatura denominada **TEMPERATURA DE CURIE**.
- Materiais ferromagnéticos apresentam comportamento paramagnético para temperaturas acima da temperatura de Curie.

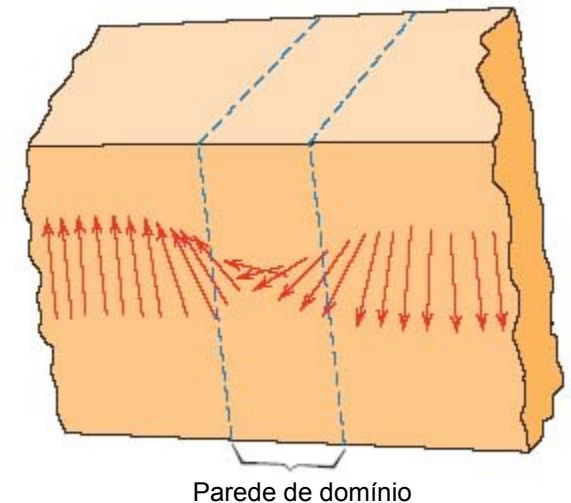


Material	Temperatura de Curie (°C)
Ferro	768
Cobalto	1120
Nickel	335
$Fe_3O_4$	585

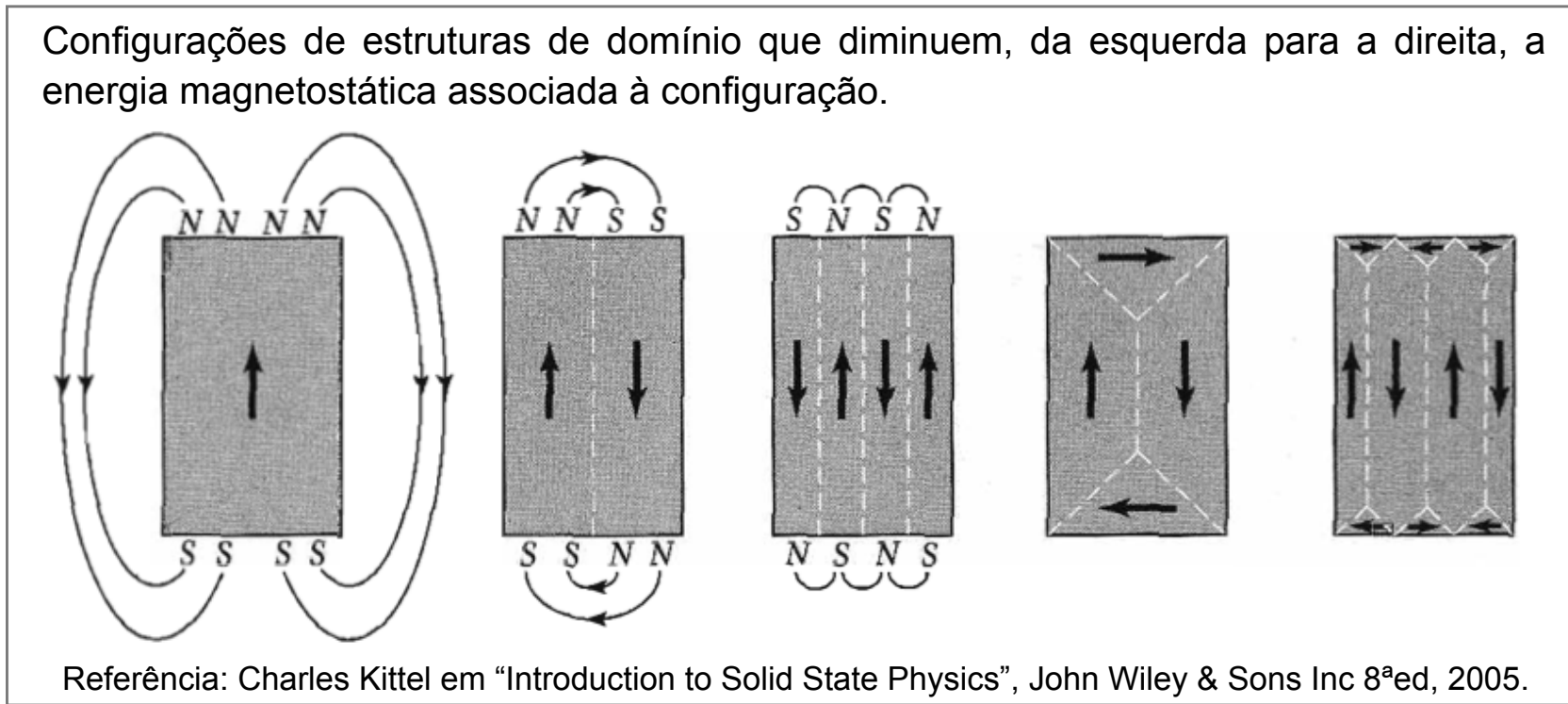




- Como consequência da interação cooperativa entre os momentos de dipolo magnético atômicos nos domínios, os momentos encontram-se alinhados uns com os outros em cada domínio. Dessa forma o material apresenta nessas regiões sua magnetização máxima, a chamada **MAGNETIZAÇÃO DE SATURAÇÃO ( $M_s$ )**.
- O tamanho e forma dos domínios depende das dimensões do corpo, de sua geometria, do material ferromagnético de que é fabricado, dentre outros. Os domínios podem ser pequenos (dimensões nanométricas), ou relativamente grandes, atingindo tamanhos sub-milimétricos ( $10^{17}$  a  $10^{21}$  átomos ou moléculas).
- Domínios adjacentes estão separados por **PAREDES DE DOMÍNIO** (ou **CONTORNOS DE DOMÍNIO**), nos quais a direção da magnetização varia gradualmente, geralmente por  $180^\circ$  ou  $90^\circ$ . Associa-se à parede de domínio uma densidade de energia, energia por unidade de área ( $J/m^2$ ).
- A magnitude do campo  $M$  gerado por um corpo sólido (como um todo) é a soma vetorial das magnetizações de todos os domínios, onde a contribuição de cada domínio é ponderada de acordo com a sua fração volumétrica no corpo. No caso de corpos, não previamente magnetizados, essa soma é nula.



- A força motriz para a formação das configurações das estruturas de domínios magnéticos (distribuição de tamanhos e formas dos domínios) resulta da tendência dos materiais a minimizarem sua ENERGIA LIVRE; uma energia magnética alta está associada a um corpo magneticamente saturado (formado por um único domínio), enquanto a formação de domínios, geralmente, leva à diminuição da energia magnética. A principal contribuição para essa energia magnética é a ENERGIA MAGNETOSTÁTICA, resultante da presença de um campo desmagnetizante ao redor do corpo em sua região externa. A ENERGIA LIVRE MÍNIMA de um corpo, não previamente magnetizado, corresponde às estruturas de domínio que anulam a energia magnetostática.



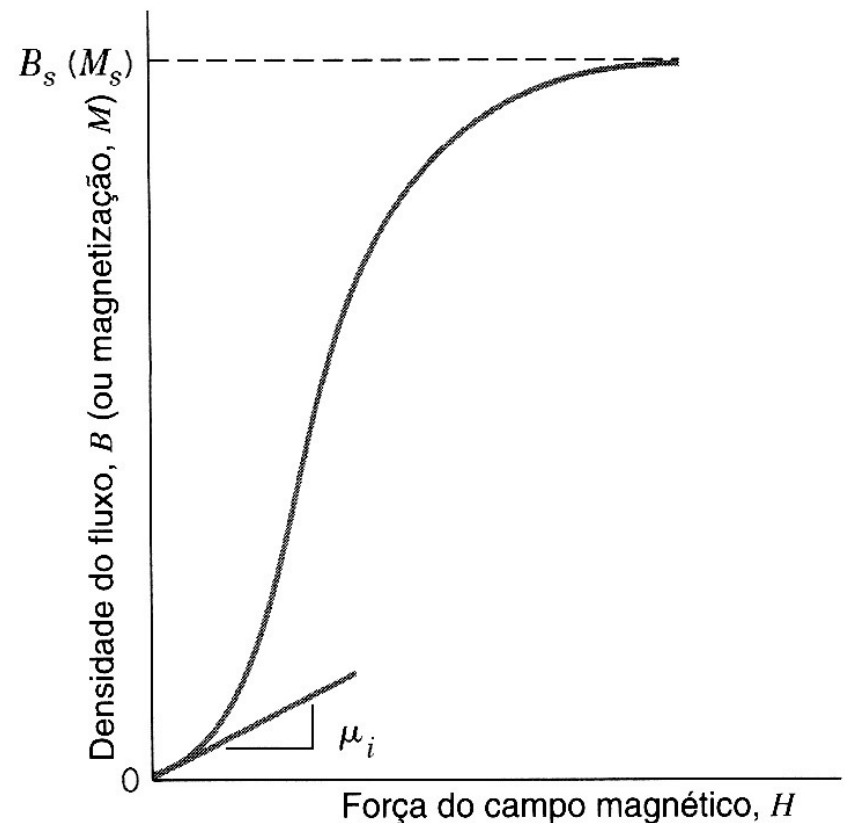
- Note que não há correlações simples entre domínios magnéticos e grãos, sendo que, em materiais policristalinos, cada grão pode conter mais que um domínio magnético.



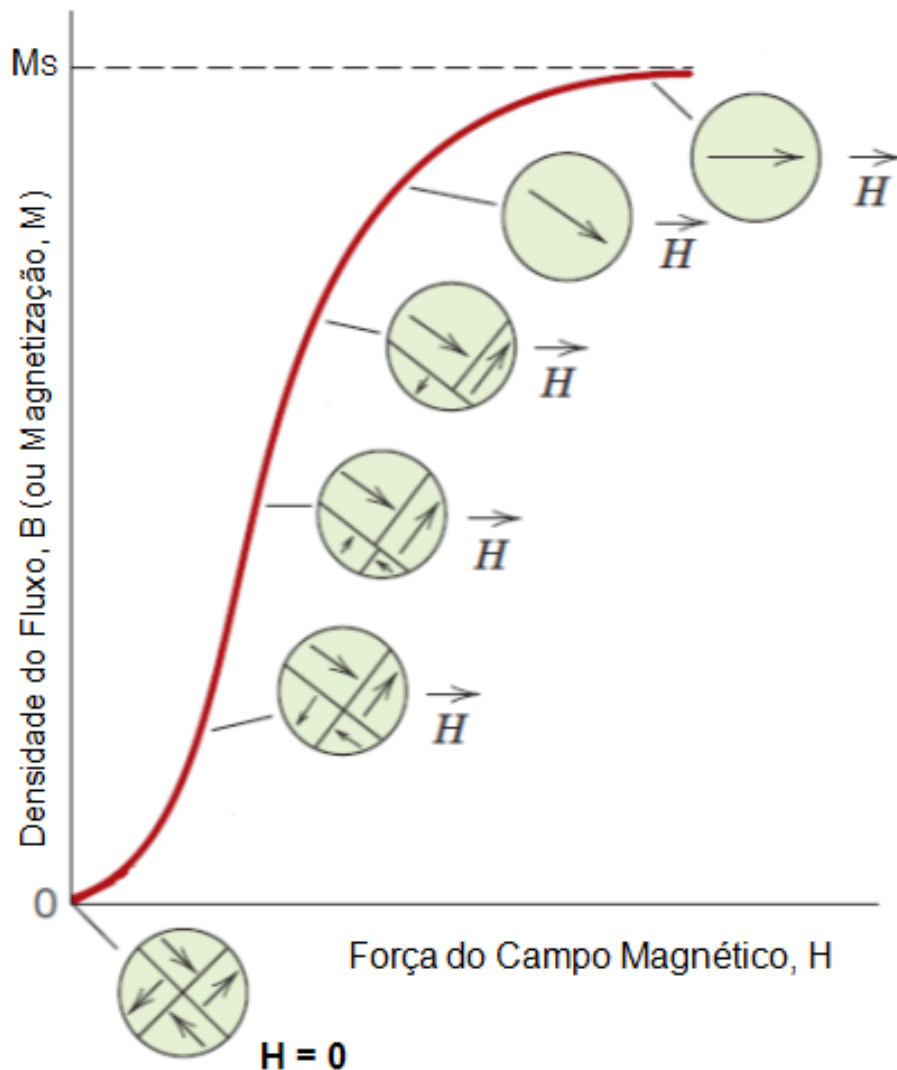
## CURVA DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL

- B e H não são linearmente proporcionais para os materiais ferromagnéticos.
- Uma vez que a permeabilidade,  $\mu$ , é dada pelo coeficiente angular da curva  $B = f(H)$ , ou seja,  $\mu = dB/dH$ , pode-se observar que  $\mu$  varia e é dependente do valor de H.
- Ocasionalmente, a permeabilidade inicial  $\mu_i$  ( $dB/dH$  para  $H = 0$ ) é especificada como uma propriedade do material.
- A magnetização do corpo possui um valor máximo, a chamada **MAGNETIZAÇÃO DE SATURAÇÃO ( $M_s$ )** do corpo.
- Para materiais ferromagnéticos,  
 $M = \chi_m H$  e  $\chi_m \gg 1 \Rightarrow M \gg H$ .  
Portanto,  $B = \mu_0 H + \mu_0 M \Rightarrow B \approx \mu_0 M$ .

Curva obtida para B (ou M) em função do campo externo H, para uma amostra, inicialmente desmagnetizada, à medida que a intensidade de H aumenta.



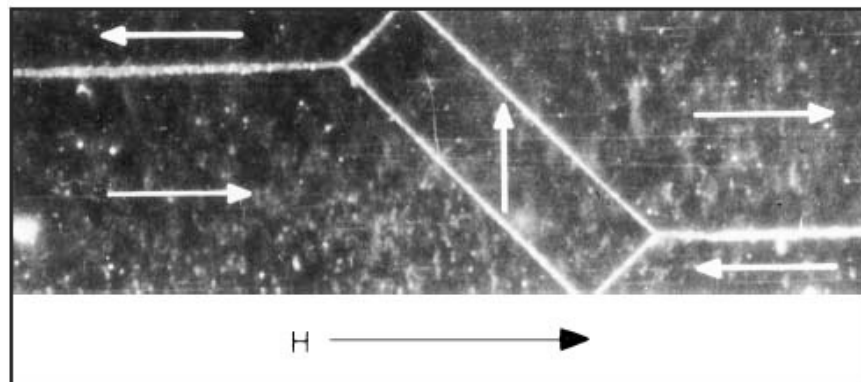
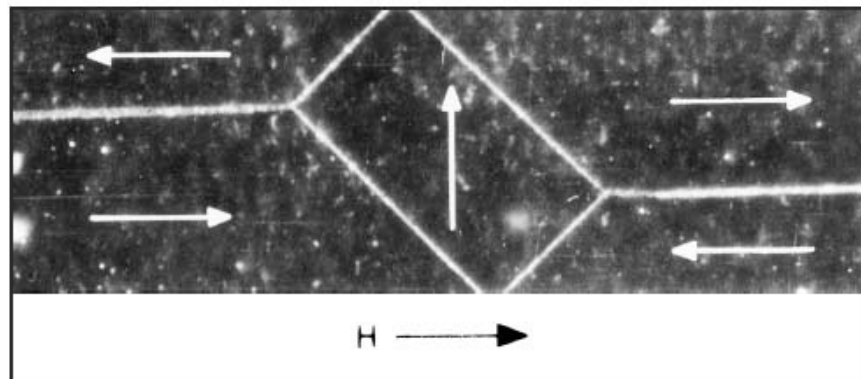
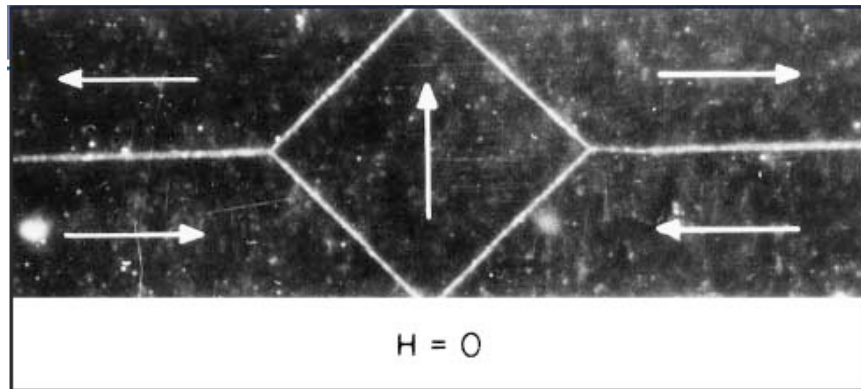
Essa última equação justifica o fato de ser habitual o uso indistinto de B e M no ferromagnetismo, apesar destes representarem grandezas físicas distintas.



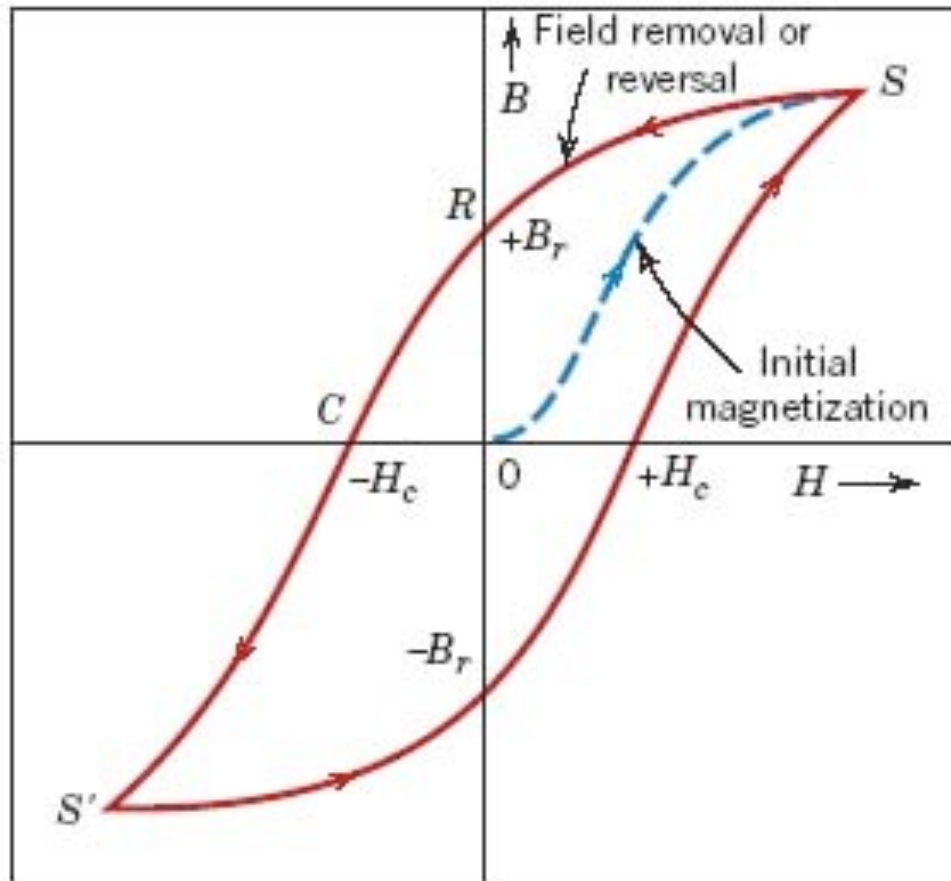
À medida que um campo externo  $H$  de magnitude crescente é aplicado, os domínios mudam de forma e de tamanho mediante o movimento das paredes de domínio.

- Inicialmente, os momentos dos domínios constituintes do corpo estão orientados de tal modo que a magnetização líquida associada ao corpo é nula.
- À medida que um campo  $H$  crescente é aplicado, os domínios que estão favoravelmente orientados em relação à direção de  $H$  crescem às custas dos domínios com orientações desfavoráveis.
- Esse processo continua com o aumento de  $H$ , até que o corpo seja constituído por um único domínio magnético (um monodomínio) e com magnetização  $M_s$  praticamente alinhada (direção e sentido) com  $H$ .
- A **SATURAÇÃO MAGNÉTICA** do corpo é atingida quando  $M_s$ , por meio de rotação, fica orientado na direção de  $H$ .

## ESTRUTURA DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS



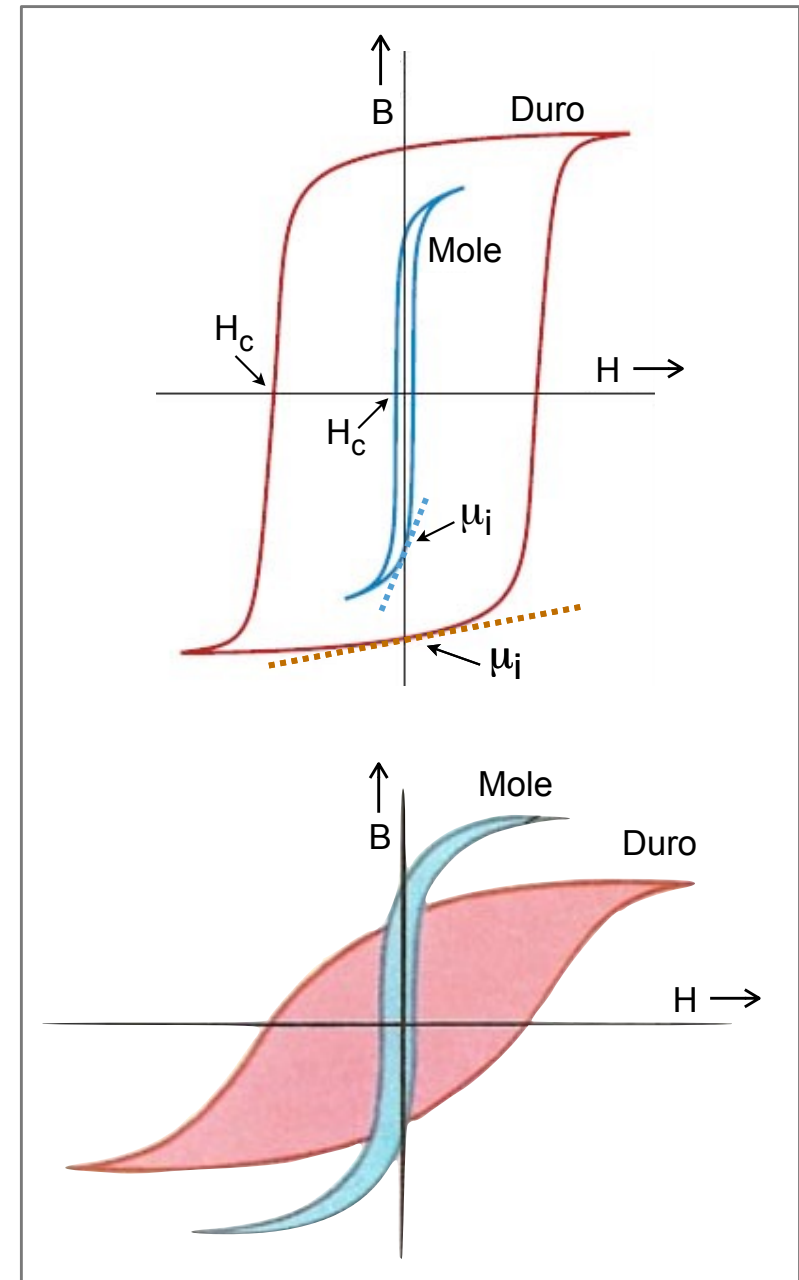
- Fotomicrografias de um monocristal de ferro, mostrando os domínios magnéticos e suas alterações de forma, à medida que um campo magnético  $H$  é aplicado.
- A direção da magnetização de cada domínio está indicada por uma seta.
- Aqueles domínios que estão orientados favoravelmente em relação a  $H$  crescem à custa dos domínios que estão orientados desfavoravelmente.



Indução magnética ( $B$ ) em função do campo magnético externo ( $H$ ) para um material ferromagnético saturado ciclicamente em um campo  $H$  positivo e negativo (pontos  $S$  e  $S'$ ). O **CICLO DE HISTERESE** é representado pela **CURVA DE HISTERESE** (linha sólida vermelha); a linha azul tracejada indica a curva de magnetização inicial.

- Se a partir da saturação inicial (ponto  $S$ ) o campo  $H$  passa a ser reduzido, a curva de magnetização não retorna seguindo seu trajeto original. Produz-se um efeito de **HISTERESE**, onde  $B$  se defasa em relação a  $H$ , diminuindo a uma taxa mais baixa.
- O efeito de histerese é gerado pela **resistência à movimentação de paredes de domínio** causada pela presença de defeitos no material cristalino.
- A **REMANÊNCIA** ( $B_r$ ) corresponde a indução magnética  $B$  residual na amostra após a retirada do campo  $H$  (ou seja, quando  $H = 0$ ).
- A **COERCIVIDADE** ( $H_c$ ) corresponde ao campo magnético  $H$  necessário para reduzir o campo  $B$  no interior da amostra a zero.

- A área compreendida pela **CURVA DE HISTERESE** corresponde a uma perda de **energia por unidade de volume**, por ciclo de magnetização-desmagnetização, liberada na forma de calor  $\Rightarrow$  perda por histerese.
- Materiais **MAGNETICAMENTE MOLES** **perdem pouca energia** por ciclo e são usados, por exemplo, em núcleos de transformadores.
- Materiais **MAGNETICAMENTE MOLES** apresentam **alta permeabilidade inicial  $\mu_i$**  e **baixa coercividade  $H_c$**  [menor que  $1 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$  ( $12,5 \text{ Oe}$ )].





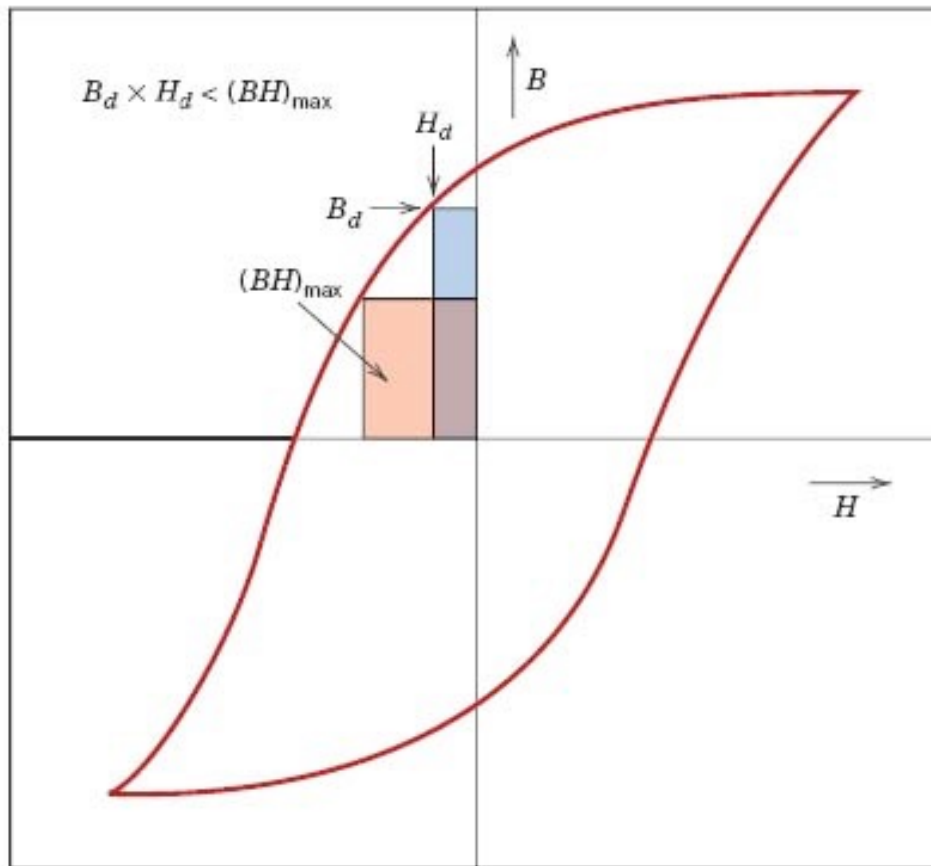
**Table 20.5** Typical Properties for Several Soft Magnetic Materials

<i>Material</i>	<i>Composition (wt %)</i>	<i>Initial Relative Permeability <math>\mu_i</math></i>	<i>Saturation Flux Density <math>B_s</math> [tesla (gauss)]</i>	<i>Hysteresis Loss/Cycle [<math>J/m^3</math> (erg/cm<sup>3</sup>)]</i>	<i>Resistivity <math>\rho</math> (<math>\Omega \cdot m</math>)</i>
Commercial iron ingot	99.95Fe	150	2.14 (21,400)	270 (2700)	$1.0 \times 10^{-7}$
Silicon–iron (oriented)	97Fe, 3Si	1400	2.01 (20,100)	40 (400)	$4.7 \times 10^{-7}$
45 Permalloy	55Fe, 45Ni	2500	1.60 (16,000)	120 (1200)	$4.5 \times 10^{-7}$
Supermalloy	79Ni, 15Fe, 5Mo, 0.5Mn	75,000	0.80 (8000)	—	$6.0 \times 10^{-7}$
Ferroxcube A	48MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , 52ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1400	0.33 (3300)	~40 (~400)	2000
Ferroxcube B	36NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , 64ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	650	0.36 (3600)	~35 (~350)	$10^7$

**Source:** Adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals*, Vol. 3, 9th edition, D. Benjamin (Senior Editor), American Society for Metals, 1980.

Referência: W.D. Callister e D.G. Rethwisch em “Materials Science and Engineering: An Introduction”, Wiley 8<sup>th</sup> ed, 2010, pág. 822.

- IMÃS PERMANENTES.
- Altas remanência, coercividade [maior que  $10 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$  (125 Oe)] e indução de saturação correspondem a altas perdas de energia por histerese.



- Uma figura de mérito útil,  $(BH)_{\max}$ , corresponde ao valor máximo do produto entre B e H, medido no segundo quadrante do ciclo de histerese.  $(BH)_{\max}$  representa a maior área que pode ser inserida no quadrante considerado, correspondendo a um ponto de máximo na densidade de energia magnética.
- Utiliza-se  $(BH)_{\max}$  como uma medida da energia necessária para desmagnetizar um ímã. Valores maiores de  $(BH)_{\max}$  correspondem a energias de desmagnetização maiores.
- Note que a capacidade de controlar  $H_c$  é de importância vital para aplicações tecnológicas. Dificultar a movimentação das paredes de domínio, aumenta  $H_c$  enquanto facilitar sua movimentação, diminui  $H_c$ .

**Table 20.6** Typical Properties for Several Hard Magnetic Materials

<i>Material</i>	<i>Composition (wt%)</i>	<i>Remanence <math>B_r</math> [tesla (gauss)]</i>	<i>Coercivity <math>H_c</math> [amp-turn/m (Oe)]</i>	<i><math>(BH)_{max}</math> [kJ/m<sup>3</sup> (MGOe)]</i>	<i>Curie Temperature <math>T_c</math> [°C (°F)]</i>	<i>Resistivity <math>\rho</math> (<math>\Omega \cdot m</math>)</i>
Tungsten steel	92.8 Fe, 6 W, 0.5 Cr, 0.7 C	0.95 (9500)	5900 (74)	2.6 (0.33)	760 (1400)	$3.0 \times 10^{-7}$
Cunife	20 Fe, 20 Ni, 60 Cu	0.54 (5400)	44,000 (550)	12 (1.5)	410 (770)	$1.8 \times 10^{-7}$
Sintered alnico 8	34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti	0.76 (7600)	125,000 (1550)	36 (4.5)	860 (1580)	—
Sintered ferrite 3	BaO–6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.32 (3200)	240,000 (3000)	20 (2.5)	450 (840)	$\sim 10^4$
Cobalt rare earth 1	SmCo <sub>5</sub>	0.92 (9200)	720,000 (9,000)	170 (21)	725 (1340)	$5.0 \times 10^{-7}$
Sintered neodymium– iron–boron	Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	1.16 (11,600)	848,000 (10,600)	255 (32)	310 (590)	$1.6 \times 10^{-6}$

**Source:** Adapted from *ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Copyright © 1990 by ASM International. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.

Referência: W.D. Callister e D.G. Rethwisch em “Materials Science and Engineering: An Introduction”, Wiley 8<sup>th</sup> ed, 2010, pág. 824.



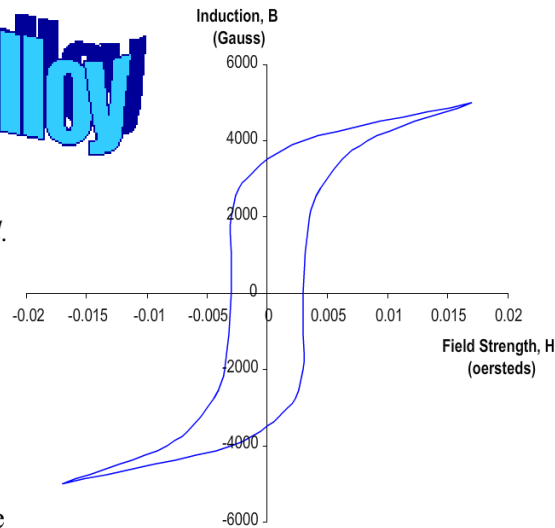
## EXEMPLOS DE CURVAS DE HISTERESE

### Supermalloy

Supermalloy is a *magnetically soft material*.

It has a high magnetic permeability and low coercivity.

Supermalloy is used in the manufacturing of components of radio engineering, telephony, and telemechanics instruments.

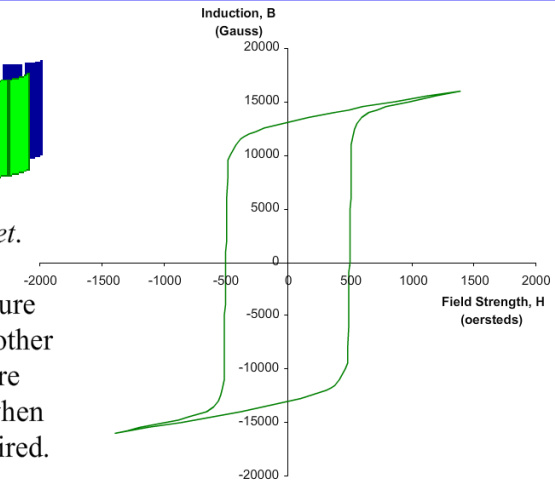


### Alcomax II

Alcomax II is a *hard magnet*.

It has a very good temperature coefficient compared with other permanent magnets therefore making it an ideal choice when a temperature range is required.

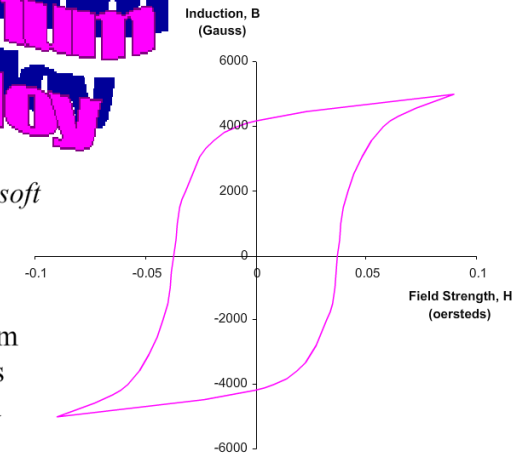
The principle applications are for triggering of proximity switches (reeds and hall sensors), horseshoe design permanent magnets for lifting, and entry door locks.

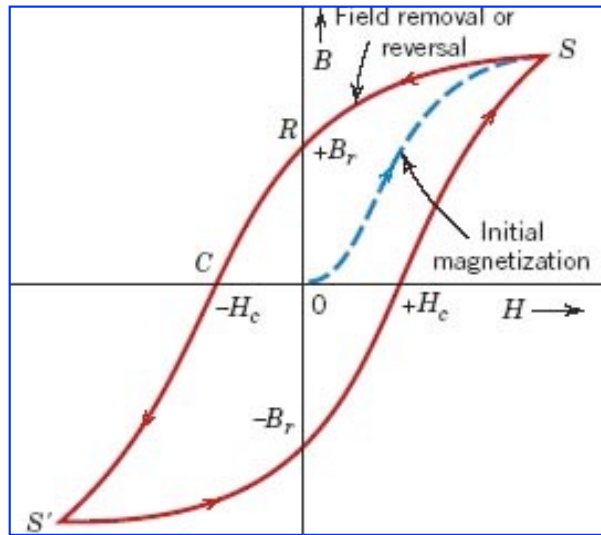


### Molybdenum Permalloy

Molybdenum permalloy is a *soft magnet*.

It is an alloy of 81% nickel, 17% iron and 2% molybdenum and was invented at Bell Labs in 1940. It provides improved inductive compensation of capacitive reactance in long distance telephone lines.

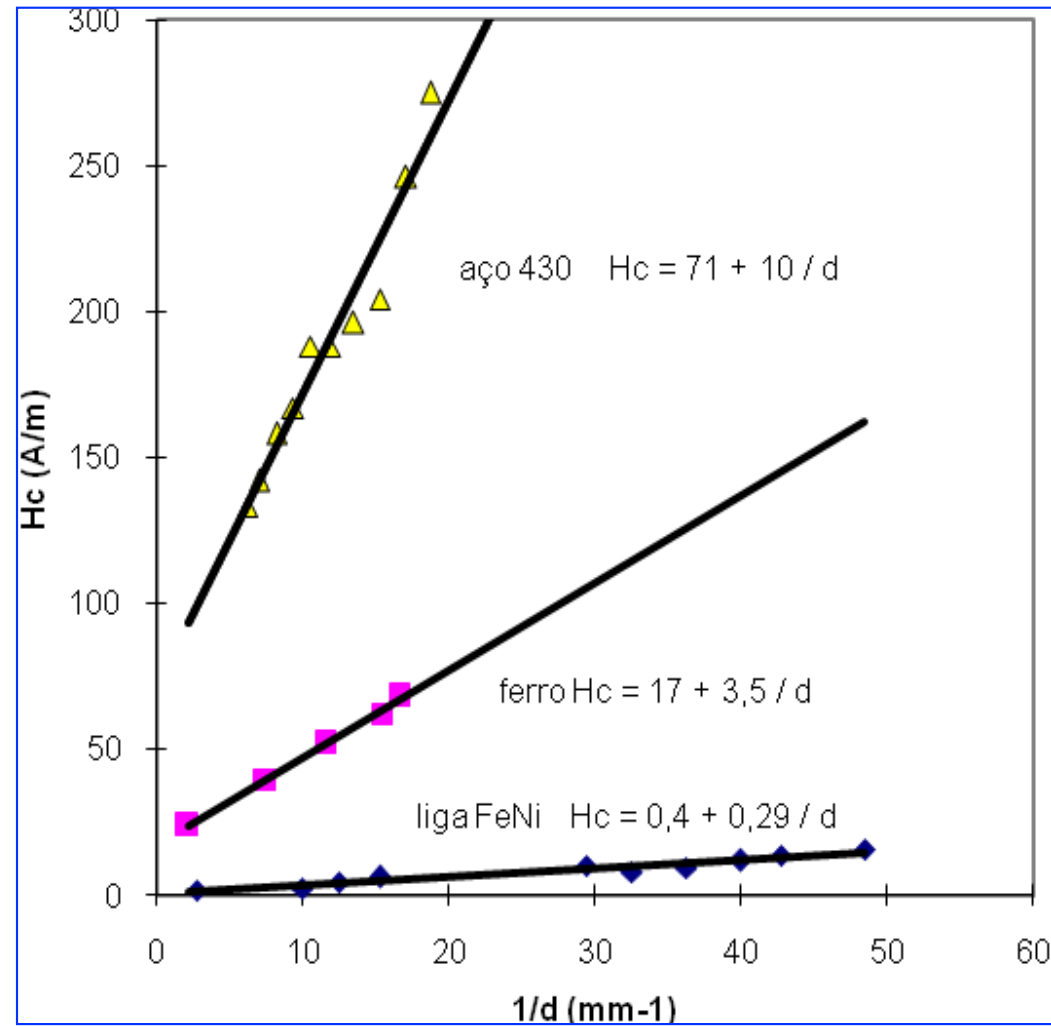




Quanto maior o tamanho de grão, menor a coercividade  $H_c$  e mais “magra” é a curva de histerese.

$$H_c = A + \frac{3\gamma}{J_s d}$$

- $\gamma$  é a energia da parede de domínio
- $J_s$  é a polarização de saturação
- $d$  é o diâmetro médio dos grãos



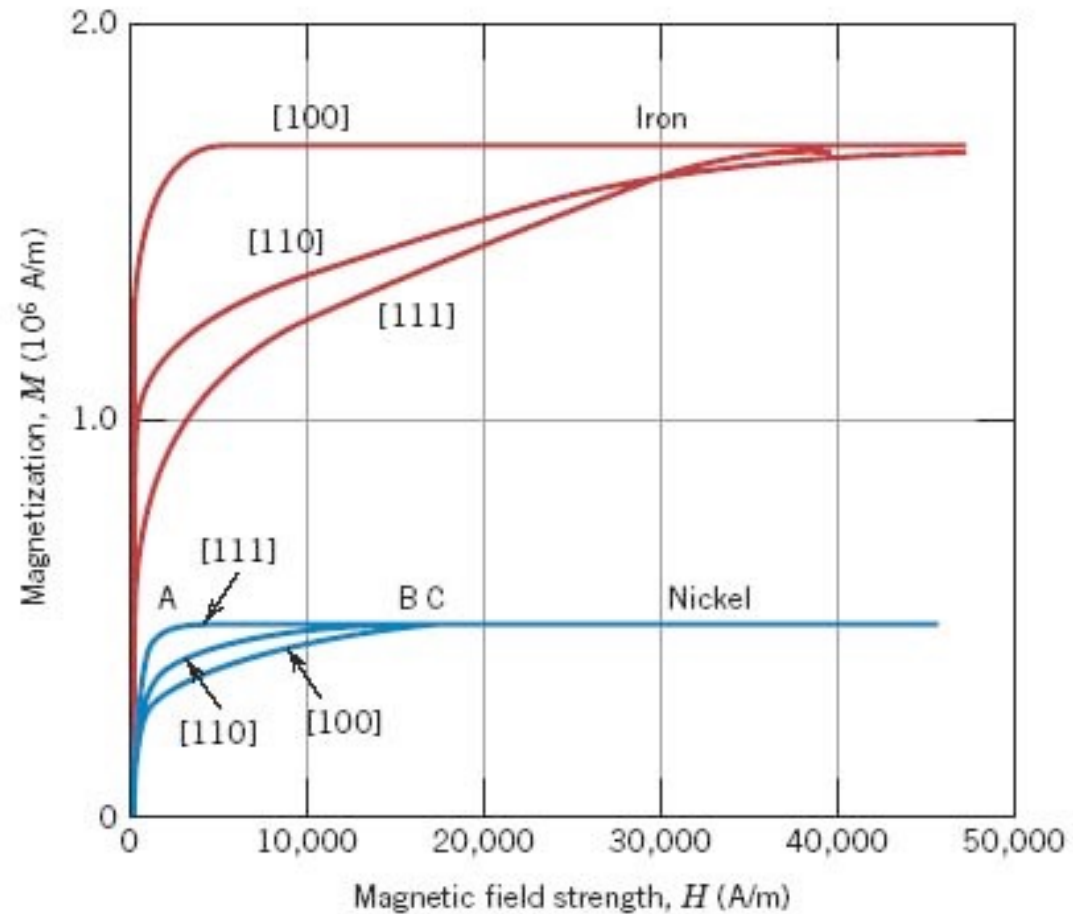
FeNi (Adler e Pfeifer, 1974)

Ferro (Yensen, 1930; Degauque e outros, 1982)

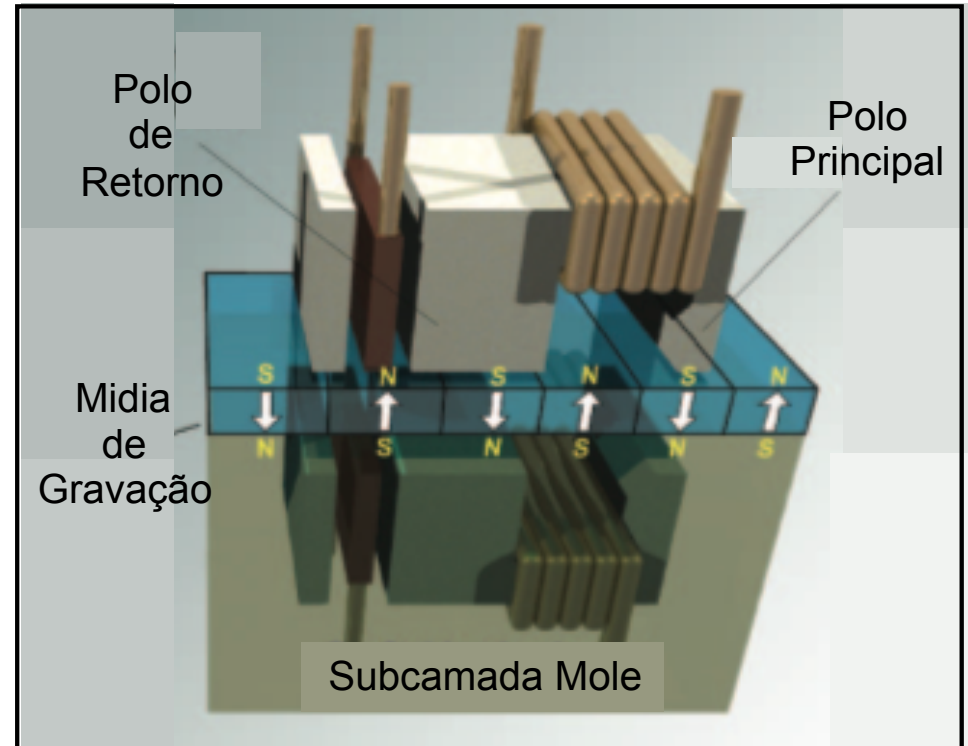
Aço inox 430 (Battistini, 1994)

# ANISOTROPIA MAGNÉTICA

- Várias características dos materiais influenciam a forma das curvas de histerese. Por exemplo:
  - ✓ monocristalino ou policristalino
  - ✓ orientação preferencial dos grãos em materiais policristalinos
  - ✓ presença de poros ou de partículas de uma segunda fase
  - ✓ temperatura, tensões mecânicas
- Na figura ao lado apresentamos curvas de  $M$  em função de  $H$  para duas amostras monocristalinas de níquel (CFC) e ferro (CCC). Os índices de Miller indicados na figura representam a direção de  $H$  em relação às orientações cristalográficas das amostras.
- A influência da direção de  $H$  no comportamento de  $M$  é consequência da **ANISOTROPIA MAGNETO-CRISTALINA**.
- Os índices de Miller das **DIREÇÕES DE FÁCIL MAGNETIZAÇÃO** do níquel e do ferro são, respectivamente,  $[111]$  e  $[100]$ .



- Uma das aplicações modernas importantes dos materiais magnéticos é no armazenamento de informações nos discos rígidos de computadores onde a gravação magnética digital é utilizada.
- Características gerais dos discos rígidos portáteis comerciais de última geração em 2010:
  - ✓ Capacidade de gravação: 1,5 TB.
  - ✓ Massa aproximada do dispositivo: 180g.
- Características gerais em 2008:
  - (1) Discos rígidos portáteis de 320GB com mídias magnéticas perpendiculares:
    - ✓ Densidade de gravação areal : 250 Gb/pol<sup>2</sup>.
    - ✓ Área de um bit de informação: ~ 100nm x 20nm.
    - ✓ N° de grãos por bit de informação: ~ 50 a 100.
    - ✓ Diâmetro médio dos grãos: 8 nm.
  - (2) Densidades de gravação areal das mídias magnéticas perpendiculares:
    - ✓ Demonstrações de laboratório: entre 420 Gb/pol<sup>2</sup> e 600 Gb/pol<sup>2</sup> .
    - ✓ Limite superior previsto para a tecnologia: 1000 Gb/pol<sup>2</sup> (com grãos de áreas ligeiramente superiores a 8 nm<sup>2</sup>).



O limite inferior para o volume dos grãos na tecnologia de gravação magnética digital é definido pelo limite SUPERPARAMAGNÉTICO. Nesse limite, a energia associada ao momento magnético dos grãos se torna comparável com a energia térmica a temperatura ambiente e o armazenamento de informação não é mais confiável.

## PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

- O **momento angular** (orbital e de spin) dos elétrons dos átomos dá origem a **dipolos magnéticos** microscópicos. Aos **dipolos magnéticos** podem ser associados **momentos magnéticos**.
- A **propriedade magnética** do material é resultante das **interações** entre um campo magnético **H** e os **momentos dipolares magnéticos** dos seus átomos constituintes.
- A magnetização **M** de um material é definida como o **momento magnético** dos dipolos **por unidade de volume**.
- **Ferromagnetismo** é a propriedade dos materiais que permite **magnetizações grandes e permanentes**, observadas em alguns metais. Os **spins magnéticos** atômicos estão acoplados e **alinhados com os momentos de átomos adjacentes**.
- A força de acoplamento entre momentos de dipolos magnéticos enfraquece com o aumento da temperatura.
- Nos ferromagnéticos a magnetização **M** cresce com o aumento do campo magnético **H** até atingir sua saturação.
- O ciclo de histerese é obtido pela medida da indução magnética **B** (ou magnetização **M**) em função do campo magnético **H** aplicado até a saturação nos sentidos positivo e negativo (reverso). A área definida pela curva representa a energia de (des)magnetização por unidade de volume. A área compreendida no ciclo de histerese define os materiais magneticamente duros ou moles.
- A **magnetização varia** com o **tamanho do grão**, a **orientação cristalina**, presença de **defeitos** na estrutura cristalina, **temperatura** e **tensões mecânicas**.

## REFERÊNCIAS

### PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

- **Callister, W.D.** *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7<sup>th</sup> Ed. Wiley. 2007. Cap. 20, seções 1, 2, 4, 6, 7 a 10.
  - Obs.: outras edições do livro do Callister existentes nas bibliotecas da EP, em inglês ou português, também cobrem o conteúdo apresentado nesta Unidade. *Exemplo*: Callister, 5<sup>a</sup> ed, Capítulo 21: seções 1, 2, 4, 6, 7 a 9.
- **Ciêncianimada**, Animações “Magnetismo dos materiais” e “Curvas de magnetização inicial e de histerese”, 2011. <<http://ciencianimada.com.br>>
- **Ferromagnetic Materials**, DoITPoMS - Teaching & Learning Packages - University of Cambridge, 2008. <<https://doitpoms.admin.cam.ac.uk/tlplib/ferromagnetic/index.php>>
- **Jiles, D.** *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. 3<sup>a</sup> Ed., CRC., 2016.
- **Shackelford, J. F.** *Introduction to Materials Science for Engineers*. 8<sup>a</sup> Ed, Prentice-Hall Inc., 2015. Capítulo 14.
- **Cullity, B. D. e Graham, C. D.** *Introduction to Magnetic Materials*. 2<sup>a</sup> Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- **Faria, R. N. e Lima, L. F. C. P** *Introdução ao Magnetismo dos Materiais*. Editora Livraria da Física, 2005.