



Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Elétrica
Materiais Elétricos - Teoria

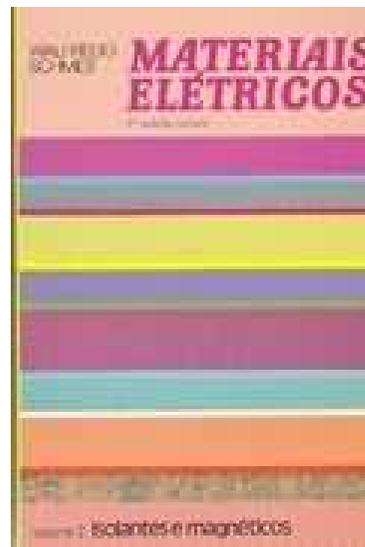
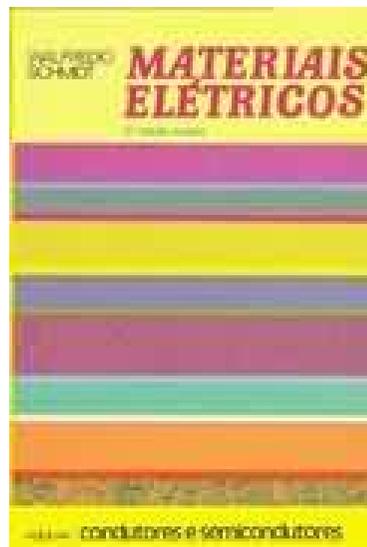
Aula 04

Materiais Magnéticos

Clóvis Antônio Petry, professor.

Florianópolis, outubro de 2006.

Bibliografia



Nesta aula

Cronograma:

1. Propriedades gerais dos materiais;
2. **Materiais magnéticos;**
3. Materiais condutores;
4. Materiais semicondutores;
5. Materiais isolantes.

Materiais magnéticos

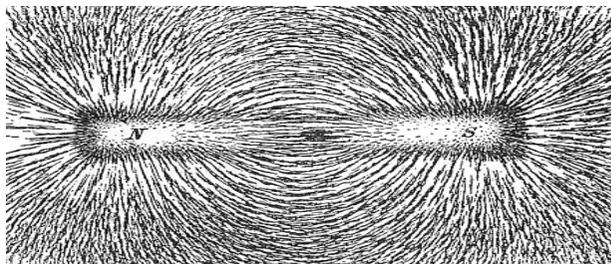
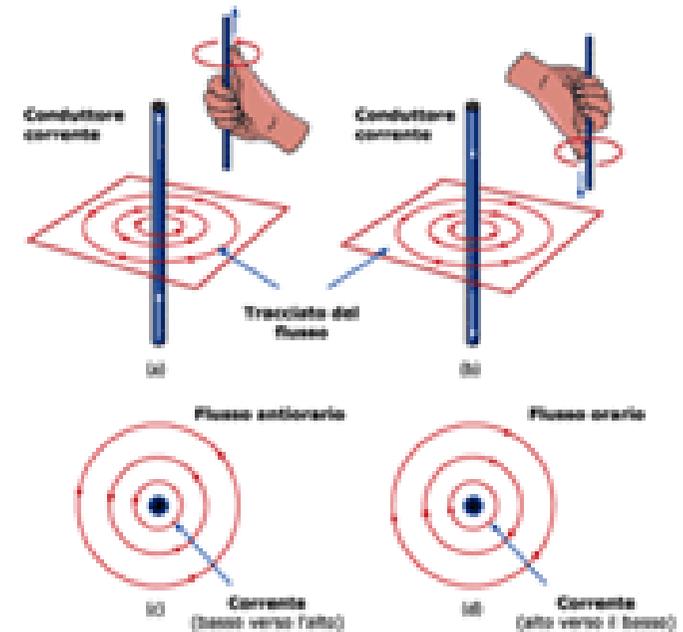
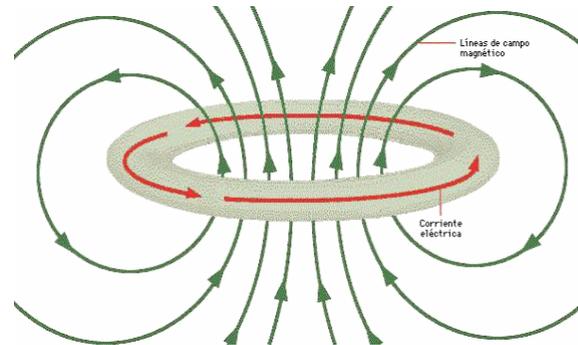
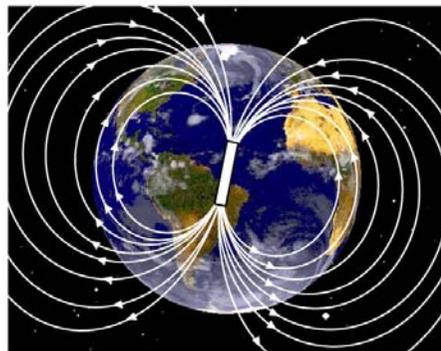
Aplicações na engenharia elétrica:

- Transformadores;
- Indutores;
- Motores elétricos;
- Transdutores;
- Gravação de dados;
- Circuitos de proteção;
- Alto-falantes;
- Acionamento (relés, contadores, etc.);
- ...
- Novas aplicações.

Principais conceitos

Campo magnético:

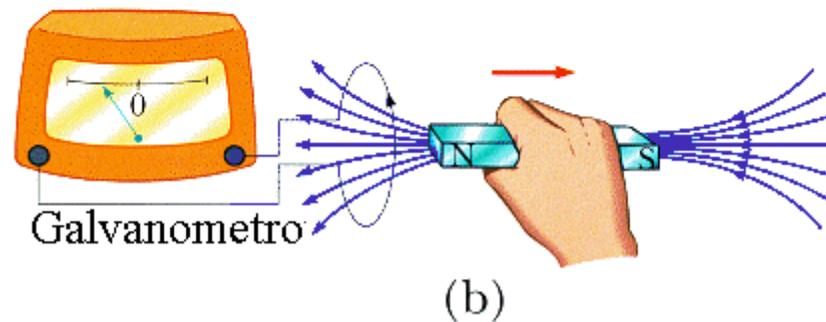
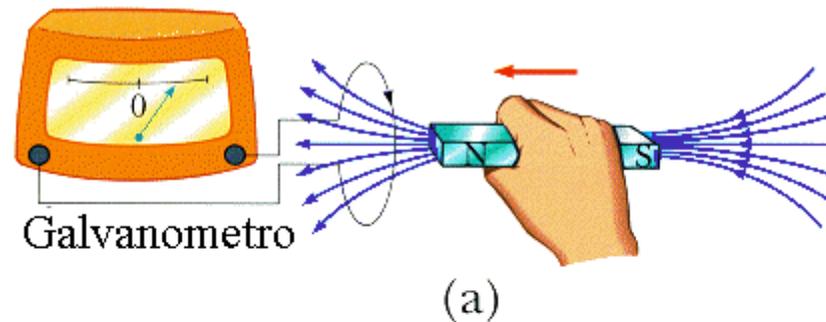
- Região do espaço onde se manifestam fenômenos magnéticos;
- Também chamado de intensidade de campo ou força magnética;
- Simbolizado pela letra H.



Principais conceitos

Indução magnética:

- Linhas de fluxo magnético por unidade de área;
- Também chamado de densidade de fluxo ou fluxo magnético;
- Simbolizado pela letra B.



Principais conceitos

Permeabilidade magnética:

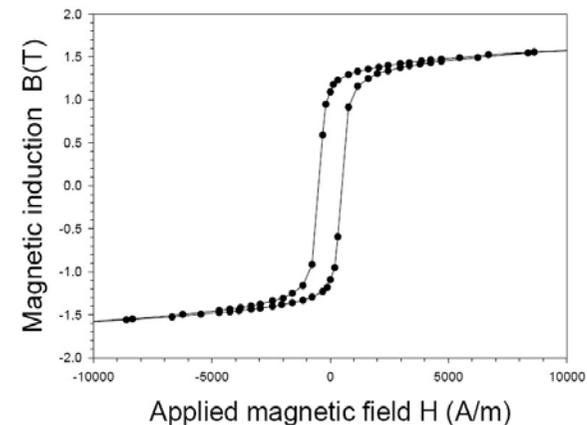
- Grau de magnetização de um material em resposta ao campo magnético;
- Facilidade de “conduzir” o fluxo magnético;
- Simbolizado pela letra μ .

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \longrightarrow \quad \text{Permeabilidade absoluta}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \longrightarrow \quad \text{Permeabilidade relativa}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} / \text{A}^2$$

Permeabilidade do vácuo



Principais conceitos

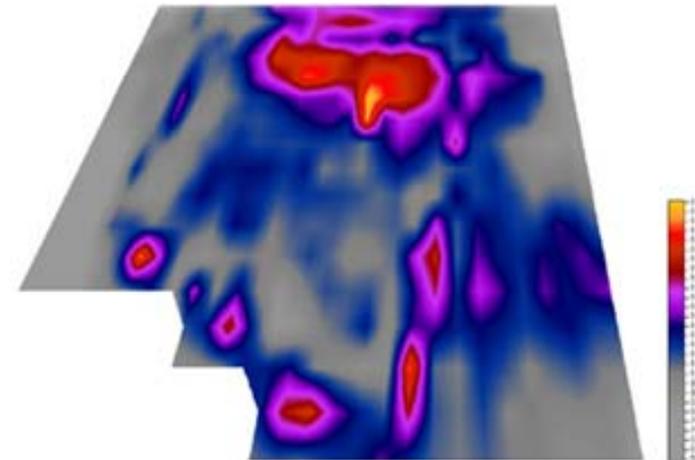
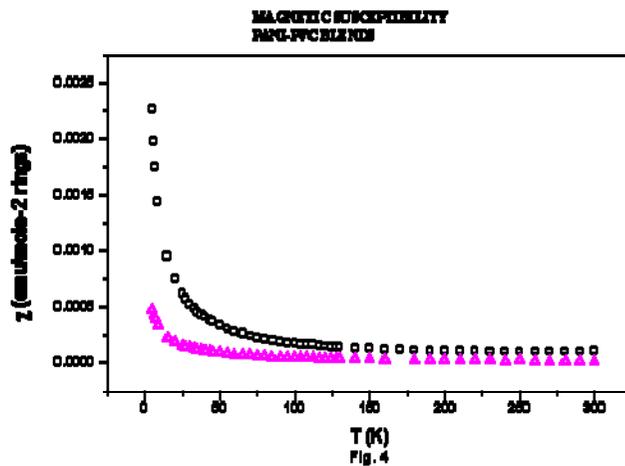
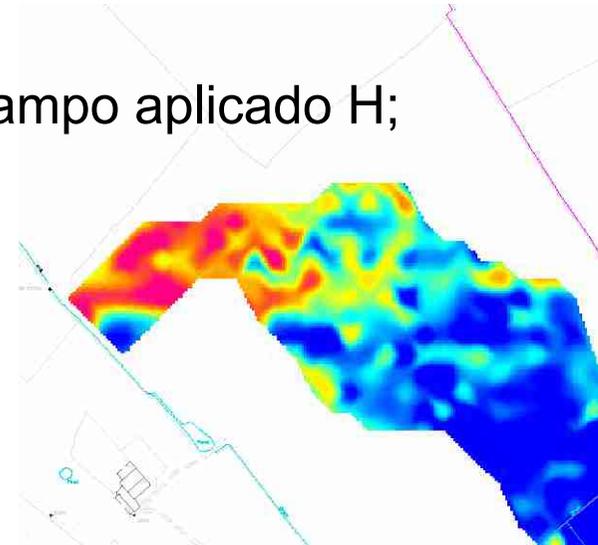
Susceptibilidade magnética:

- É a resposta do material a um campo aplicado H ;
- Simbolizado pela letra χ .

$$B = \mu_o \cdot (H + M)$$

SI $\mu = \mu_o \cdot (1 + \chi)$

CGS $\mu = 1 + 4\pi \cdot \chi$



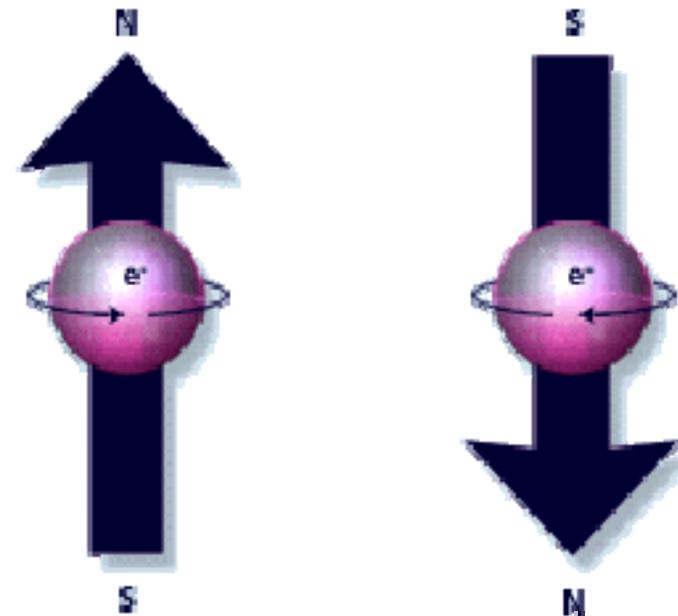
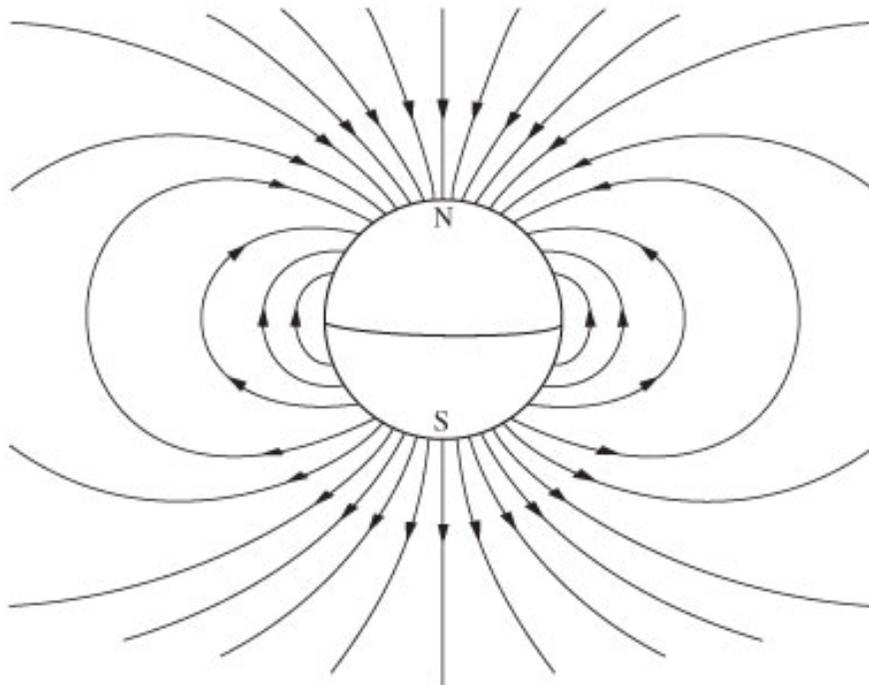
Principais conceitos

Grandeza	SI	CGS	Relação
Φ	weber (Wb)	maxwell	1 Wb = 10^8 maxwells
B	tesla (T) = Wb/m ²	gauss (G)	1 T = 10^4 G
H	A/m	oersted (Oe)	1 A/m = $4\pi \times 10^{-3}$ Oe
M	A/m	emu/cm ³	1 A/m = 10^{-3} emu/cm ³
μ	N/A ²	adimensional	
χ	adimensional	adimensional	

Domínios magnéticos

Dipolos magnéticos:

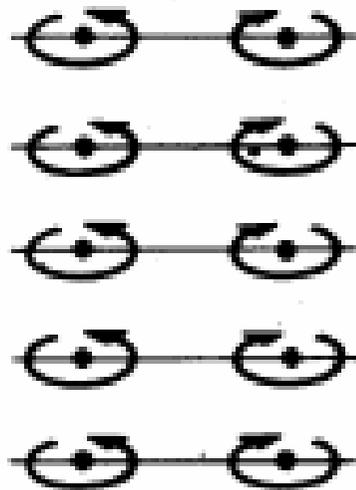
- Determinam o comportamento dos materiais num campo magnético;
- Tem origem no momentum angular dos elétrons nos íons ou átomos que formam a matéria.



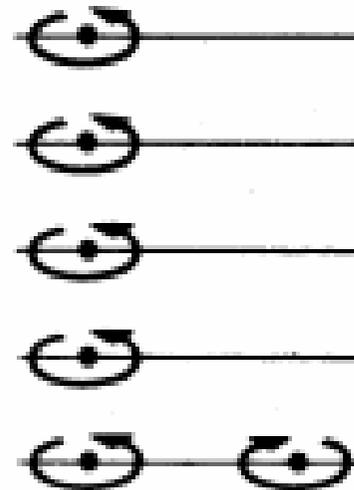
Domínios magnéticos

Magnetismo atômico:

- 2 elétrons ocupam o mesmo nível energético;
- Estes elétrons tem spins opostos;
- Subníveis internos não completos dão origem a um momento magnético não nulo.



Momento - 0

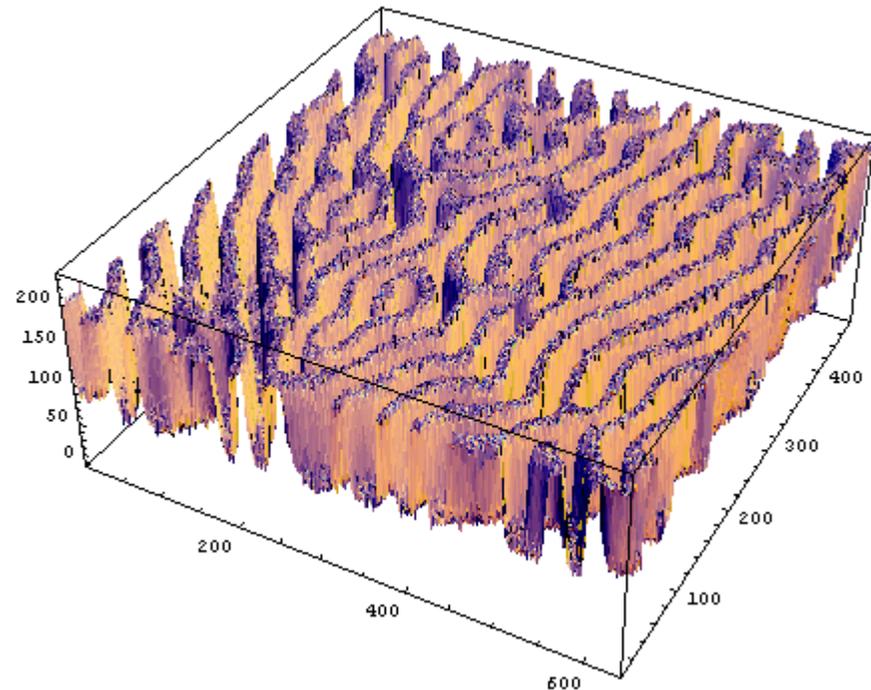
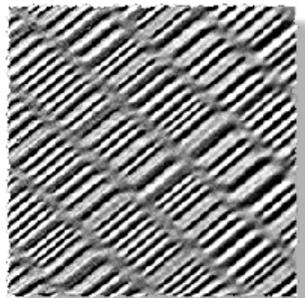
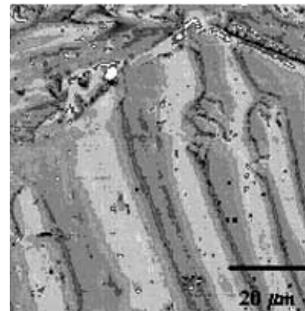
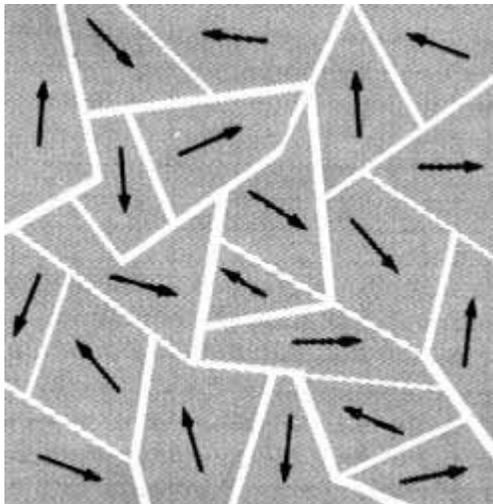


Momento $\neq 0$

Domínios magnéticos

Domínios magnéticos:

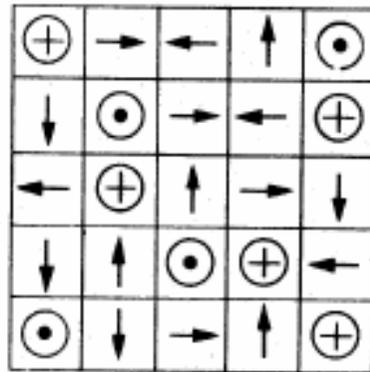
- Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
- Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
- Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.



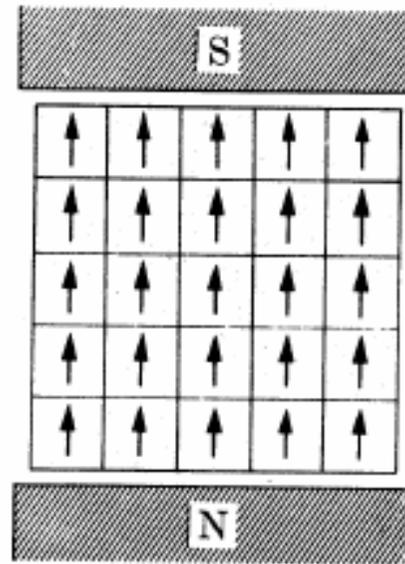
Domínios magnéticos

Alinhamento dos domínios:

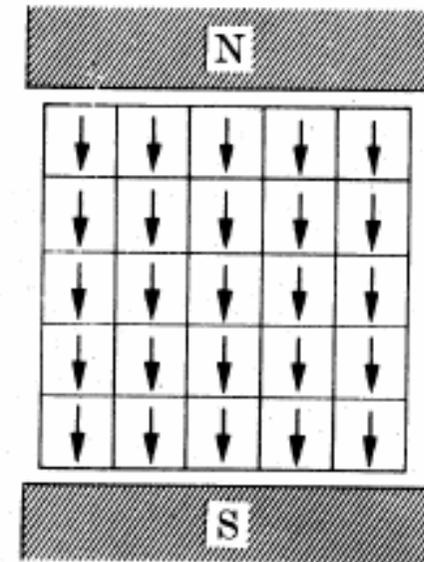
- Aplicando um campo magnético externo.



Desmagnetizado

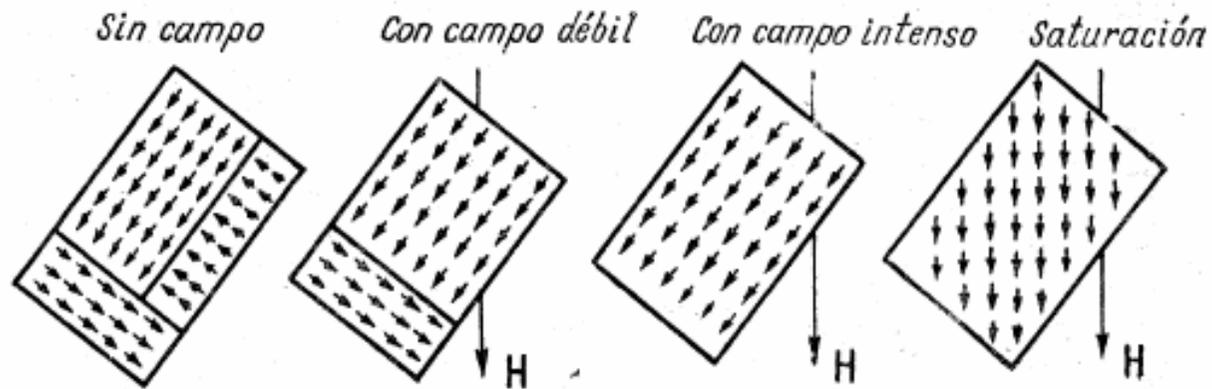
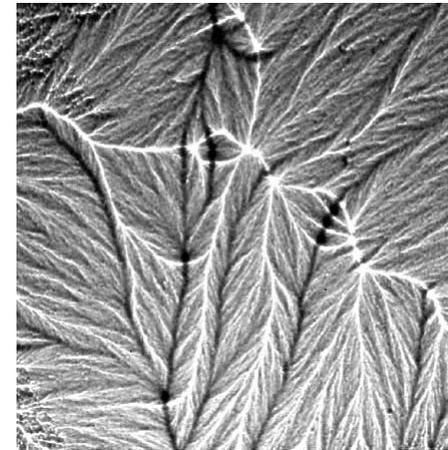
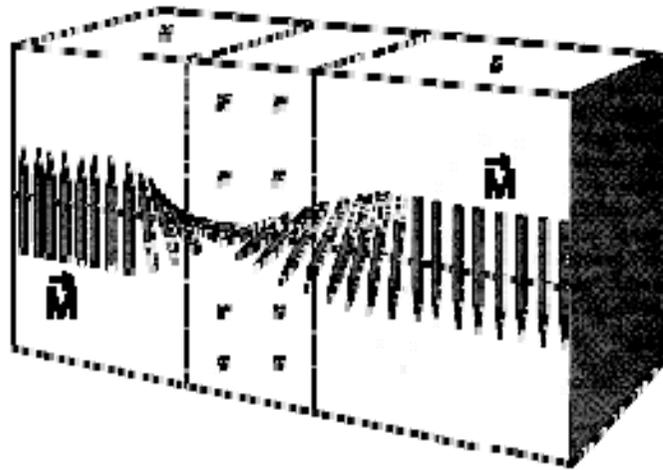


Magnetizado

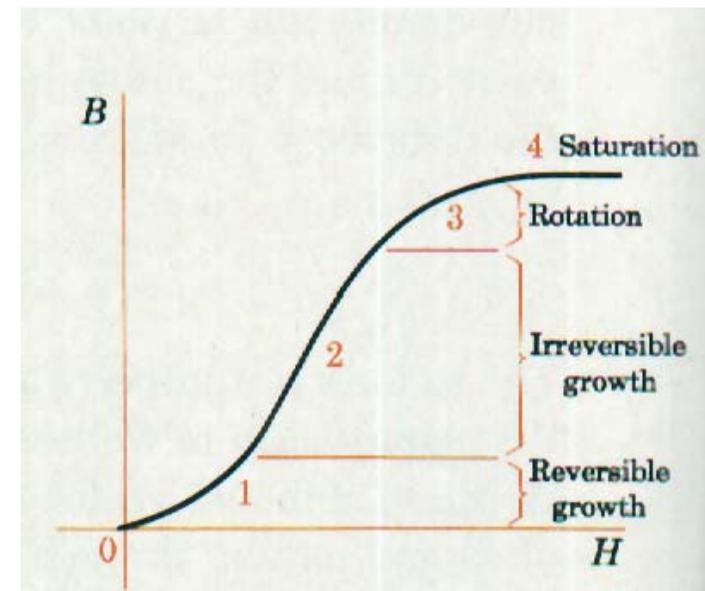
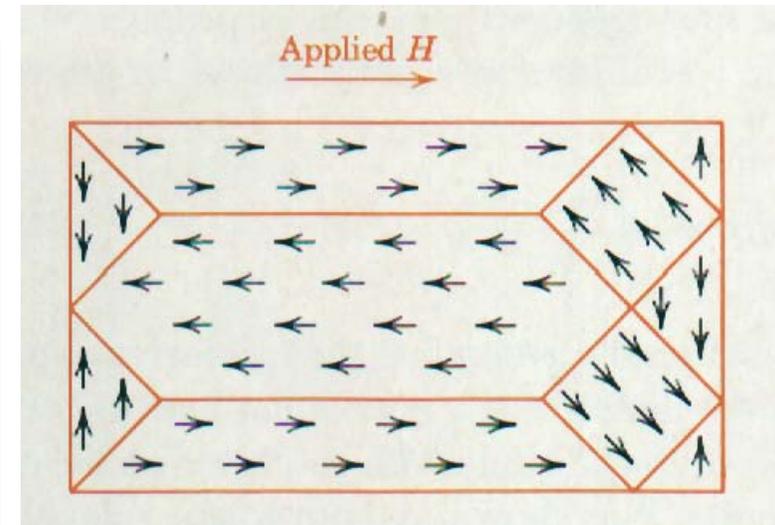
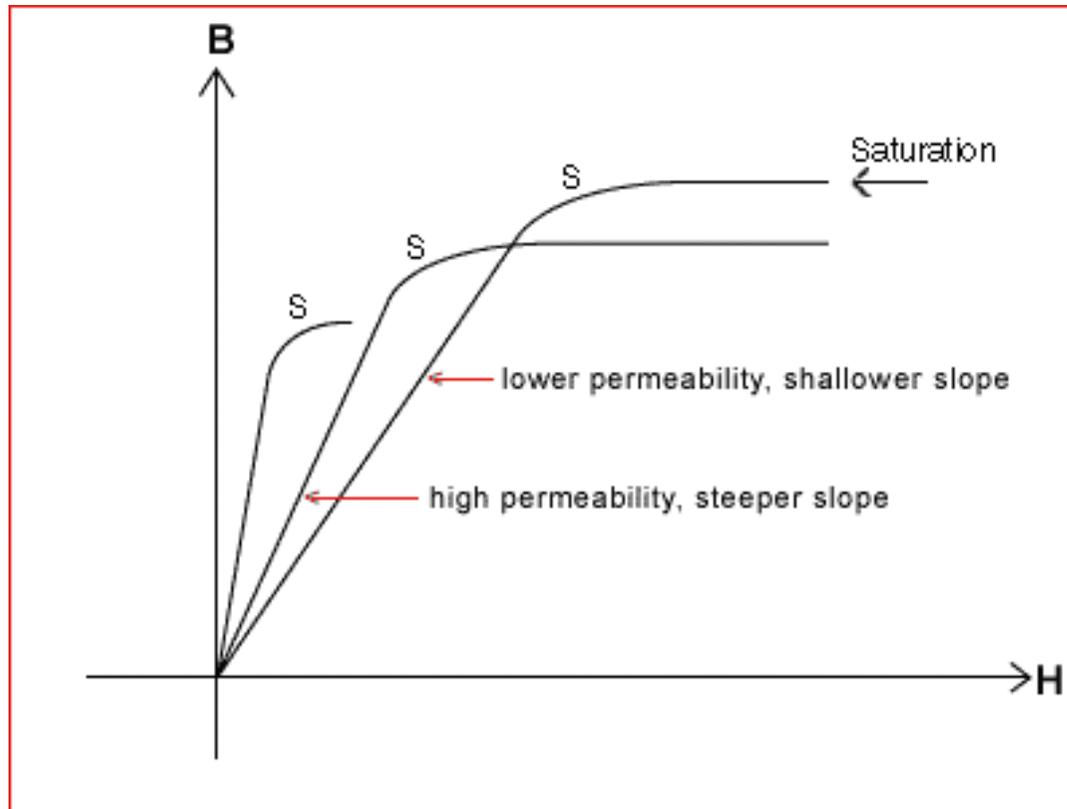


Magnetizado ao contrário

Curva de magnetização



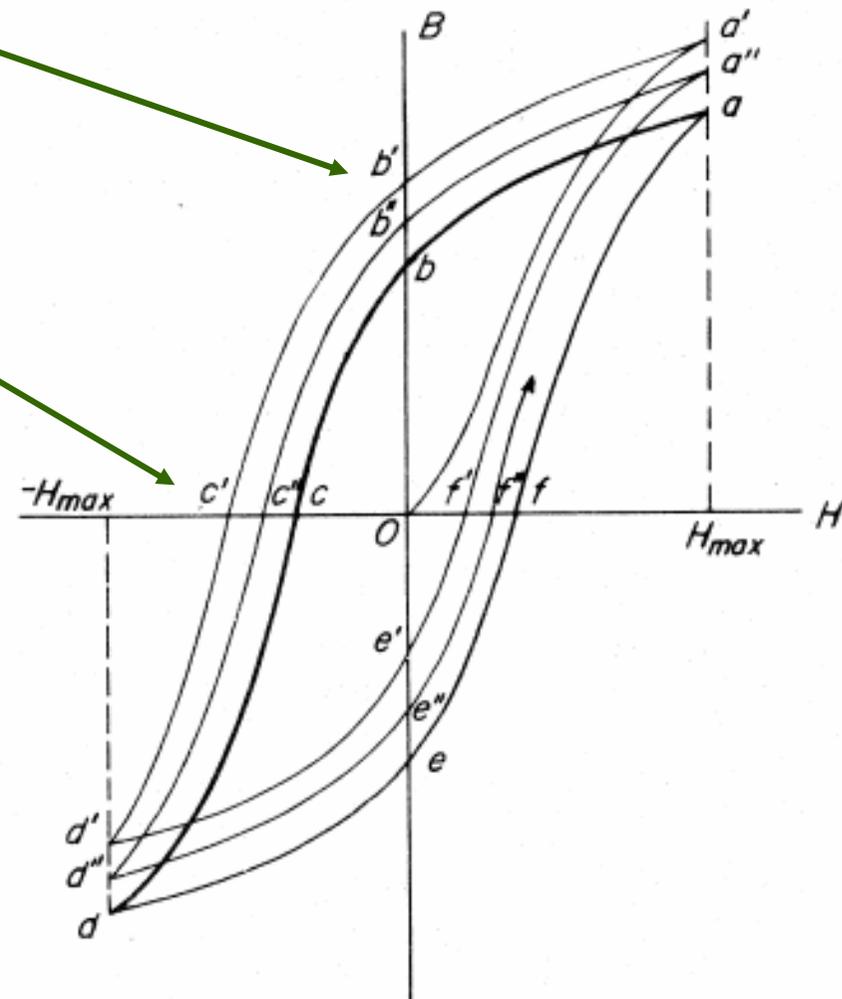
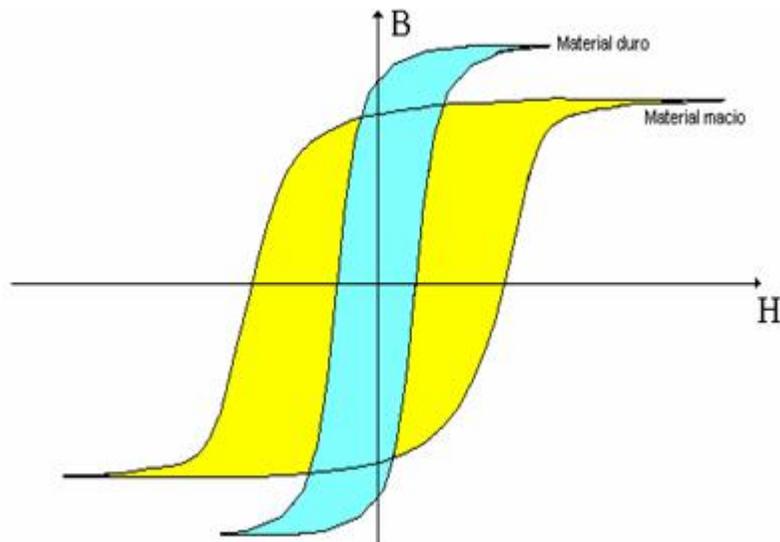
Curva de magnetização



Histerese

Magnetização remanente

Campo coercitivo



Perdas magnéticas

Correntes parasitas:

- Induzidas no núcleo, devido ao mesmo ser, normalmente, de material ferromagnético.

Perdas por histerese:

- Trabalho realizado pelo campo (H) para obter o fluxo (B);

- Expressa a dificuldade que o campo (H) terá para orientar os domínios de um material ferromagnético.

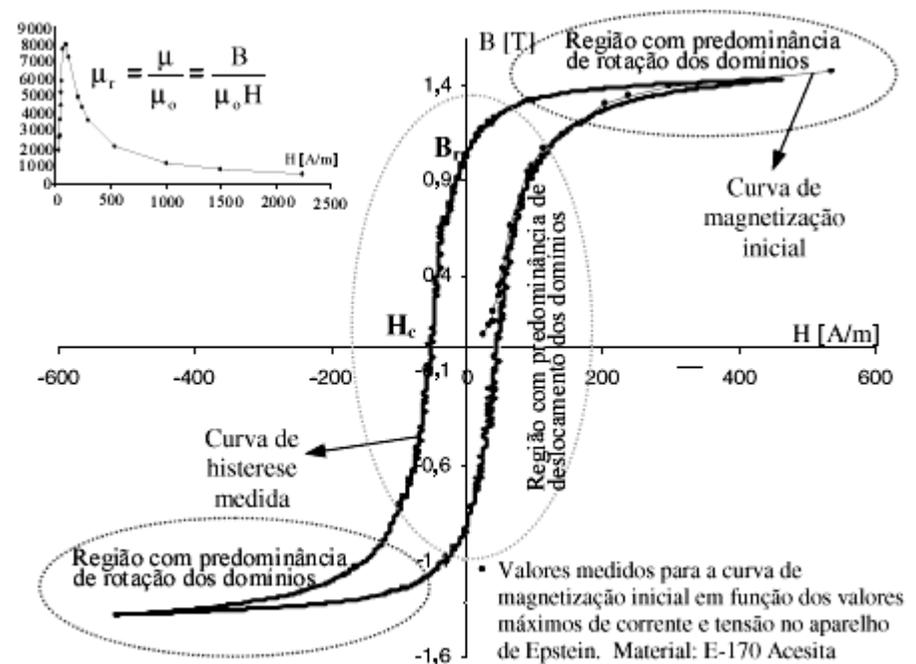


Figura 1: Curva representativa da histerese medida à 1Hz.

Classificação dos materiais

Classificação quanto ao alinhamento magnético:

- Materiais magnéticos moles – não retido;
- Materiais magnéticos duros – permanentemente retido.

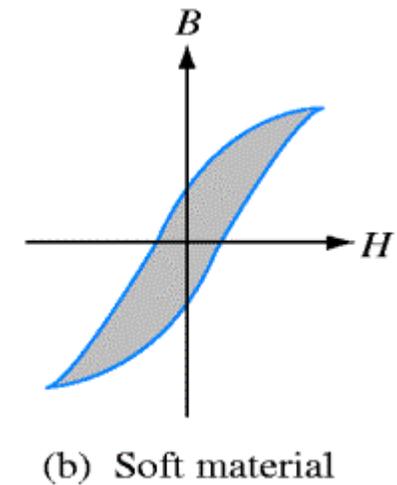
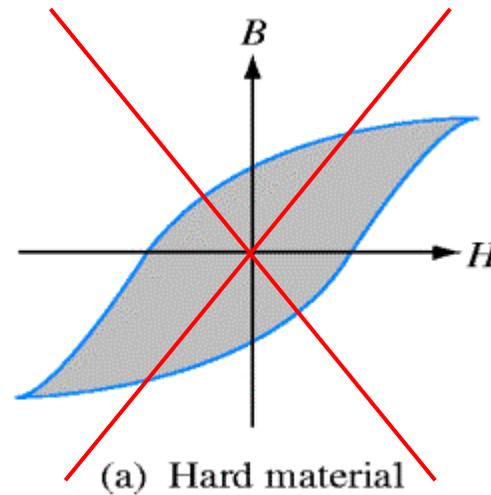
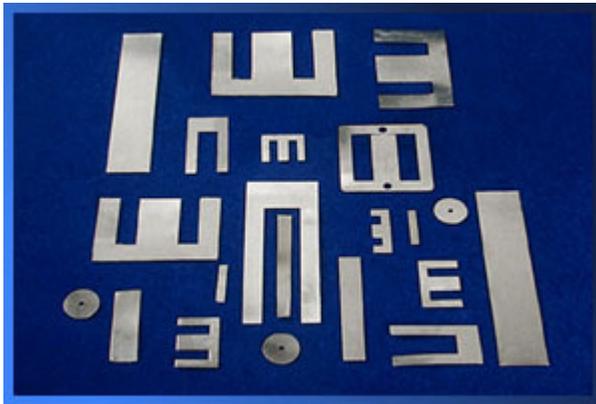
Classificação quanto a susceptibilidade e permeabilidade:

- Diamagnéticos;
- Paramagnéticos;
- Ferromagnéticos;
- Ferrimagnéticos;
- Antiferromagnéticos.

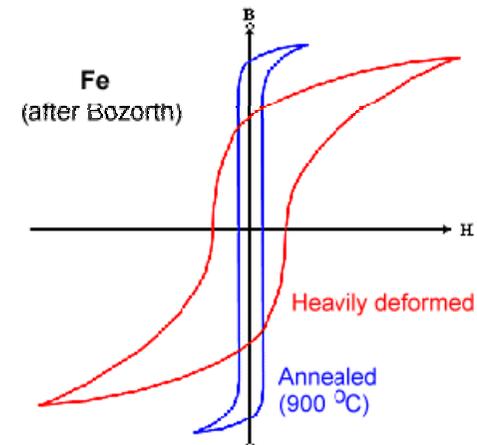
Materiais magnéticos moles

Característica geral:

- Não apresentam magnetismo remanente.



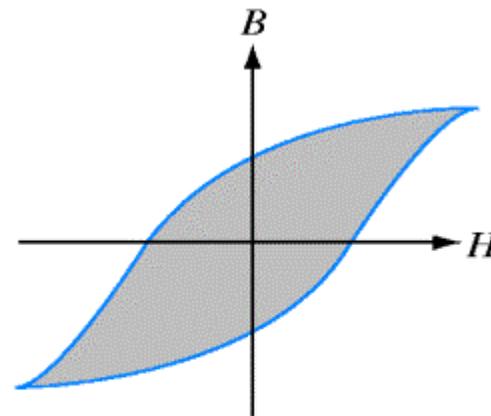
Recozimento →



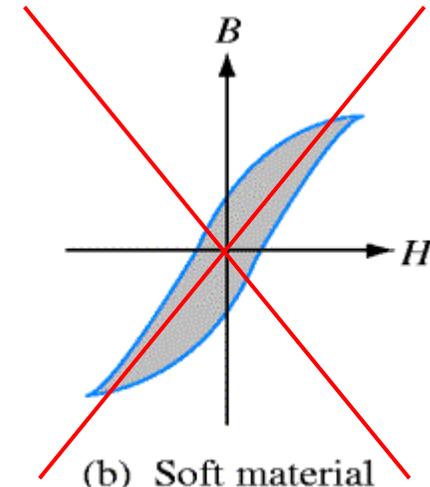
Materiais magnéticos duros

Característica geral:

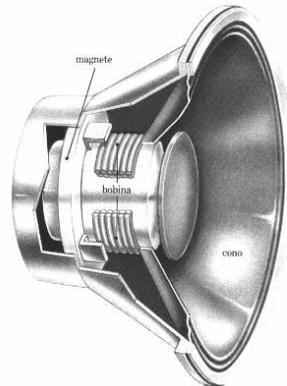
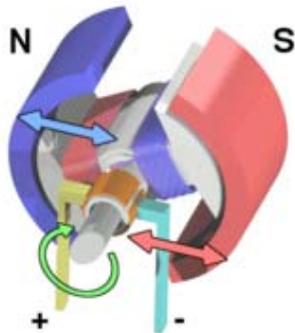
- Apresentam elevado magnetismo remanente.



(a) Hard material



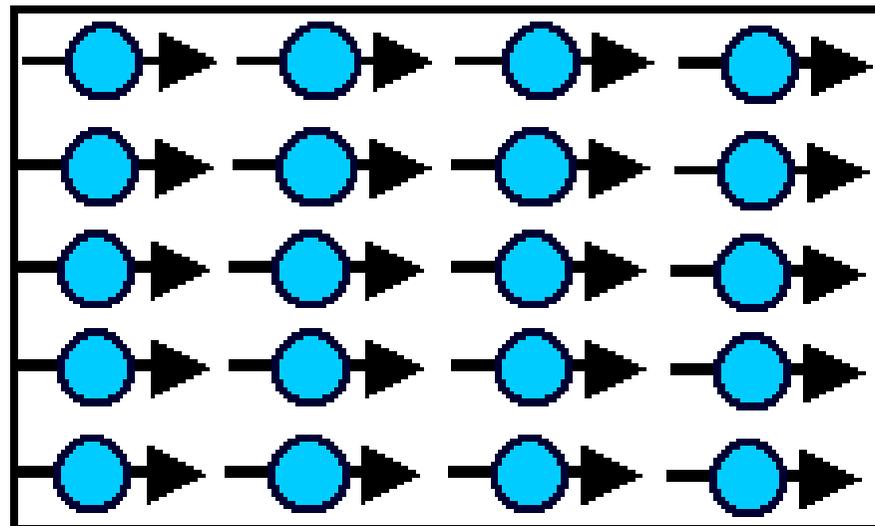
(b) Soft material



Materiais diamagnéticos

Características:

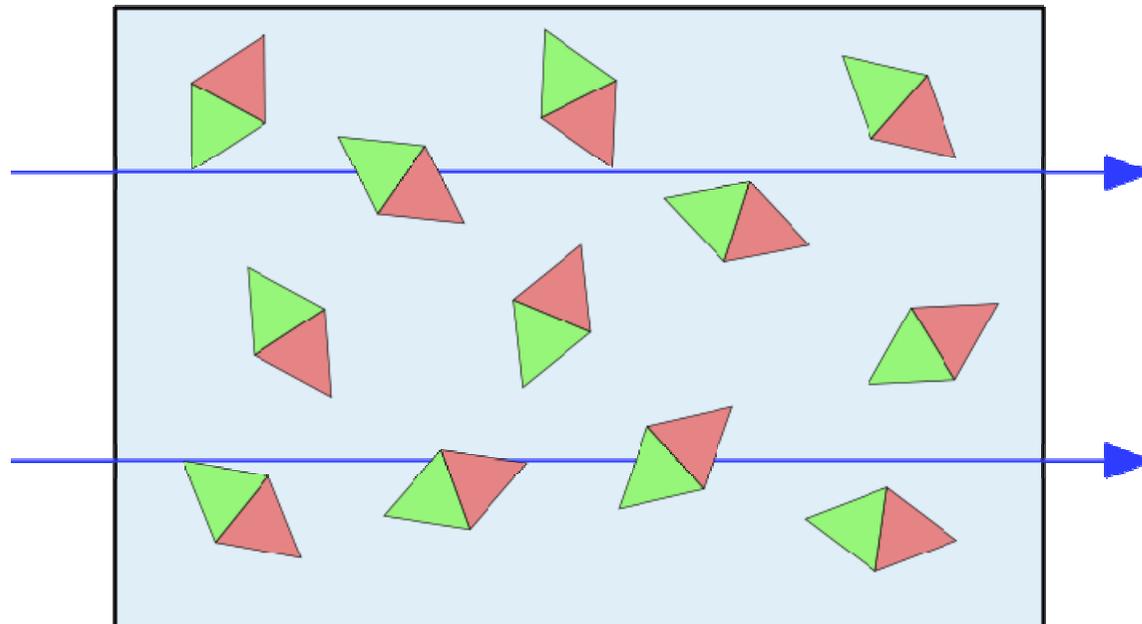
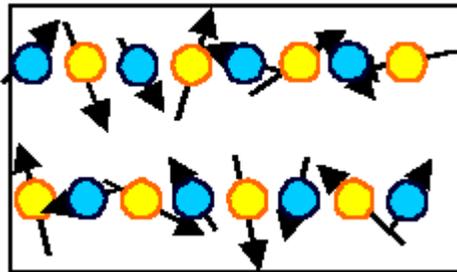
- Apresentam susceptibilidade negativa $\approx 10^{-5}$;
- Permeabilidade abaixo de 1, $\mu < 1$;
- Exemplos: gases inertes, metais (cobre, bismuto, ouro, etc.).



Materiais paramagnéticos

Características:

- Apresentam susceptibilidade positiva $\approx 10^{-5}$ - 10^{-3} ;
- Permeabilidade acima de 1, $\mu > 1$;
- Exemplos: alumínio, platina, sais de: ferro, cobalto, níquel, etc.



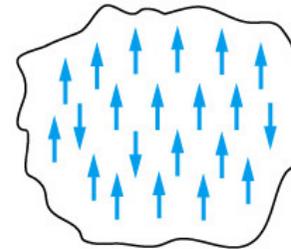
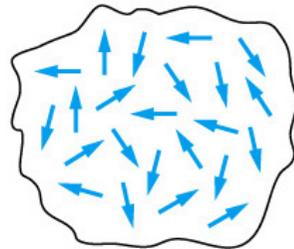
Materiais ferromagnéticos

Características:

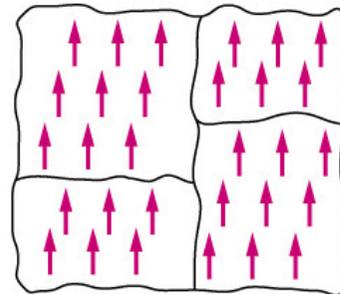
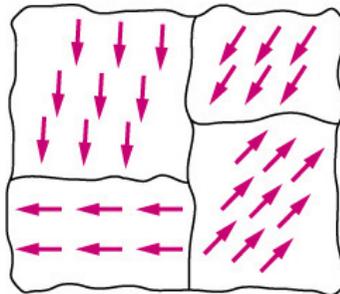
- Apresentam alta susceptibilidade;
- Permeabilidade muito maior que 1, $\mu \gg 1$;
- Exemplos: ferro, níquel, cobalto, cromo, etc.

Magnetic field absent

In presence of magnetic field



Paramagnetism

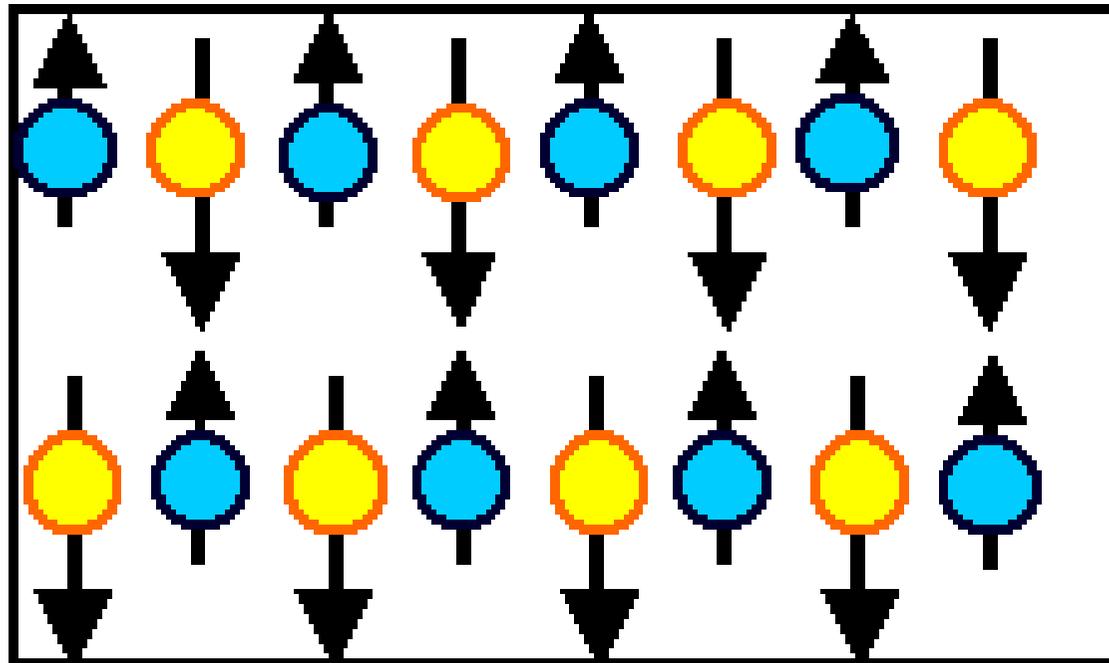


Ferromagnetism

Materiais ferrimagnéticos

Características:

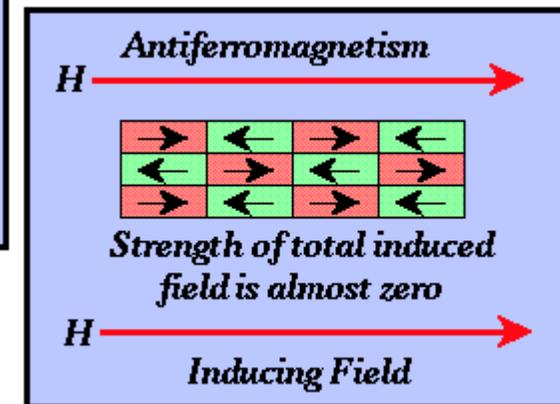
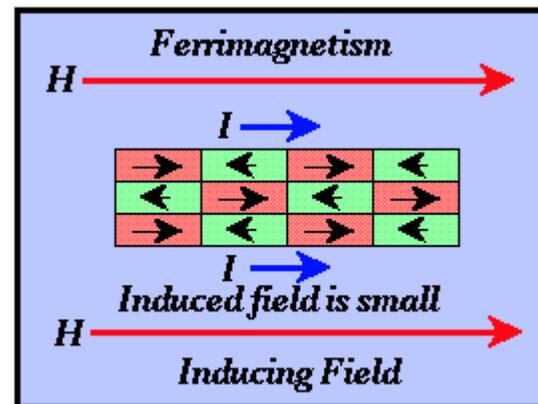
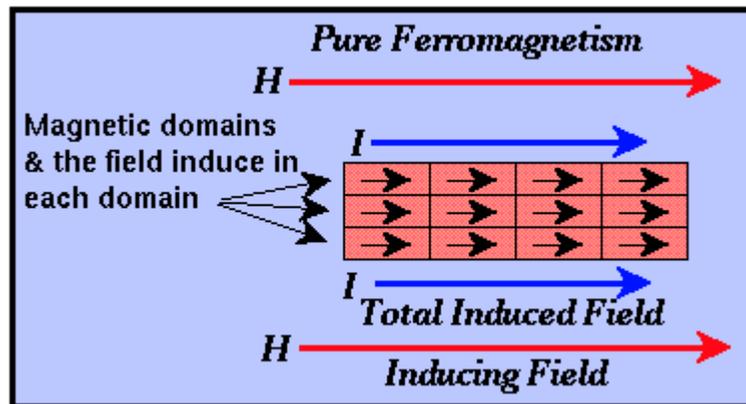
- Apresentam características semelhantes aos ferromagnéticos;
- Os momentos antiparalelos não são exatamente iguais;
- Magnetização resultante não é nula;
- Exemplo: ferrites, possuem rapidez na resposta da magnetização e alta resistividade.



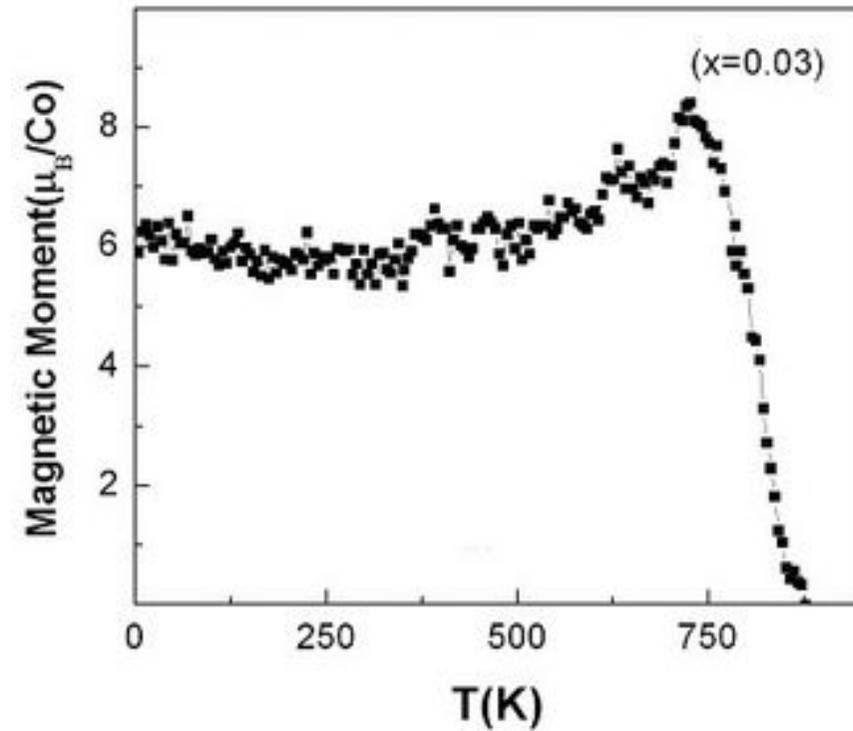
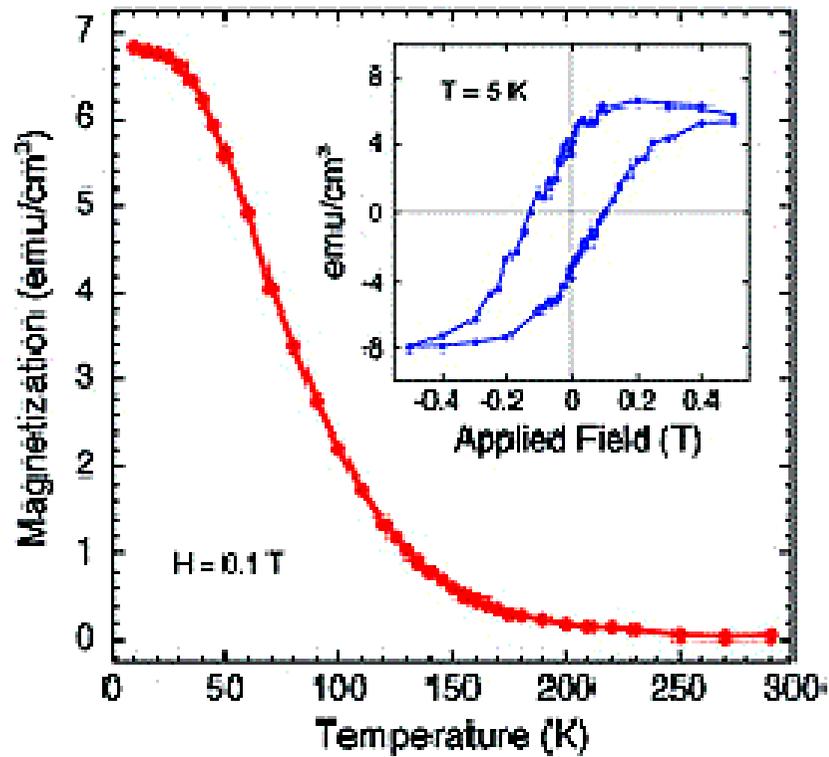
Materiais antiferromagnéticos

Características:

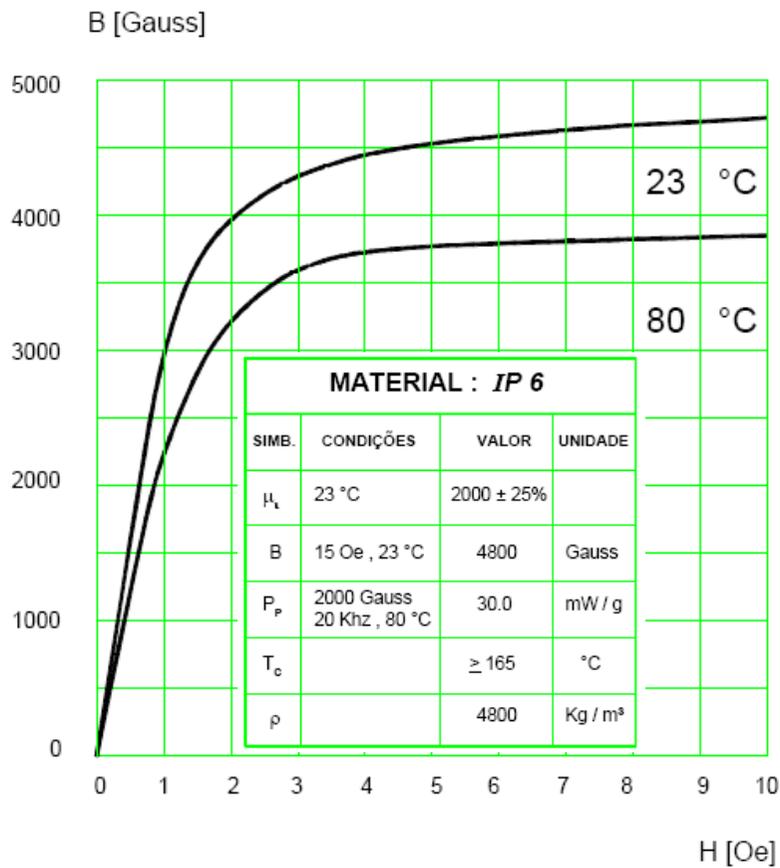
- Apresentam características semelhantes aos ferromagnéticos;
- Os momentos antiparalelos são iguais;
- Magnetização resultante é nula;
- Exemplo: cabeçotes de leitura de gravação magnética.



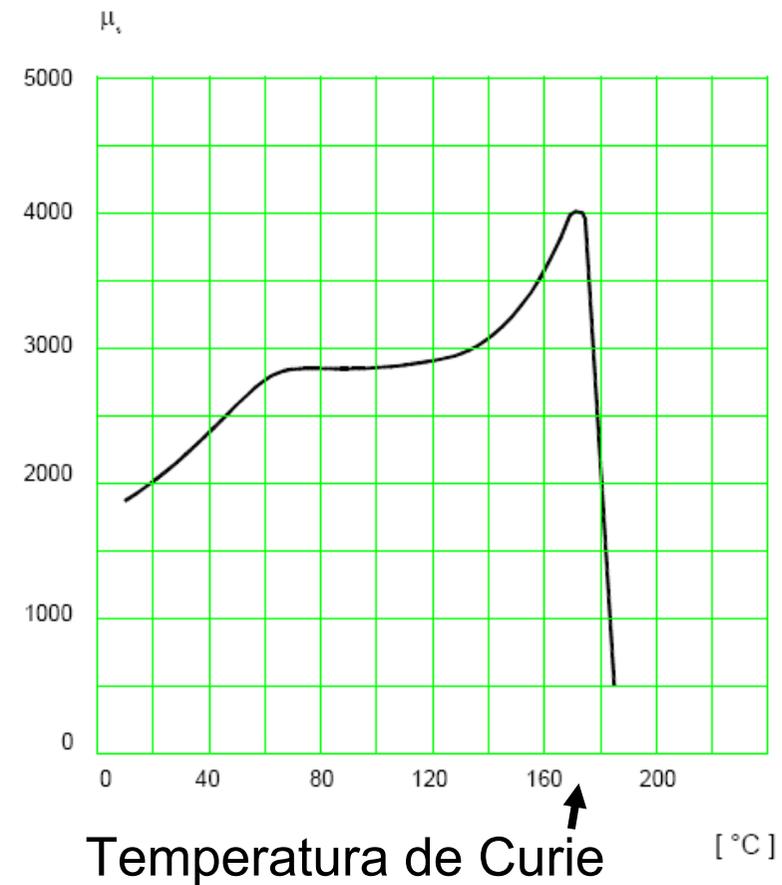
Fluxo magnético versus temperatura



Permeabilidade versus temperatura



Típico B x H

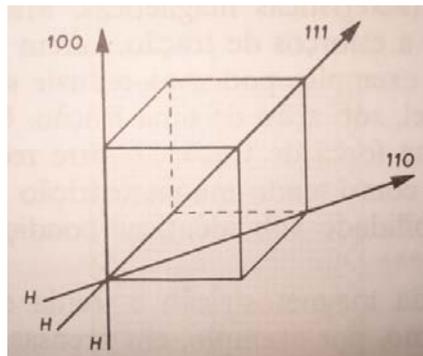
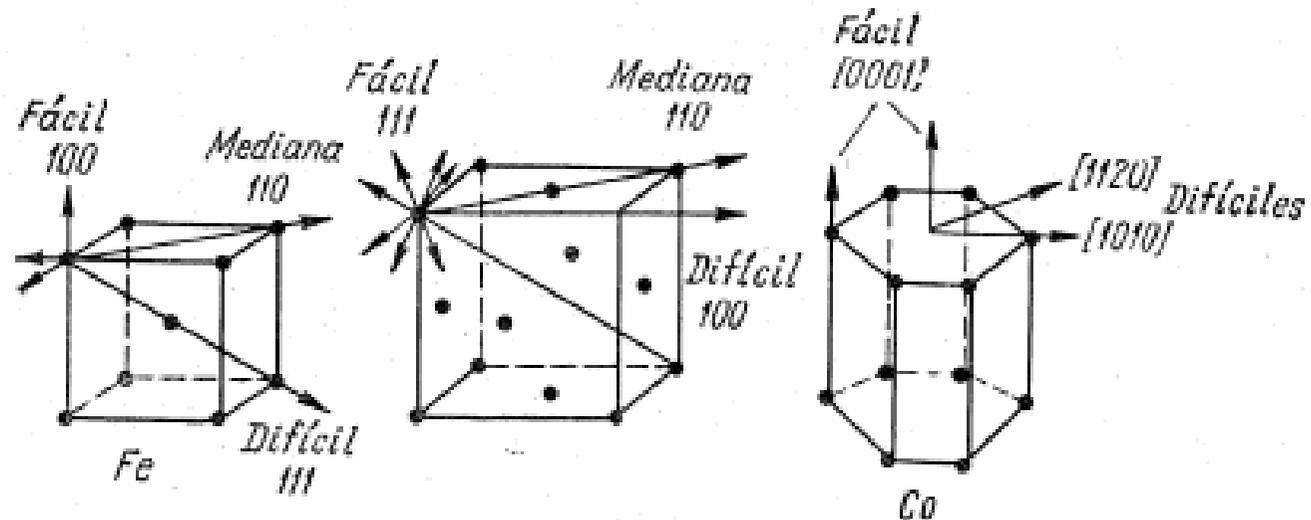


μ_i x Temperatura

Fluxo magnético versus direção cristalográfica

Anisotropia cristalina:

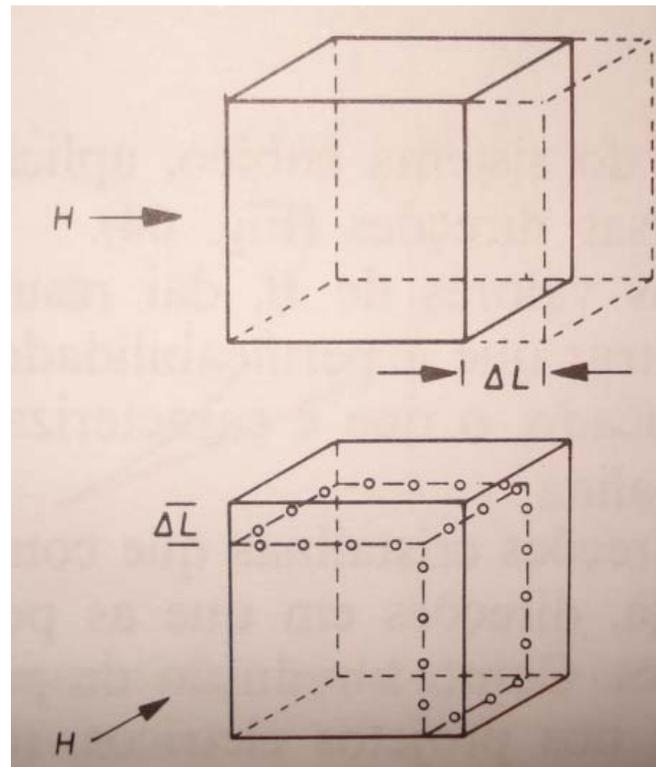
- Reação diferente conforme a direção do campo;
- Direção preferencial de magnetização.



Magnetostricção

Magnetostricção:

- Variação das dimensões do material conforme a aplicação de um campo magnético;
- Aplicação em sensores, por exemplo.



Próxima aula

Cronograma:

1. Propriedades gerais dos materiais;
2. **Materiais magnéticos;**
3. Materiais condutores;
4. Materiais semicondutores;
5. Materiais isolantes.