



# BC1105 Materiais e Suas Propriedades

## *3º Quadrimestre de 2016*

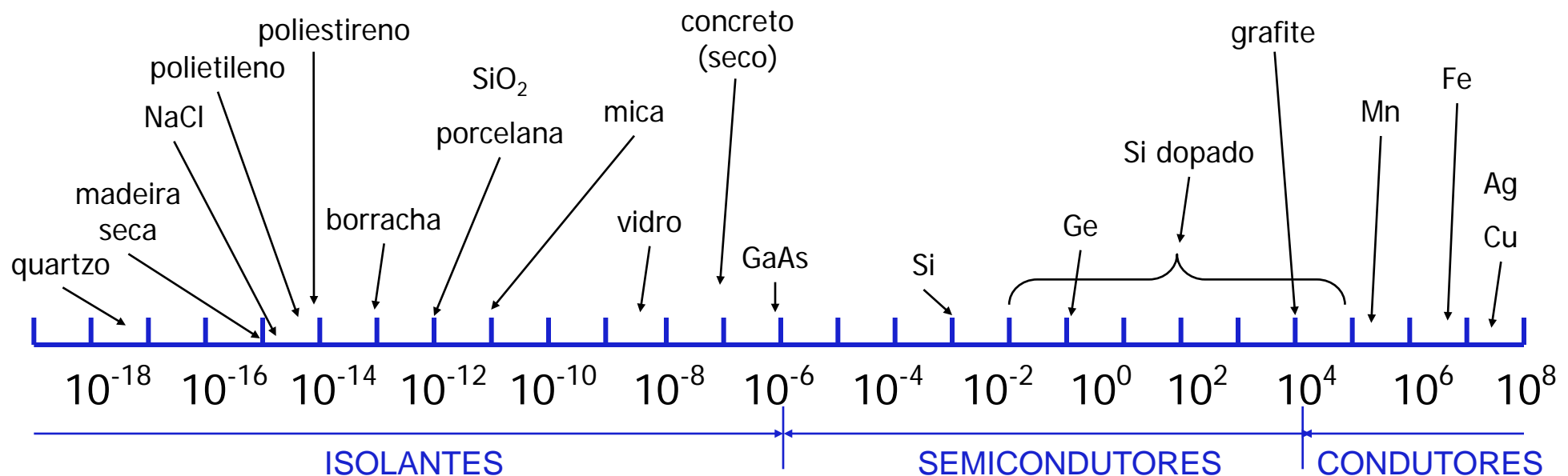
### **Propriedades Elétricas e Magnéticas**

***Erika Fernanda Prados***  
***erika.prados@ufabc.edu.br***

# 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  $\sigma$  em  $(\Omega.m)^{-1}$  de uma variedade de materiais à temperatura ambiente.*

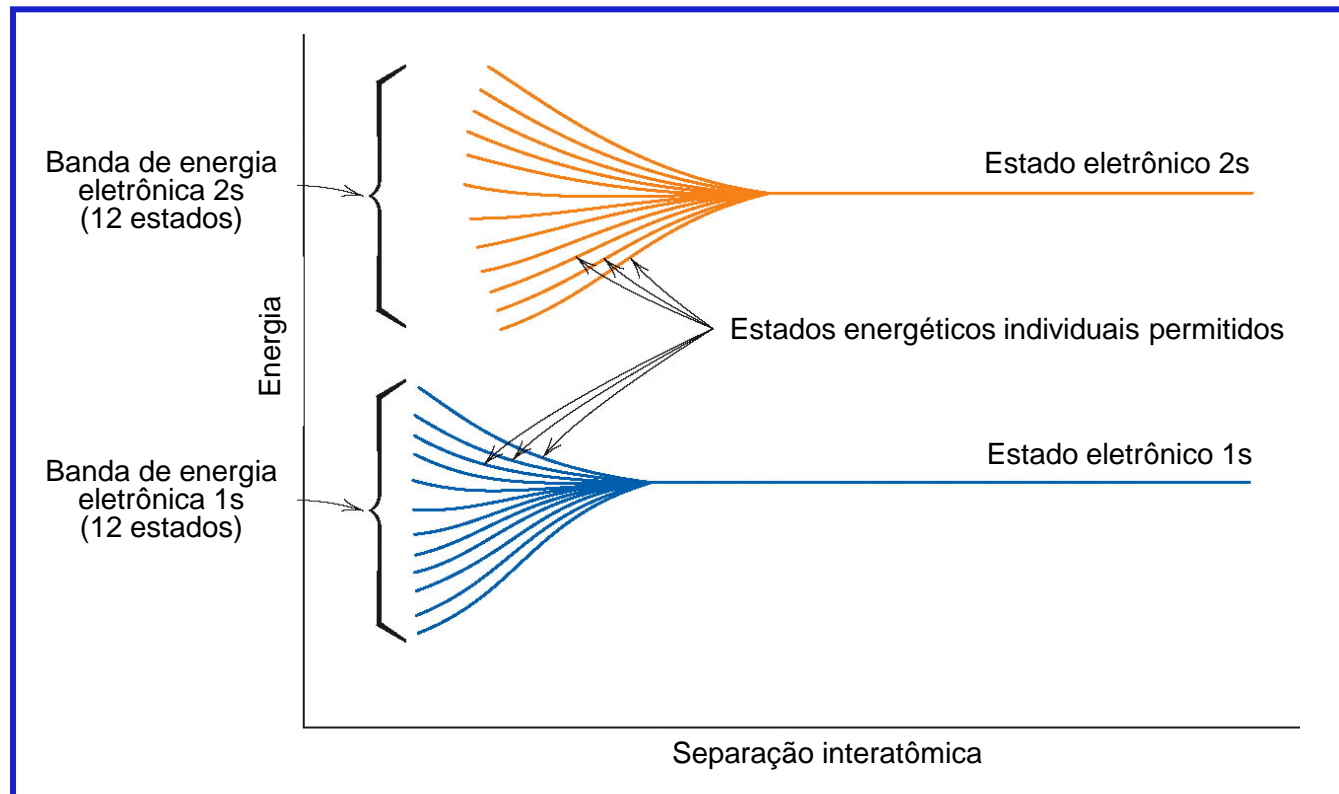


# CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

- O **MODELO DOS ELÉTRONS LIVRES** dos metais supõe que o material é composto por um gás de elétrons que se movem num retículo cristalino formado por íons pesados. Esse modelo prevê corretamente a forma funcional da lei de Ohm. No entanto, ele prevê incorretamente os valores observados experimentalmente para a condutividade elétrica. Por exemplo, para o cobre temos:  
 $\sigma_{\text{calculado}} = 5,3 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$  e  $\sigma_{\text{experimental}} = 59 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ .
- Para uma compreensão aprofundada das propriedades elétricas dos materiais precisamos considerar o caráter ondulatório dos elétrons e fazer uso de conceitos da mecânica quântica, mas isto está além do escopo desta disciplina.
- Na aula de hoje, explicaremos 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 NOS SÓLIDOS

- Gráfico esquemático da energia eletrônica em função da separação interatômica para um agregado de 12 átomos ( $N = 12$ ). Com a aproximação cada um dos estados atômicos 1s e 2s se divide para formar uma banda de energia eletrônica que consiste em 12 estados. Cada estado de energia é capaz de acomodar dois elétrons que devem possuir spins com sentidos opostos.

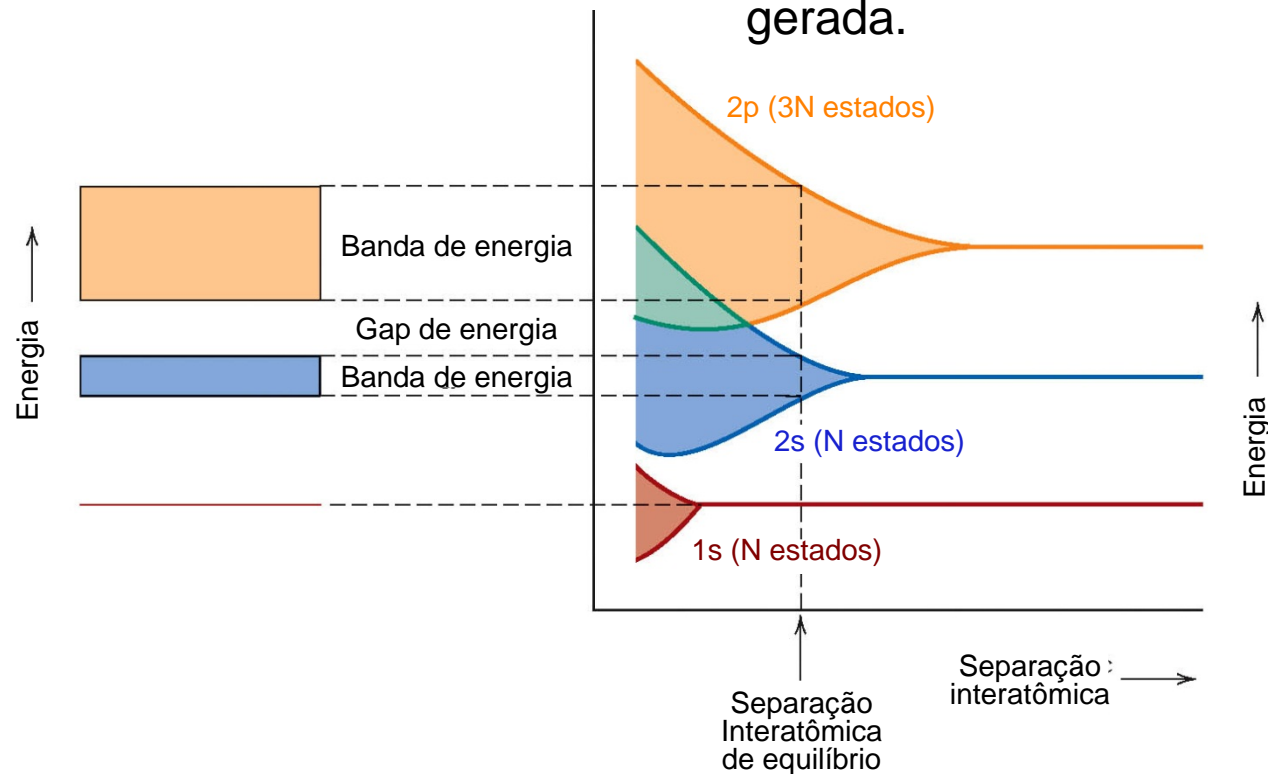


# BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

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

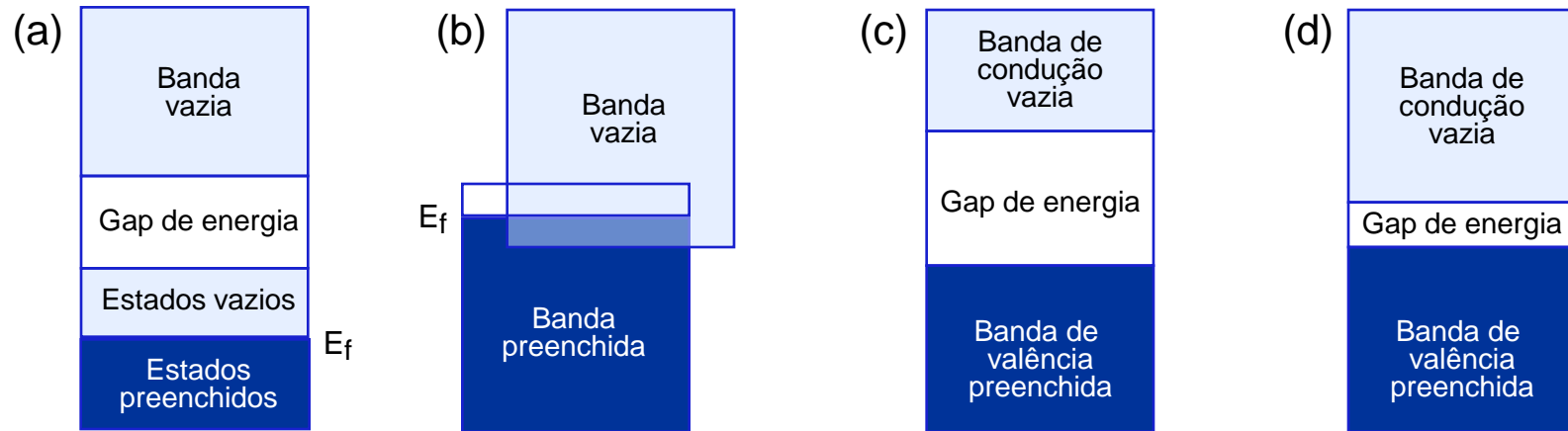
✓ Representação convencional da estrutura da banda de energia eletrônica para um material sólido na separação interatômica de equilíbrio.

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



# ESTRUTURAS DE BANDAS DE ENERGIA NOS SÓLIDOS

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



- (a) Bandas de energia de **METAIS** tais como o cobre ( $Z = 29$ , ...  $3d^{10} 4s^1$ ) nos quais se encontram disponíveis, na mesma banda de energia, estados eletrônicos não preenchidos acima e adjacentes a estados eletrônicos preenchidos.
- (b) Bandas de energia de **METAIS** tais como o magnésio ( $Z = 12$ ,  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ ) nos quais ocorre a superposição das bandas de energia mais externas, a preenchida e a não-preenchida.
- (c) Bandas de energia típicas de **ISOLANTES**: a BANDA DE VALÊNCIA (banda de energia preenchida) é separada da BANDA DE CONDUÇÃO (banda de energia não-preenchida) por um **GAP DE ENERGIA** (banda de energia proibida, ou seja, barreira de energia) 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).

# 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  $T = 0 \text{ K}$ ,  $E_f$  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 poço de potencial.
- Nos metais, somente elétrons com energia maior que  $E_f$  podem ser acelerados na presença de um campo elétrico. Esses elétrons são os que participam do processo de condução e são chamados de **ELÉTRONS LIVRES**.
- Em semicondutores e isolantes, os **BURACOS ELETRÔNICOS** têm energia menor que  $E_f$  e também participam do processo de condução.
- O processo de condução se origina na mobilidade dos **PORTADORES DE CARGA**.

# CONDUTIVIDADE ELÉTRICA - METAIS

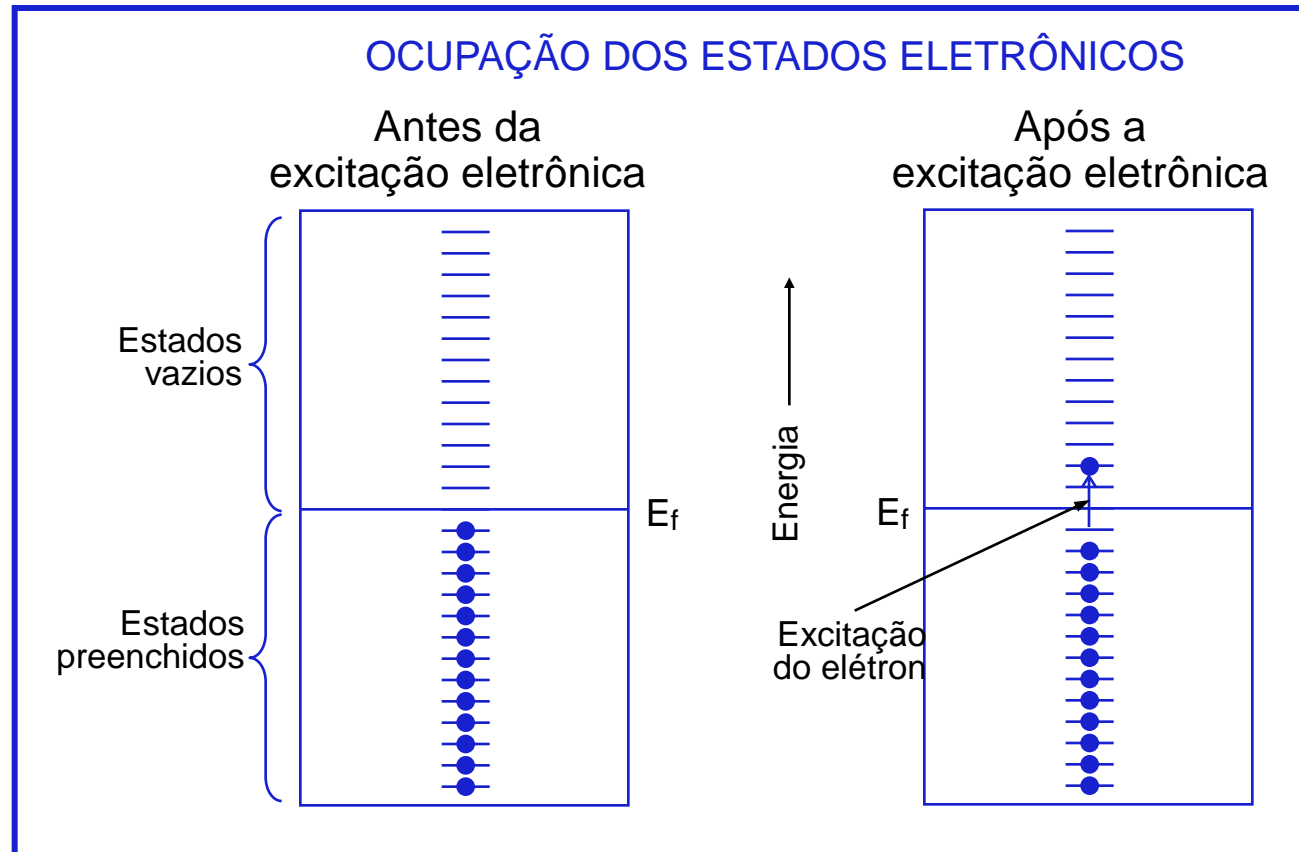
- Em metais, um elétron torna-se livre quando passa para um estado de energia disponível e não preenchido acima de  $E_f$ ; é pequena a energia necessária para tal mudança.
- A condutividade elétrica dos metais pode ser representada pela equação

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

$n$  = 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

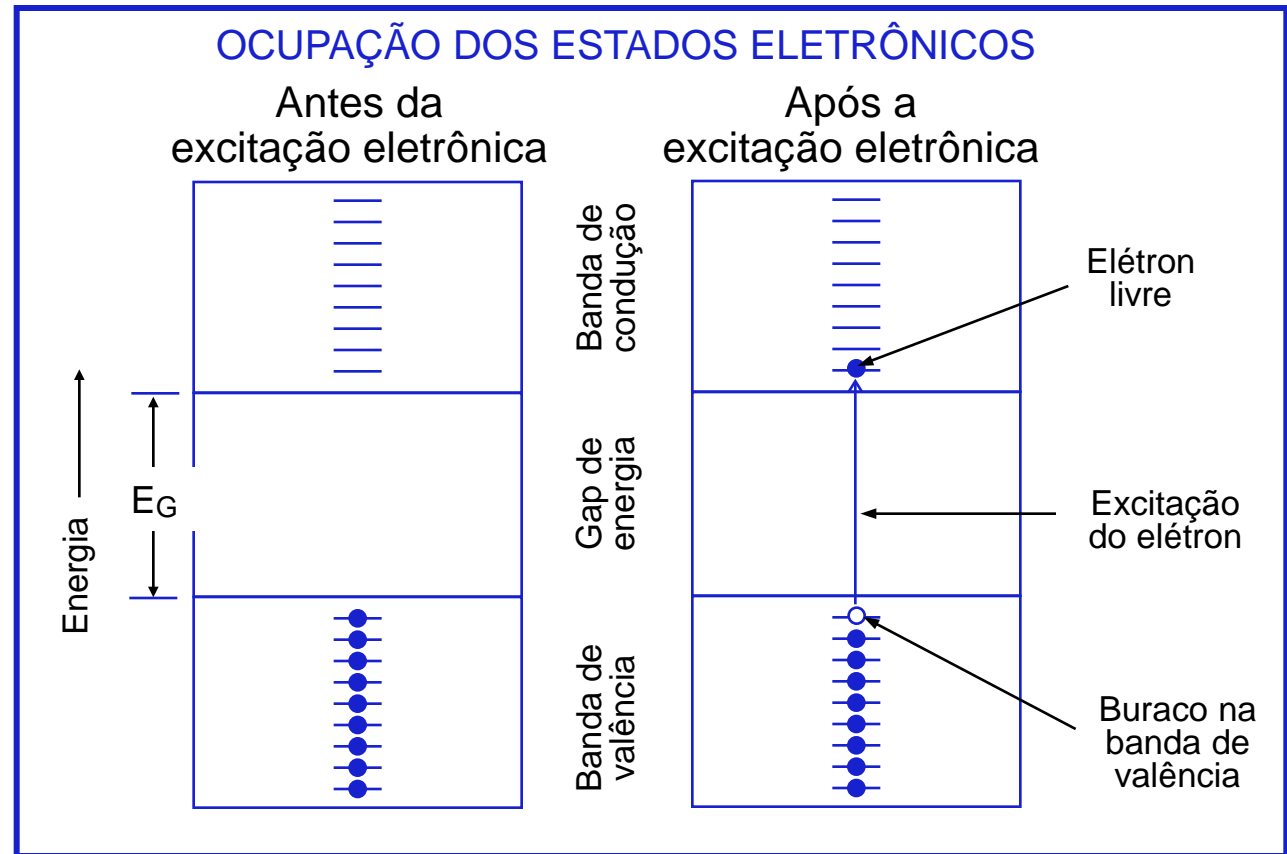
- A condutividade elétrica dos metais condutores *diminui* à medida que a sua *temperatura aumenta*.





# 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 largura da barreira.
- A diferença entre semicondutores e isolantes está na largura do gap de energia. Comparada com a largura do gap de energia 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.

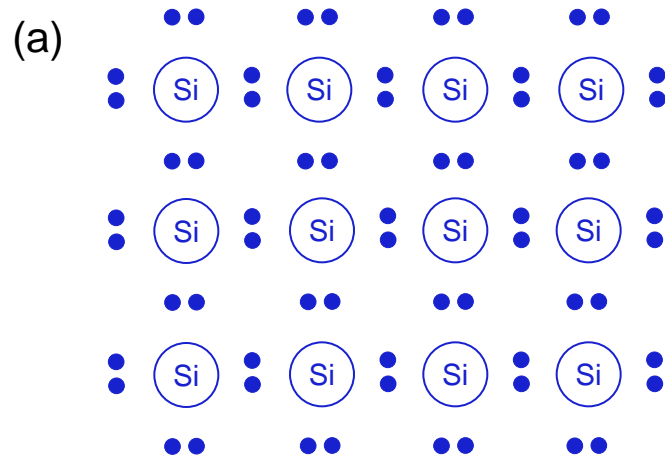


# MATERIAIS SEMICONDUTORES

- **SEMICONDUTORES INTRÍNSECOS** são aqueles cujo comportamento elétrico depende basicamente da estrutura eletrônica 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 dos átomos de impurezas. 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 mais importante exemplo é o Si, mas também estão nesta categoria o Ge e o Sn. É a possibilidade de adicionar impurezas diversas ao material puro que permite a fabricação de uma variedade de dispositivos eletrônicos a partir do mesmo material semicondutor.
- Os **semicondutores extrínsecos** têm condutividade que **varia pouco com a temperatura** e cujo valor é controlado pela **concentração de impurezas**. As concentrações 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 muito alta).
- Semicondutores intrínsecos de compostos dos grupos III-V e II-VI vêm adquirindo crescente importância para a indústria eletrônica nos últimos anos.

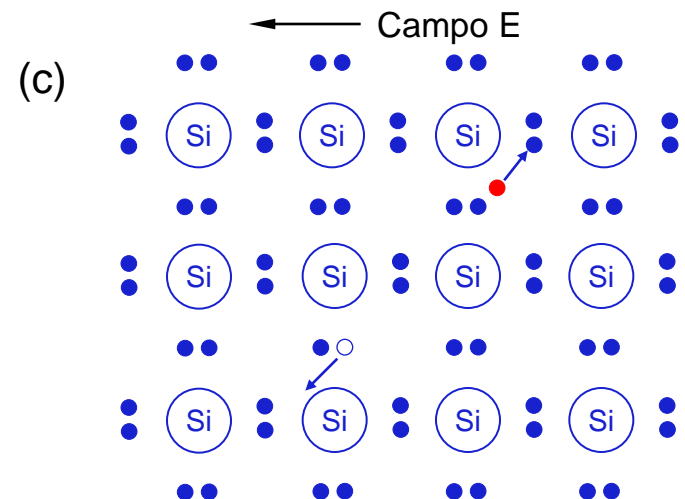
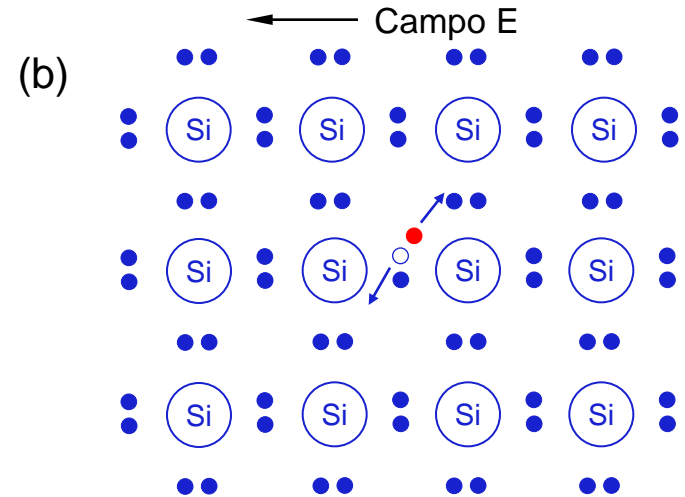
# SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

Modelo de ligação eletrônica para a condução elétrica no Silício intrínseco



● elétron de valência  
● elétron livre  
○ buraco

(a) Antes da excitação eletrônica.



(b) e (c) Após a excitação eletrônica (os movimentos subsequentes do elétron livre e do buraco em resposta a um campo elétrico externo).

# SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

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

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

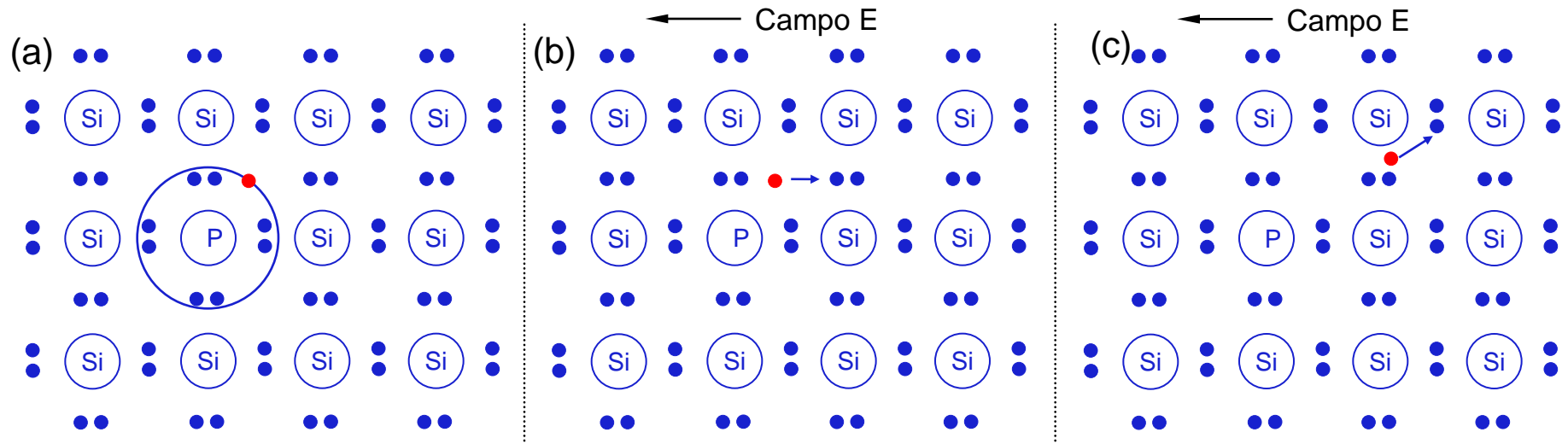
onde:  $n$  = número de elétrons livres por unidade de volume;  
 $p$  = número de buracos eletrônicos por unidade de volume;  
 $|e|$  = magnitude da carga dos portadores ( $1,6 \times 10^{-19}$  C);  
 $\mu_e$  = mobilidade dos elétrons livres;  
 $\mu_b$  = mobilidade dos buracos eletrônicos.

- Note que  $\mu_e > \mu_b$ .
- A condutividade elétrica dos semicondutores intrínsecos aumenta à medida que a temperatura aumenta.
- Para semicondutores intrínsecos,  $n = p$ . Portanto,

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

# SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO n

- Modelo de ligação eletrônica para a semicondução extrínseca do tipo n. Por exemplo, a dopagem do Si (valência 4) com P (valência 5) gera elétrons livres; uma impureza desse tipo é chamada de doadora.

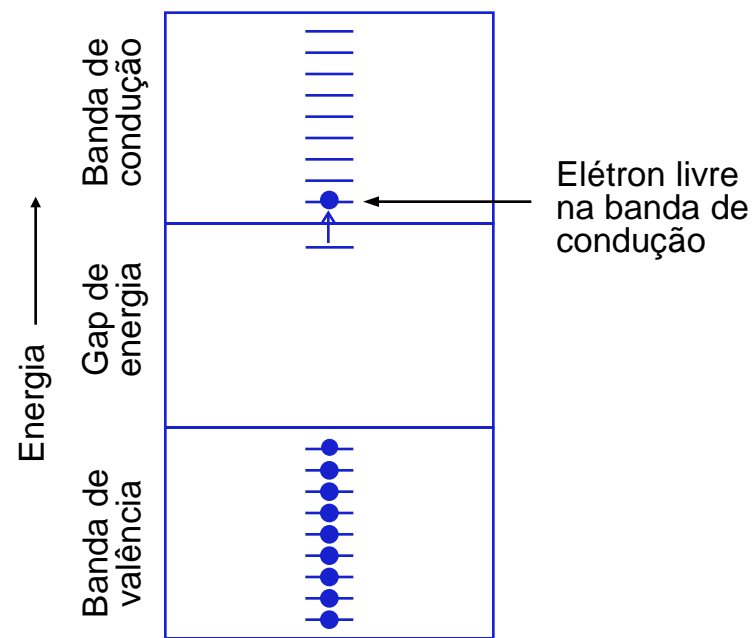
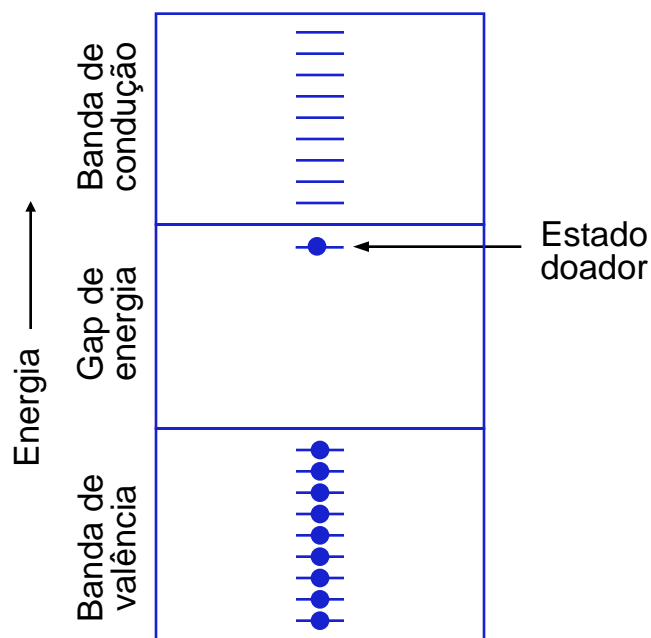


- (a) O átomo de impureza (P) substitui um átomo hospedeiro de Si, resultando em um elétron extra ligado ao átomo de impureza.
- (b) Excitação do elétron extra como consequência da aplicação de um campo elétrico externo, formando-se um elétron livre.
- (c) Movimento do elétron livre em resposta ao campo elétrico externo.
- Para *semicondutores do tipo n*, os elétrons livres são os principais portadores de corrente, isto é,  $n \gg p$ . Portanto,

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

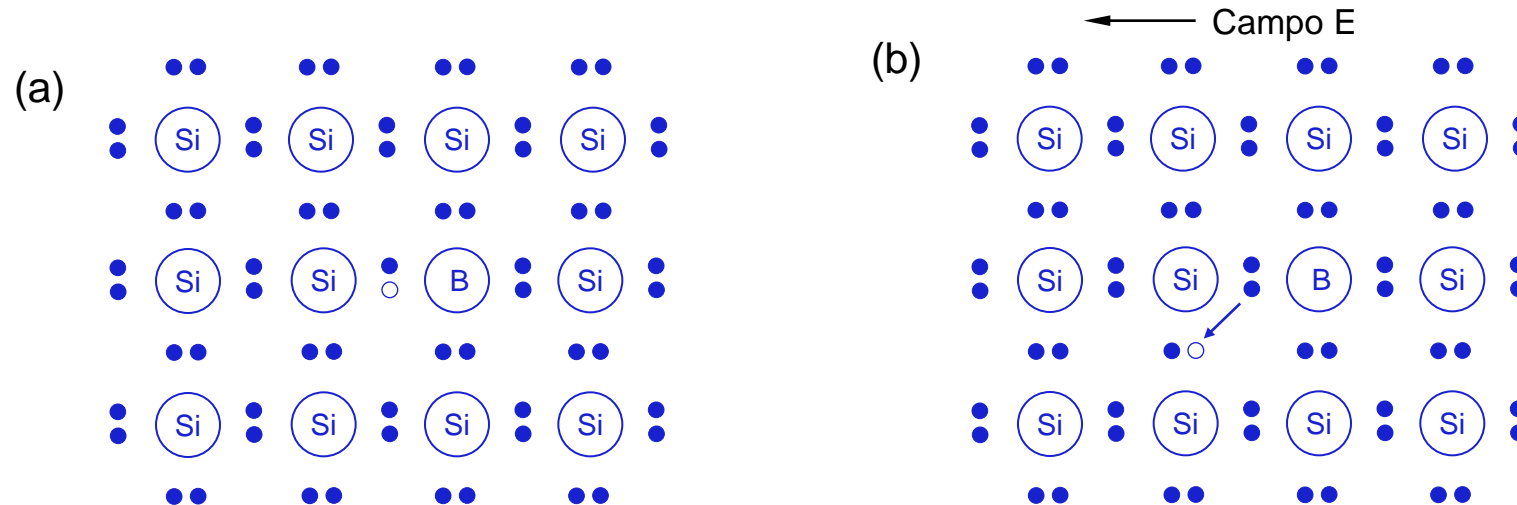
# SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO n

- Esquema da banda de energia eletrônica para um nível de impureza doadora localizado dentro do gap de energia, imediatamente abaixo da parte inferior da banda de condução.
- Excitação de um estado doador em que um elétron livre é gerado na banda de condução.



# SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO p

- Modelo de ligação eletrônica para a semicondução extrínseca do tipo p. Por exemplo, a dopagem do Si (valência 4) com B (valência 3) gera buracos eletrônicos; uma impureza desse tipo é chamada de receptora.

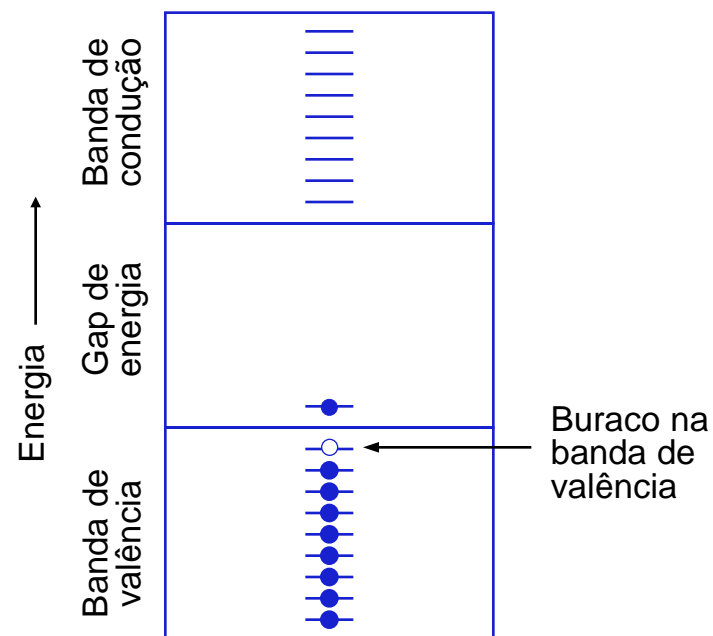
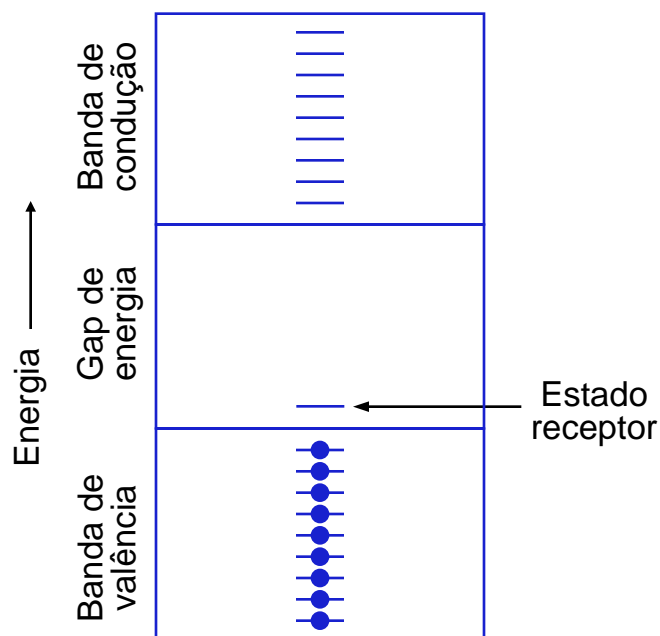


- (a) O átomo de impureza (B) substitui um átomo hospedeiro de Si, resultando na deficiência de um elétron de valência ou, de forma equivalente, num buraco eletrônico associado ao átomo de impureza.
- (b) Movimento do buraco eletrônico em resposta a um campo elétrico externo.
- Para *semicondutores tipo p*, os buracos eletrônicos são os principais portadores de corrente, isto é,  $p \gg n$ . Portanto,

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

# SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS DO TIPO p

- Esquema da banda de energia para um nível de impureza receptora localizado dentro do gap de energia, imediatamente acima da parte superior da banda de valência.
- Excitação de um elétron para o nível receptor, deixando para trás um buraco na banda de valência.



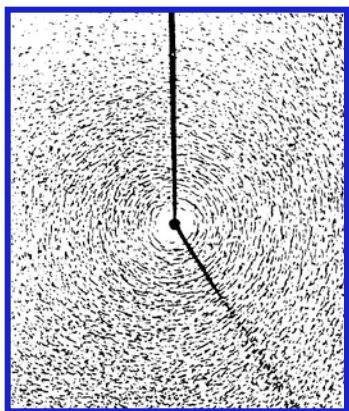


# PROPIEDADES MAGNÉTICAS

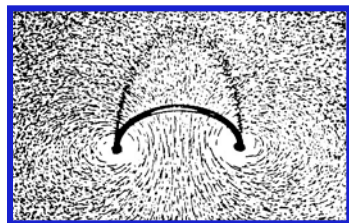


## CAMPO MAGNÉTICO $H$

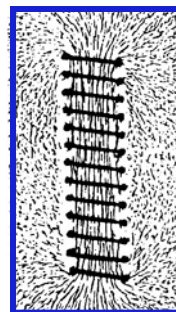
- **CAMPOS MAGNÉTICOS** são produzidos por cargas elétricas em movimento. Assim, uma corrente elétrica em um condutor gera um campo magnético. Campos magnéticos também podem ser produzidos por magnetos permanentes (ímãs). Neste caso, o movimento dos elétrons (spin e orbital) dos átomos que compõem o magneto é o responsável pelo campo magnético.
- **LINHAS DE FORÇA** são utilizadas para representar o campo magnético. Para cada ponto do espaço, a reta tangente à linha de força fornece a direção do campo naquele ponto. A intensidade do campo se correlaciona com o número de linhas de força que atravessam uma área unitária na direção perpendicular à definida pelas linhas de força.



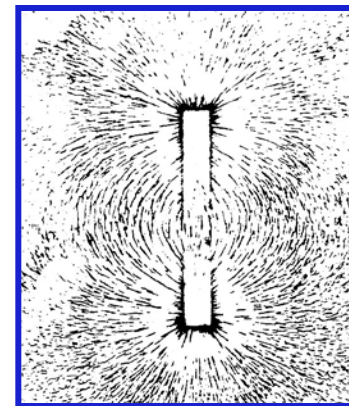
Fio retilíneo



Espira circular



Bobina



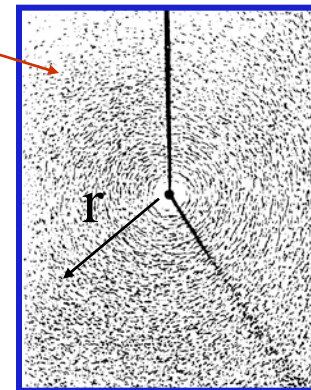
Magneto Permanente

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 (segundo D. Jiles, pág. 5).

# CAMPO MAGNÉTICO **H**

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

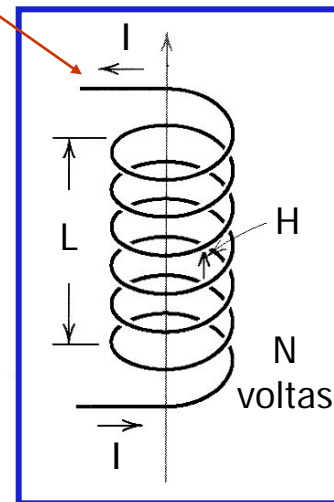
$$H = I / 2 \pi r \quad (\text{A/m})$$



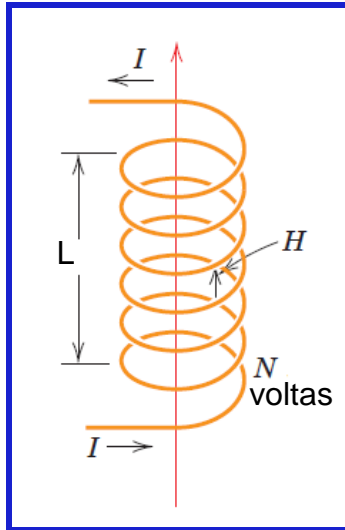
onde  $r$  é a distância radial em relação ao eixo definido pelo fio.

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

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



# 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.

- A indução magnética **B<sub>0</sub>** no vácuo é

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

onde  $\mu_0$  é a **PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO VÁCUO** e vale  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  (ou  $\text{Wb/A.m}$ ).

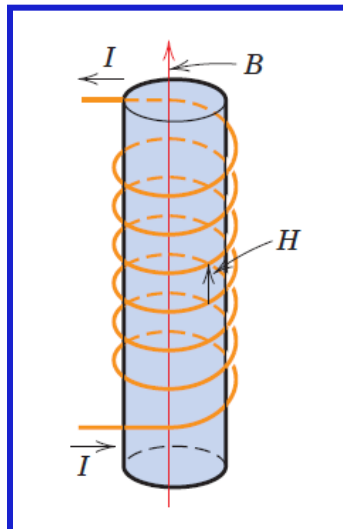
- A indução magnética **B** no interior de um material sólido vale

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

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

- Definimos a **PERMEABILIDADE RELATIVA DO MATERIAL** como

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



## ALGUNS COMENTÁRIOS

- A expressão  $B = \mu H$  representa um análogo magnético da lei de Ohm da eletricidade  $J = \sigma E$ .

Indução magnética (B)	$\leftrightarrow$	Densidade de corrente (J)
Campo magnético (H)	$\leftrightarrow$	Campo elétrico (E)
Permeabilidade magnética ( $\mu$ )	$\leftrightarrow$	Condutividade elétrica ( $\sigma$ )

- O campo magnético (Ampère/metro) representa um gradiente de energia.
- A indução magnética (Tesla=Weber.metro<sup>2</sup>) representa o número de linhas de campo por unidade de área.
- A permeabilidade magnética é uma medida da facilidade com a qual B pode ser induzido num material na presença de H.
- Uma diferença importante é que, enquanto a condutividade é uma constante, a permeabilidade varia com H.



# MAGNETIZAÇÃO

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

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + \text{polarização magnética} \quad (3)$$

Assim, 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 se correlaciona com o campo magnético por meio da relação

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

onde  $\chi_m$  é a **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 = 4π x 10 <sup>-3</sup> oersted
Magnetização	M	amp-volta/m	C/m-s	maxwell/cm <sup>2</sup>	1 amp-volta/m = 4π x 10 <sup>-3</sup> maxwell/cm <sup>2</sup>
Permeabilidade magnética	μ	henry/m Wb / amp m	kg m / C <sup>2</sup>	sem unidade	4π x 10 <sup>-7</sup> henry/m = 1 emu
Permeabilidade relativa	μ <sub>r</sub>	sem unidade	sem unidade	sem unidade	
Susceptibilidade magnética	χ	sem unidade	sem unidade	sem unidade	

# DIPOLos E MOMENTOS MAGNÉTICOS

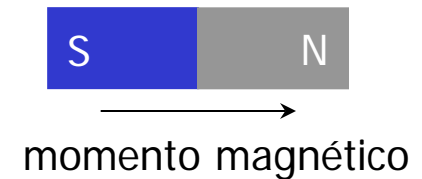
- Uma espira de corrente pode ser representada por um **DIPOLO MAGNÉTICO**. Um dipolo magnético, por sua vez, pode ser descrito pelo vetor **MOMENTO MAGNÉTICO**.

Exemplos:

A magnitude do momento magnético  $m$  de uma espira de área  $A$  que transporta uma corrente  $I$  é  $m = I A$ .

A magnitude do momento 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 que formam a matéria, dá origem a dipolos magnéticos microscópicos. Esses dipolos magnéticos permitem associar momentos magnéticos aos átomos. Assim, cada átomo pode ser pensado como se fosse um pequeno ímã.
- A magnetização de um material é definida como o momento magnético dos dipolos por unidade de volume ( $M=m/V$ ,  $[Am^2/m^3=A/m]$ ).
- Dependendo da origem dos dipolos magnéticos e da natureza da interação entre eles, os materiais podem ser classificados em uma das seguintes categorias:

DIAMAGNÉTICOS – magnetismo fraco (em direção oposta) que existe apenas em presença de  $\mathbf{H}$

PARAMAGNÉTICOS – momento magnético nos átomos, que apresentam orientação aleatória para  $\mathbf{H} = 0$  e orientam-se fracamente (na direção de  $\mathbf{H}$ ) por rotação em presença de  $\mathbf{H}$ . Permeabilidade relativa menor que 2.

FERROMAGNÉTICOS – momento magnético atômico alinha-se paralelamente dentro de domínios mesmo quando  $H = 0$  (permeabilidade relativa maior que 100)

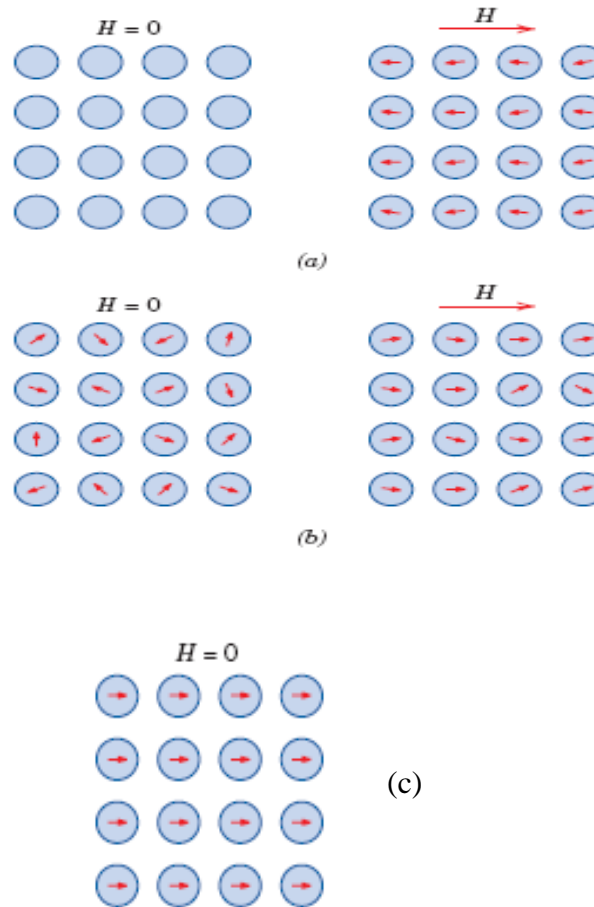
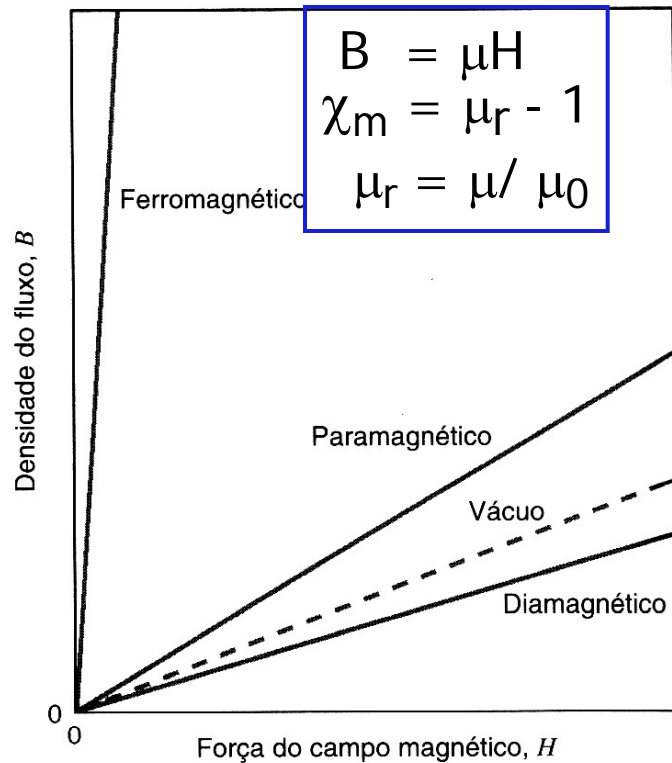
ANTIFERROMAGNÉTICOS – acoplamento de spins em direções exatamente opostas ( $MnO$ )

FERRIMAGNÉTICOS – ocorre acoplamento de spins em direções opostas com cancelamento incompleto (Ferritas – compostos de  $Fe_3O_4$ )

# O MAGNETISMO DOS MATERIAIS

26

DIAMAGNÉTICOS  
PARAMAGNÉTICOS  
FERROMAGNÉTICOS



(a) diamagnético, indução de dipolos em direção oposta a  $H$   
 $\chi < 0$

(b) paramagnético, dipolos permanentes dos momentos magnéticos do spin eletrônico  
 $\mu_r > 1$   
 $\chi = 10^{-5} - 10^{-2}$

(c) ferromagnético, momento magnético na ausência de campo  $H$ .  
Valores elevados de  $\chi$  ( $10^6$ ).

- Consideraremos nesta aula apenas o caso dos materiais Ferromagnéticos.

# FERROMAGNETISMO

- Certos materiais metálicos possuem um momento magnético permanente mesmo na ausência de um campo externo e manifestam magnetizações muito grandes que podem ser permanentes. Esses materiais são denominados **FERRO-MAGNÉTICOS** e essas características representam o **FERROMAGNETISMO**.

- Fe, Co, Ni e algumas terras raras são materiais ferromagnéticos na forma elementar. Ferromagnetismo também é observado em diversos compostos (óxidos, carbonetos, nitretos etc.).

- Sendo:

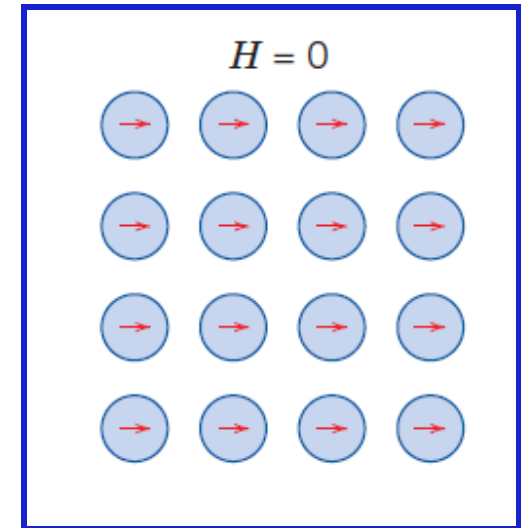
$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

$$M = \chi_m H$$

Para materiais **ferromagnéticos**

$$\chi_m \approx 10^6 \Rightarrow H \ll M \Rightarrow B \approx \mu_0 M$$

- Como a susceptibilidade dos materiais ferromagnéticos é muito elevada, permitindo uma magnetização grande e permanente com a aplicação de **H**.



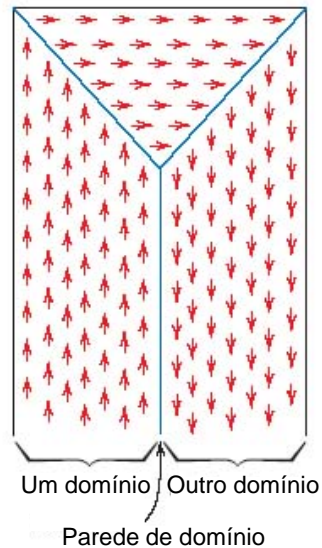
# FERROMAGNETISMO

- Os momentos magnéticos permanentes dos átomos resultam do **momento angular de spin**. A magnitude do **momento magnético** associado ao **spin de um elétron** é conhecida como **MAGNETON DE BOHR**  $\mu_b$ .

$$\mu_b = 9,27 \times 10^{-24} \text{ A} / \text{m}^2$$

- Os **momentos magnéticos permanentes** são devidos aos momentos de spin não cancelados, ou seja, somente **elétrons desemparelhados** contribuem para o momento magnético líquido permanente dos átomos.
- São **ferromagnéticos** na forma elementar alguns **metais de transição** (orbital 3d não preenchido) e algumas **terras raras** (orbital 4f não preenchido).
- Nos materiais ferromagnéticos, **alinhamentos cooperativos de momentos de spin ocorrem em volumes grandes** (em relação ao volume atômico) dando origem aos **domínios magnéticos**.

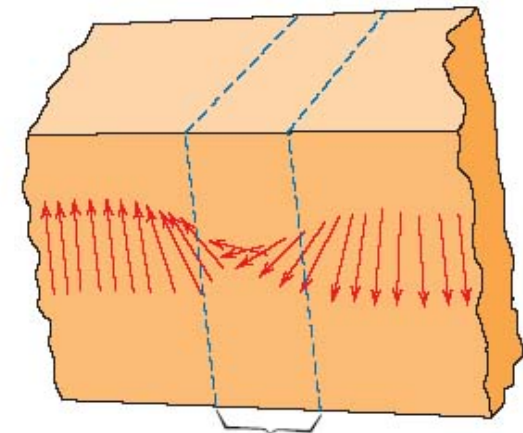
# DOMÍNIOS MAGNÉTICOS e PAREDES DE DOMÍNIO



- Os materiais ferromagnéticos são constituídos de regiões volumétricas microscópicas onde os momentos de dipolo magnético se encontram alinhados, tendo a mesma direção e sentido. Tais regiões são chamadas de **DOMÍNIOS**. Cada domínio está magnetizado até a sua magnetização de saturação.
- Geralmente, o tamanho dos domínios está na escala micrométrica e, para um material policristalino, cada grão pode conter mais de um domínio.
- Os domínios adjacentes estão separados por **CONTORNOS DE DOMÍNIO** (ou **PAREDES DE DOMÍNIO**),

através dos quais a direção da magnetização varia gradualmente. A parede de domínio tem uma densidade de energia ( $\text{J/m}^2$ ).

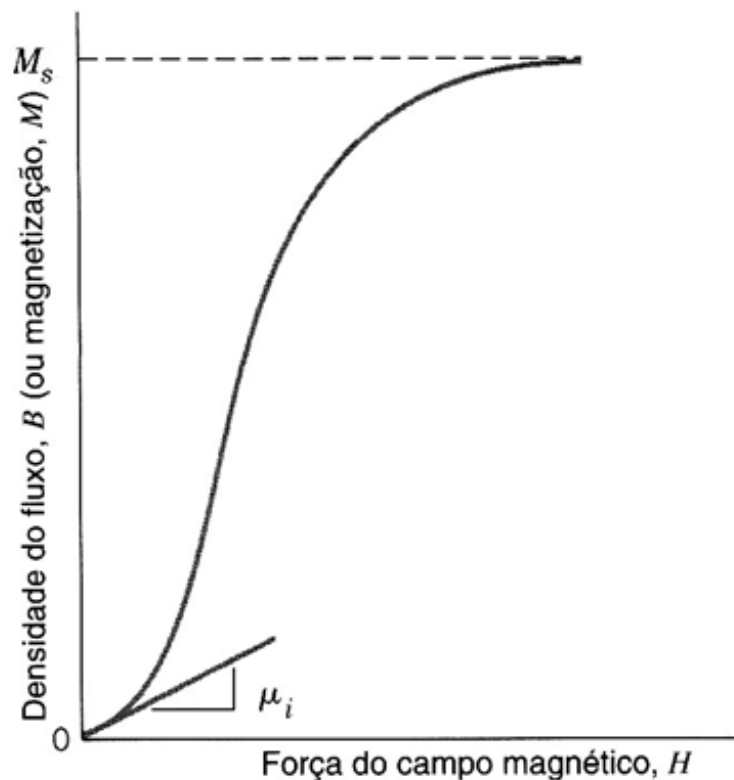
- A magnitude do campo  $M$  para um sólido como um todo é a soma vetorial das magnetizações de todos os domínios, onde a contribuição de cada domínio é ponderada de acordo com a sua fração volumétrica. No caso de uma amostra não magnetizada, a soma vetorial apropriadamente ponderada das magnetizações de todos os domínios é igual a zero.



Parede de domínio

# CURVA DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL

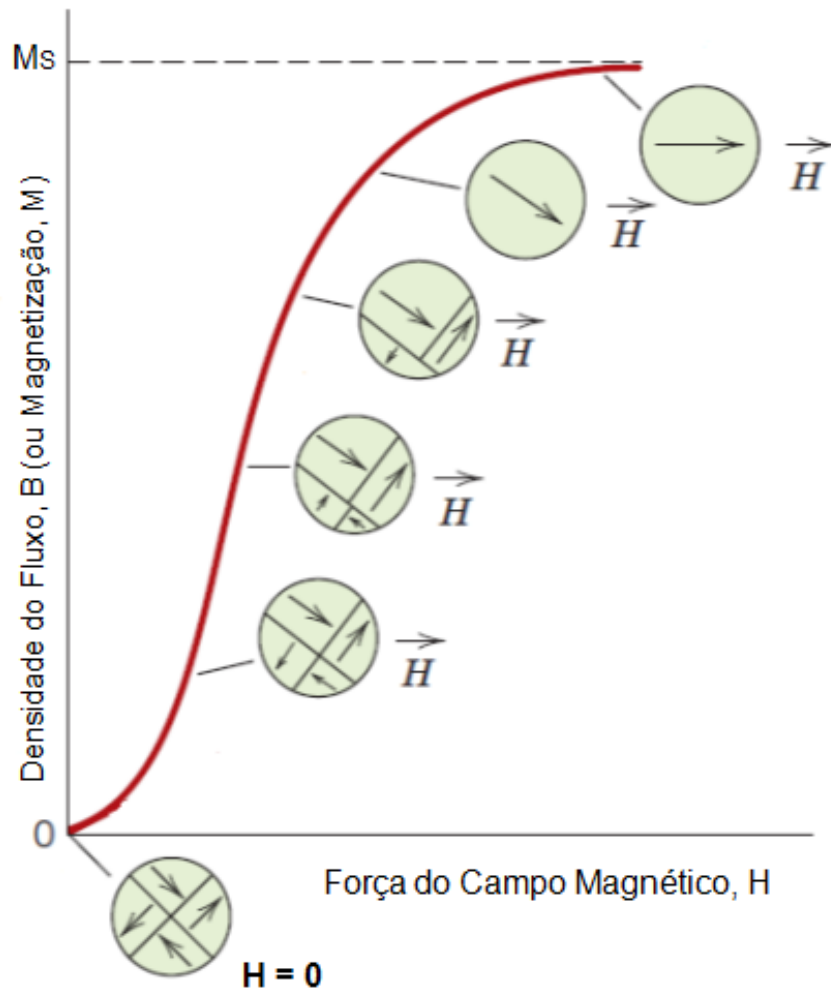
30



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.

- B e H não são linearmente proporcionais para os materiais ferromagnéticos.
- Uma vez que a permeabilidade,  $\mu$ , é a inclinação da curva B em função de H (isto é,  $dB/dH$ ), 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 atinge um valor máximo, chamado MAGNETIZAÇÃO DE SATURAÇÃO ( $M_s$ ).

# MAGNETIZAÇÃO INICIAL e DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

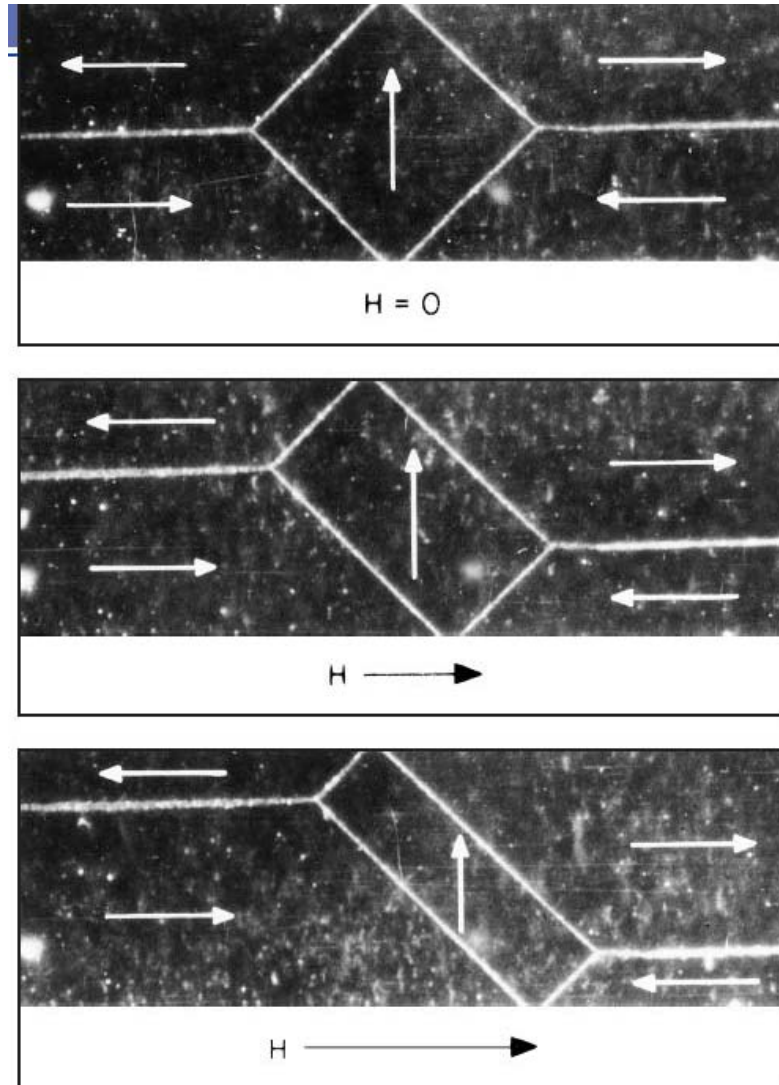


À medida que um campo externo  $H$  de magnitude crescente é aplicado, os domínios mudam de forma e de tamanho mediante o movimento das paredes de domínio.

- Inicialmente, os momentos dos domínios constituintes estão orientados aleatoriamente de tal modo que não existe qualquer indução magnética  $B$  (ou  $M$ ) líquida.
- 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 a amostra macroscópica se torne um único domínio (ou um mono-domínio), o qual se encontra praticamente alinhado com  $H$ .
- A saturação é atingida quando esse domínio, por meio de rotação, fica orientado na direção de  $H$ .



# ESTRUTURA DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

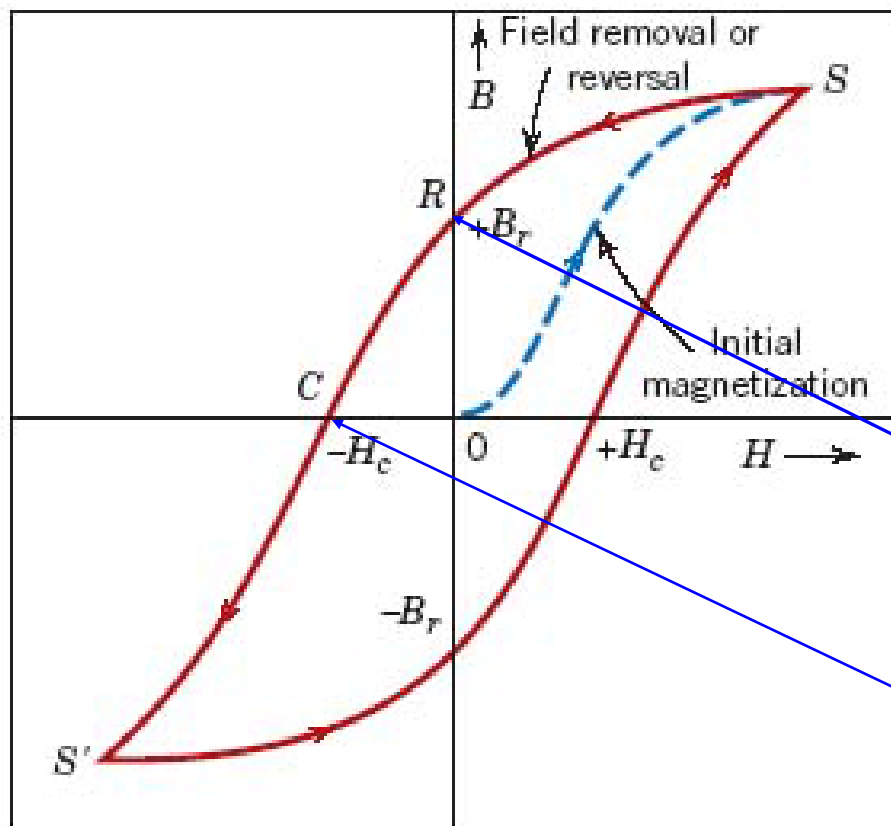


- Fotomicrografias de um monocristal de ferro, mostrando os domínios magnéticos e suas alterações de forma, à medida que um campo magnético  $H$  é aplicado.
- A direção da magnetização de cada domínio está indicada por uma seta.
- Aqueles domínios que estão orientados favoravelmente em relação a  $H$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



# HISTERESE

33

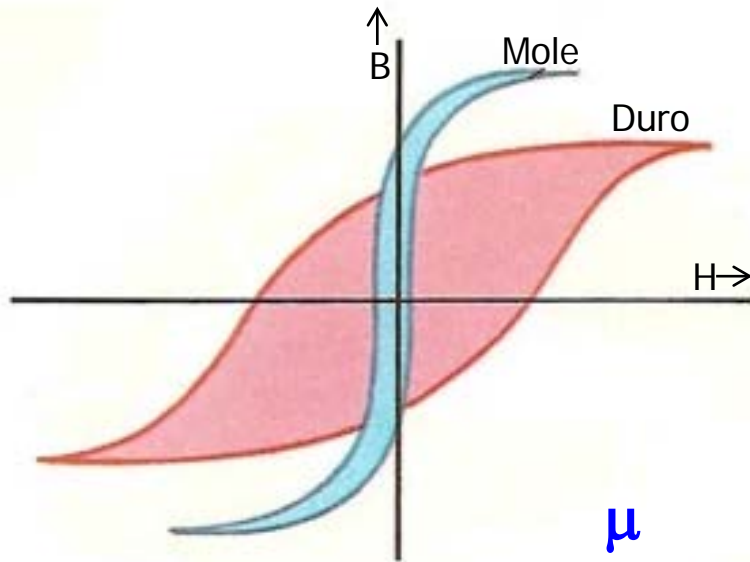


Indução magnética ( $B$ ) em função do campo magnético externo ( $H$ ) para um material ferromagnético saturado ciclicamente em um campo  $H$  positivo e negativo (pontos  $S$  e  $S'$ ).

O **CICLO DE HISTERESE** é representado pela linha sólida; a linha 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**.
- O efeito de histerese é gerado pela resistência à movimentação de paredes de domínio.
- 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 a indução magnética  $B$  no interior da amostra a **zero**.

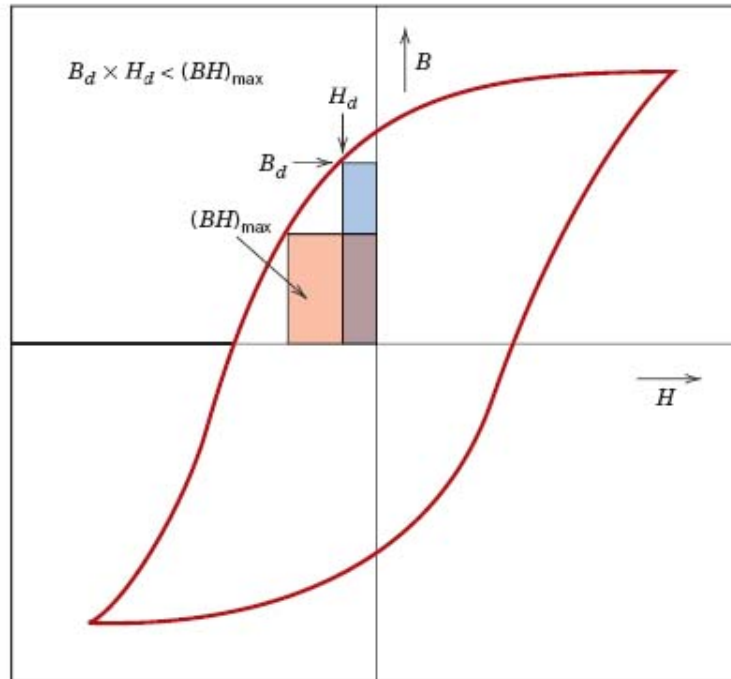
# MATERIAIS MAGNETICAMENTE MOLES



- 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 e são usados em núcleos de transformadores.
- Materiais **MAGNETICAMENTE Duros** apresentam alta permeabilidade inicial  $\mu_i$  e baixa coercividade  $H_c$  [menor que  $1 \text{ kA.m}^{-1}$  ( $12,5 \text{ Oe}$ )].

$$\begin{aligned} B &= \mu H \\ \chi_m &= \mu_r - 1 \\ \mu_r &= \mu / \mu_0 \end{aligned}$$

# MATERIAIS MAGNETICAMENTE DUROS



- IMÃS PERMANENTES.
- **Altas remanência, coercividade** [maior que  $10 \text{ kA.m}^{-1}$  ( $125 \text{ Oe}$ )] e **indução de saturação** correspondem a **altas perdas de energia por histerese**.
- A **energia necessária para desmagnetizar** um ímã é dada pelo **produto de energia B-H** medido no **segundo quadrante** do ciclo de histerese.  $Bh_{\max}$  é a maior área dentro do quadrante, valores maiores de  $Bh_{\max}$  correspondem a maiores energias de desmagnetização.
- Impedir a movimentação de paredes de domínio, aumenta a coercividade  $H_c$ .