

# Curso Técnico em Eletrotécnica

## Campos Magnéticos, Densidade de Fluxo, Permeabilidade e Relutância

### Circuitos Magnéticos

1. Conceitos iniciais;
2. Campos magnéticos;
3. Densidade de Fluxo magnético;
4. Permeabilidade magnética;
5. Relutância.

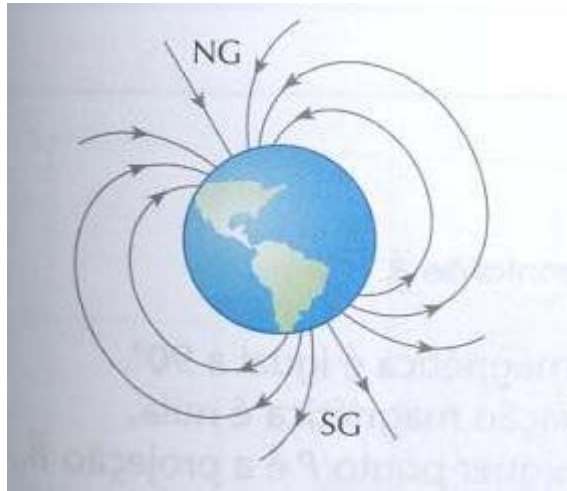
### Divisão histórica:

- Magnetismo;
- Eletromagnetismo

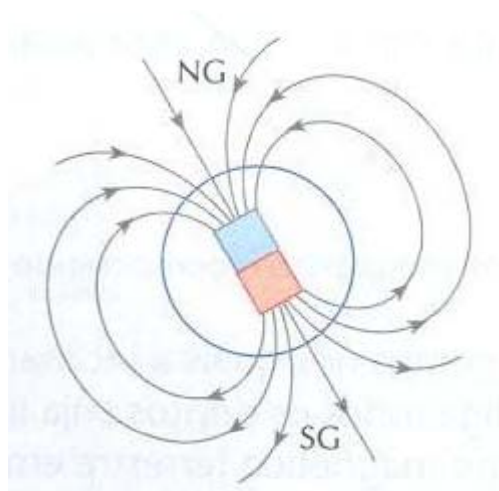
## Vitória-ES

# Conceitos iniciais

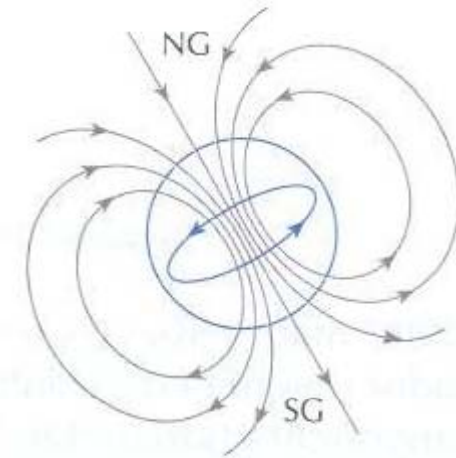
## Magnetismo terrestre



Magnetismo terrestre



A terra como um ímã

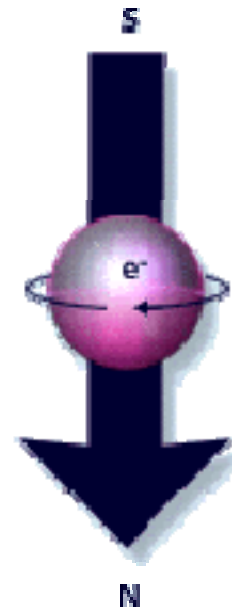
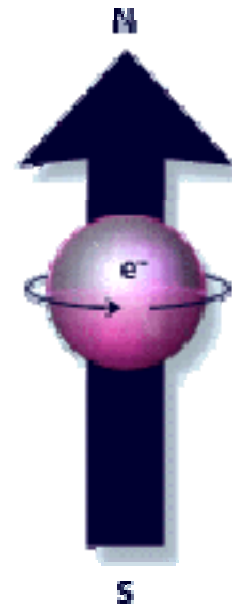
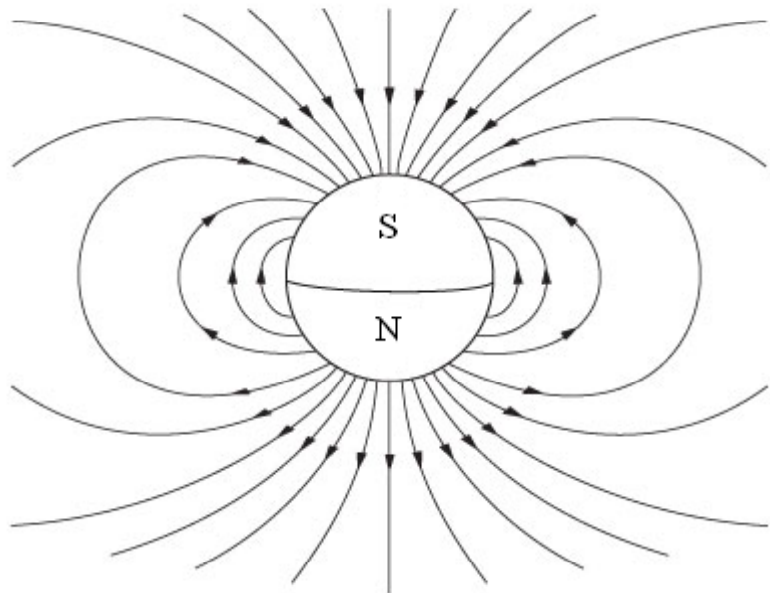


Explicação moderna

## Conceitos iniciais

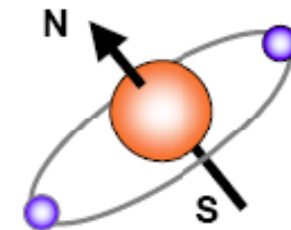
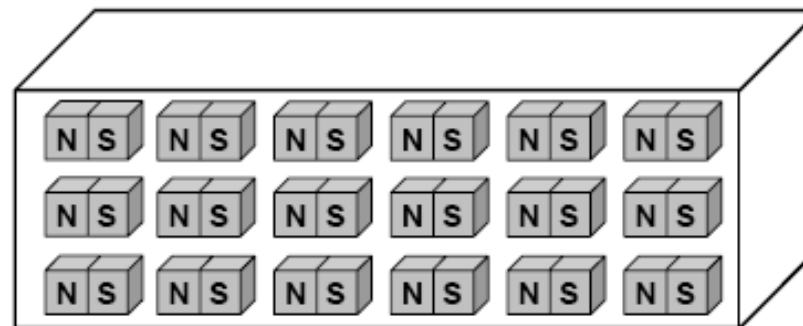
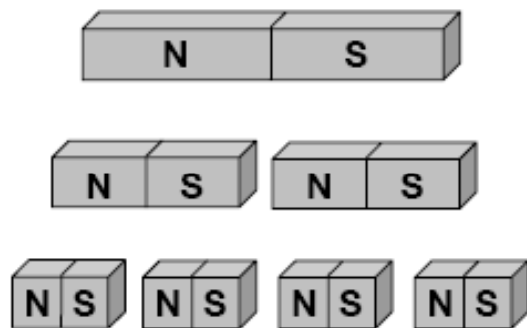
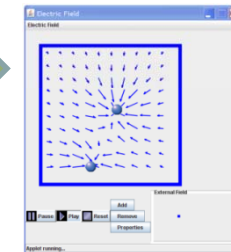
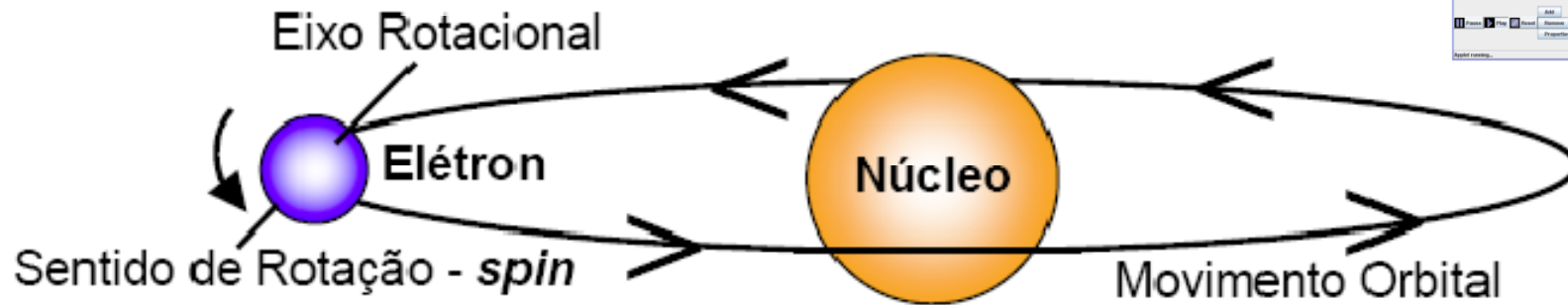
### Dipolos magnéticos:

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



# Conceitos iniciais

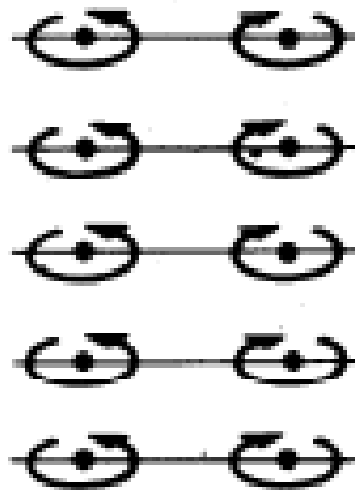
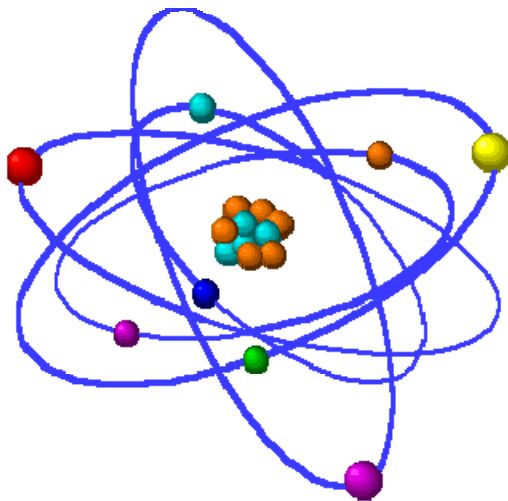
## Dipolos magnéticos



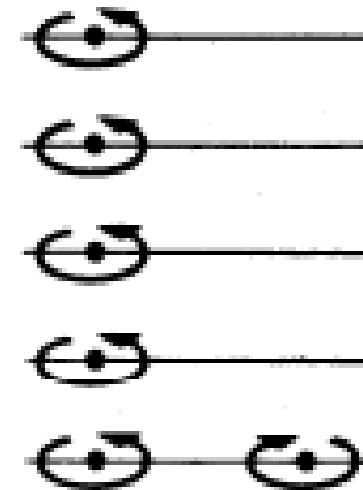
## Conceitos iniciais

### 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

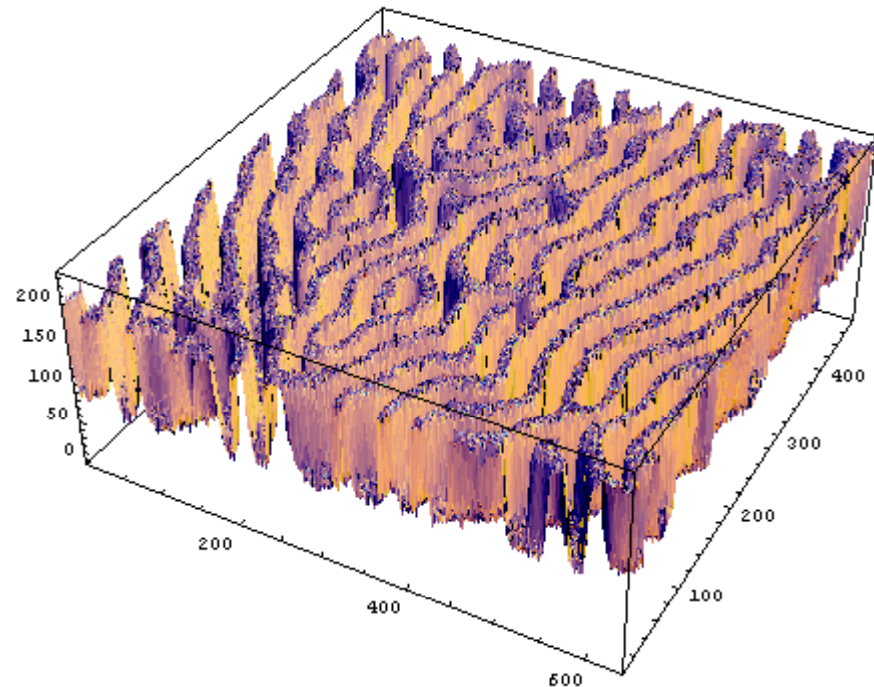
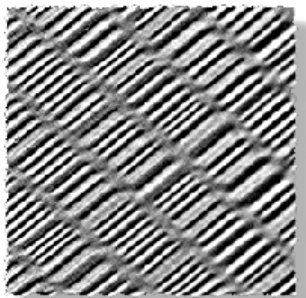
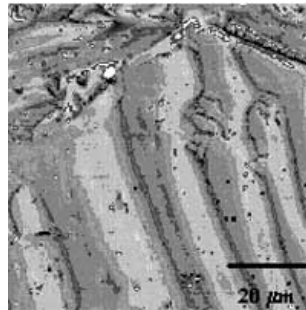
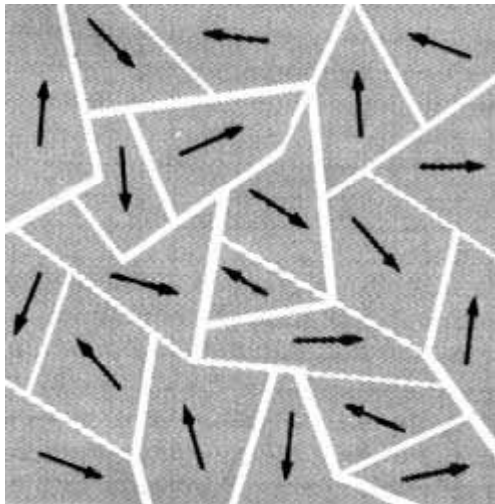


Momento  $\neq 0$

## Conceitos iniciais

### Domínios magnéticos:

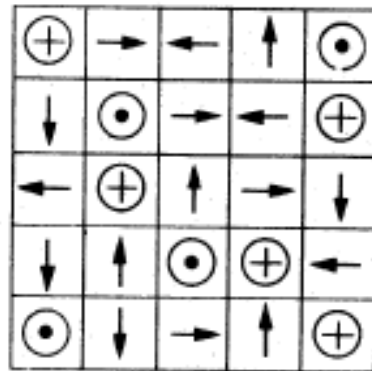
- Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
- Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
- Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.



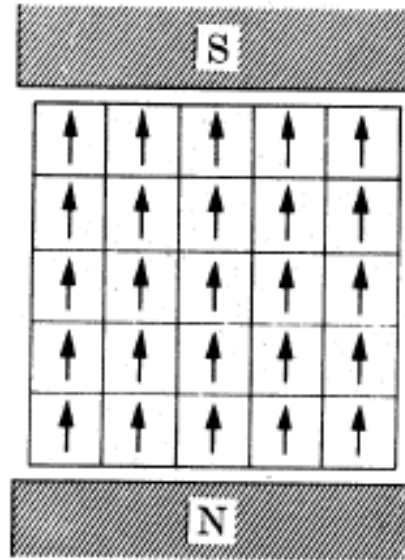
## Conceitos iniciais

### Alinhamento dos domínios:

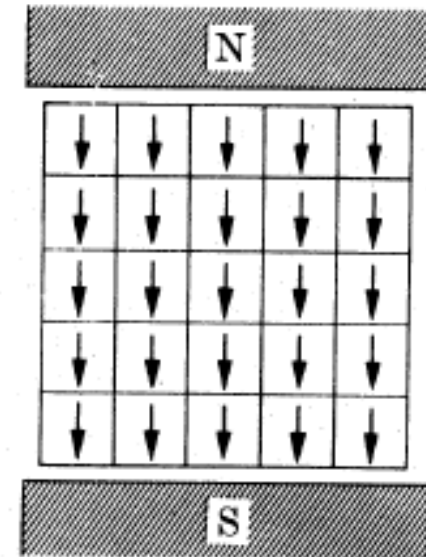
- Aplicando um campo magnético externo.



Desmagnetizado



Magnetizado

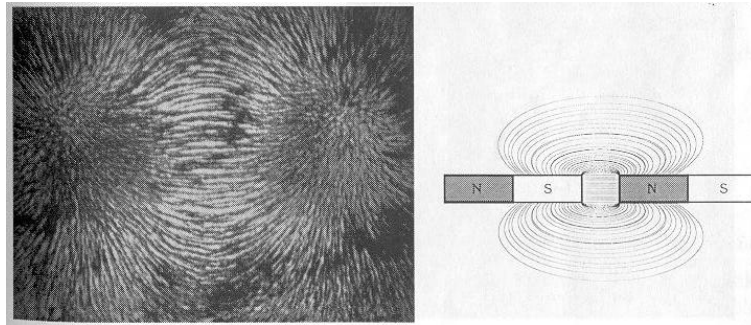


Magnetizado ao contrário

## Conceitos iniciais

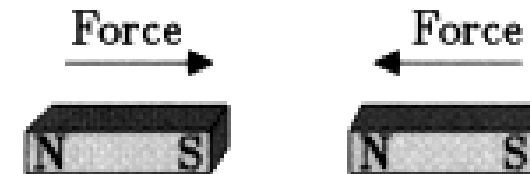
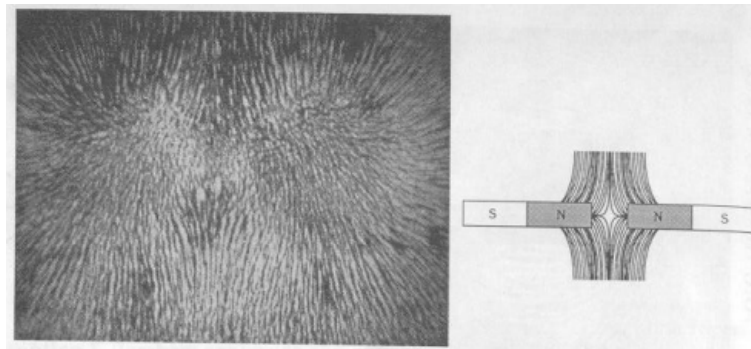
### Forças de atração e repulsão magnéticas

Atração



Repulsion

Repulsão



Attraction

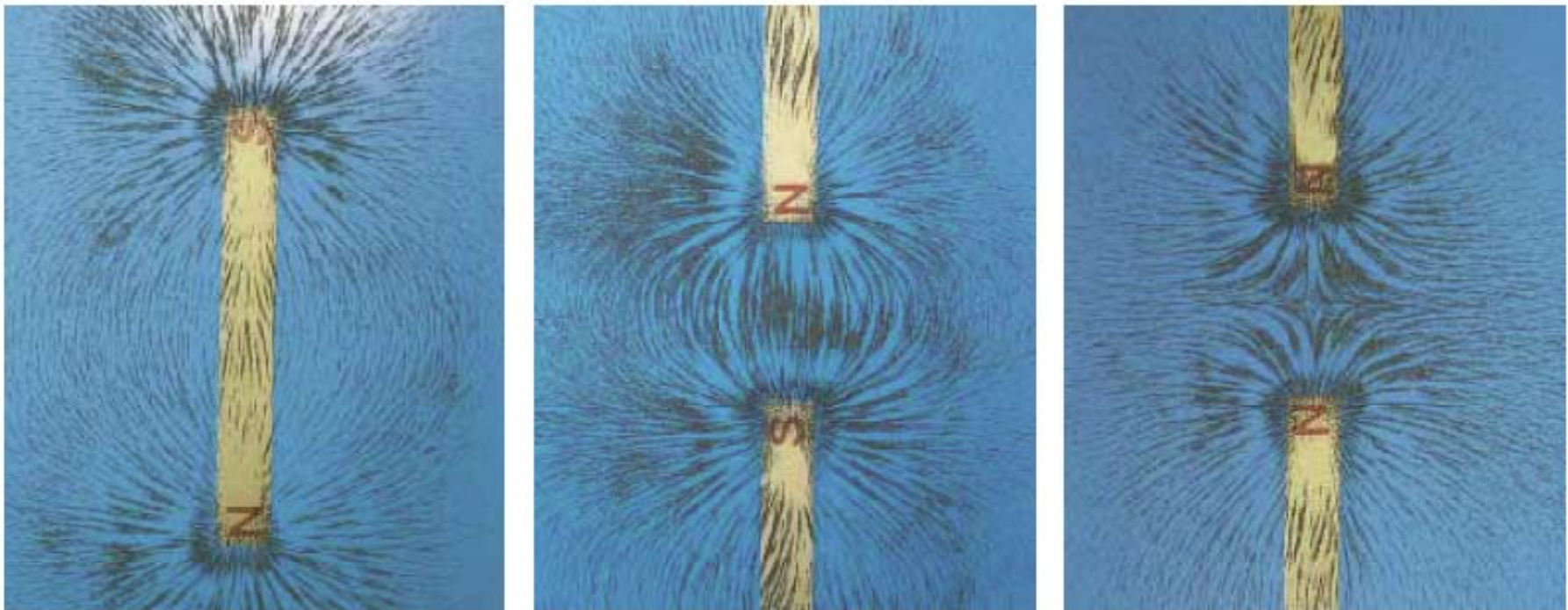
Pólos de mesmo nome se repelem e de nomes diferentes se atraem.



## Campo magnético

### Definição:

Define-se como campo magnético como toda região do espaço em torno de um condutor percorrido por corrente ou de um ímã.

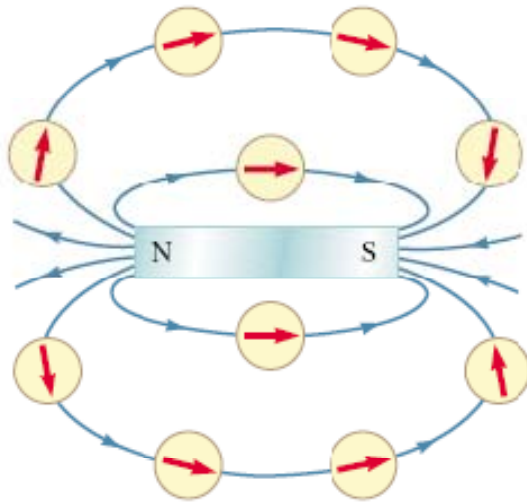


Um ímã produz um campo magnético vetorial,  $B$ , em todos os pontos ao seu redor.

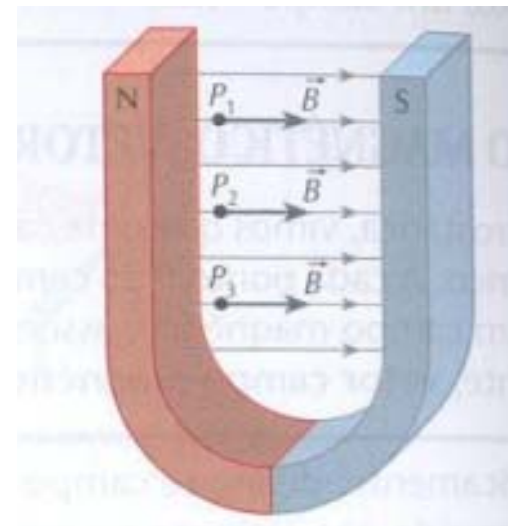
## Campo magnético

### Linhas de campo magnético:

- São sempre linhas fechadas;
- Nunca se cruzam;
- Fora do imã, saem do norte e são orientadas para o sul;
- Dentro do imã tem orientação contrária;
- Saem e entram perpendicularmente à superfície do imã;
- Quanto maior a concentração das linhas, mais intenso é o campo.

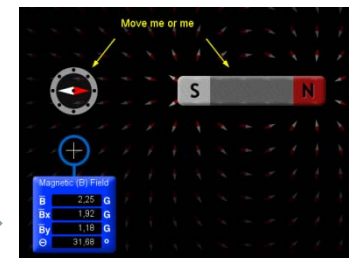
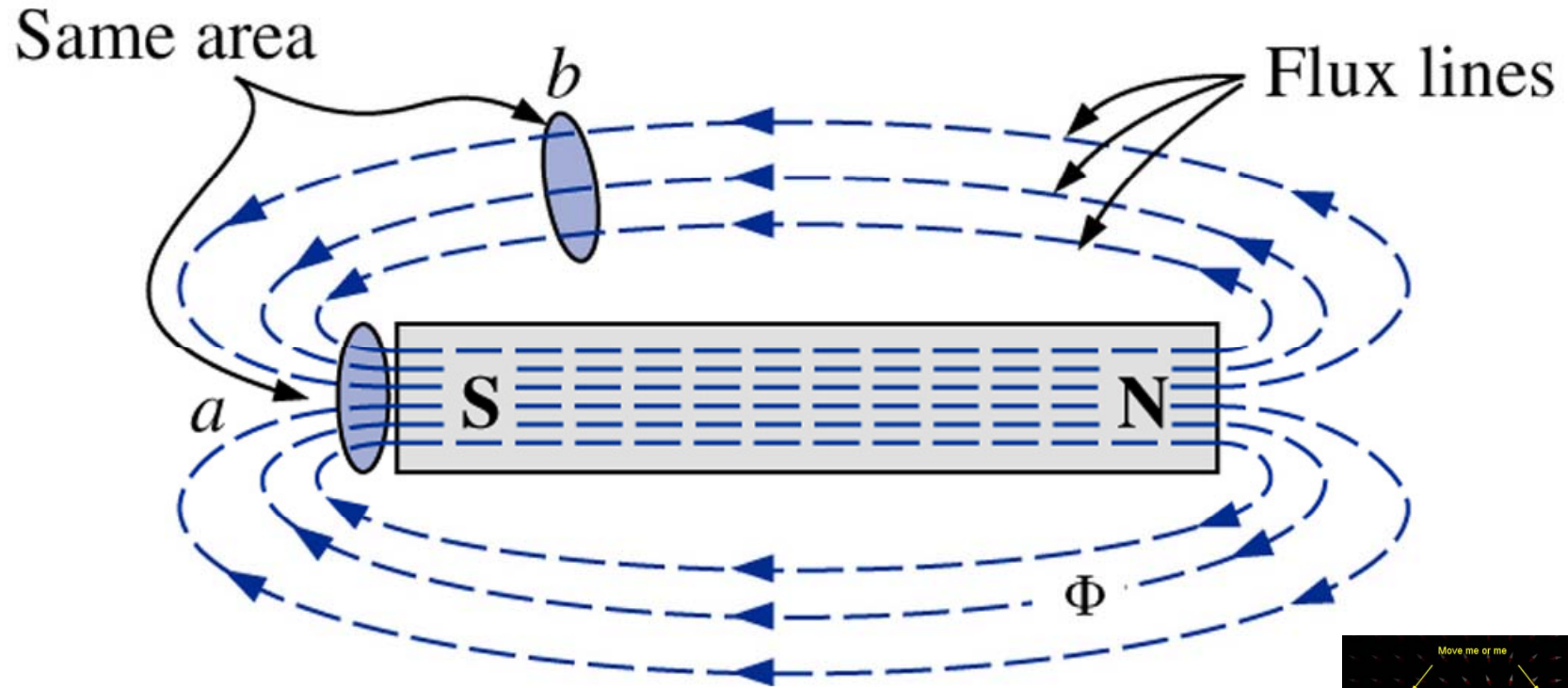


Campo não-uniforme



Campo uniforme

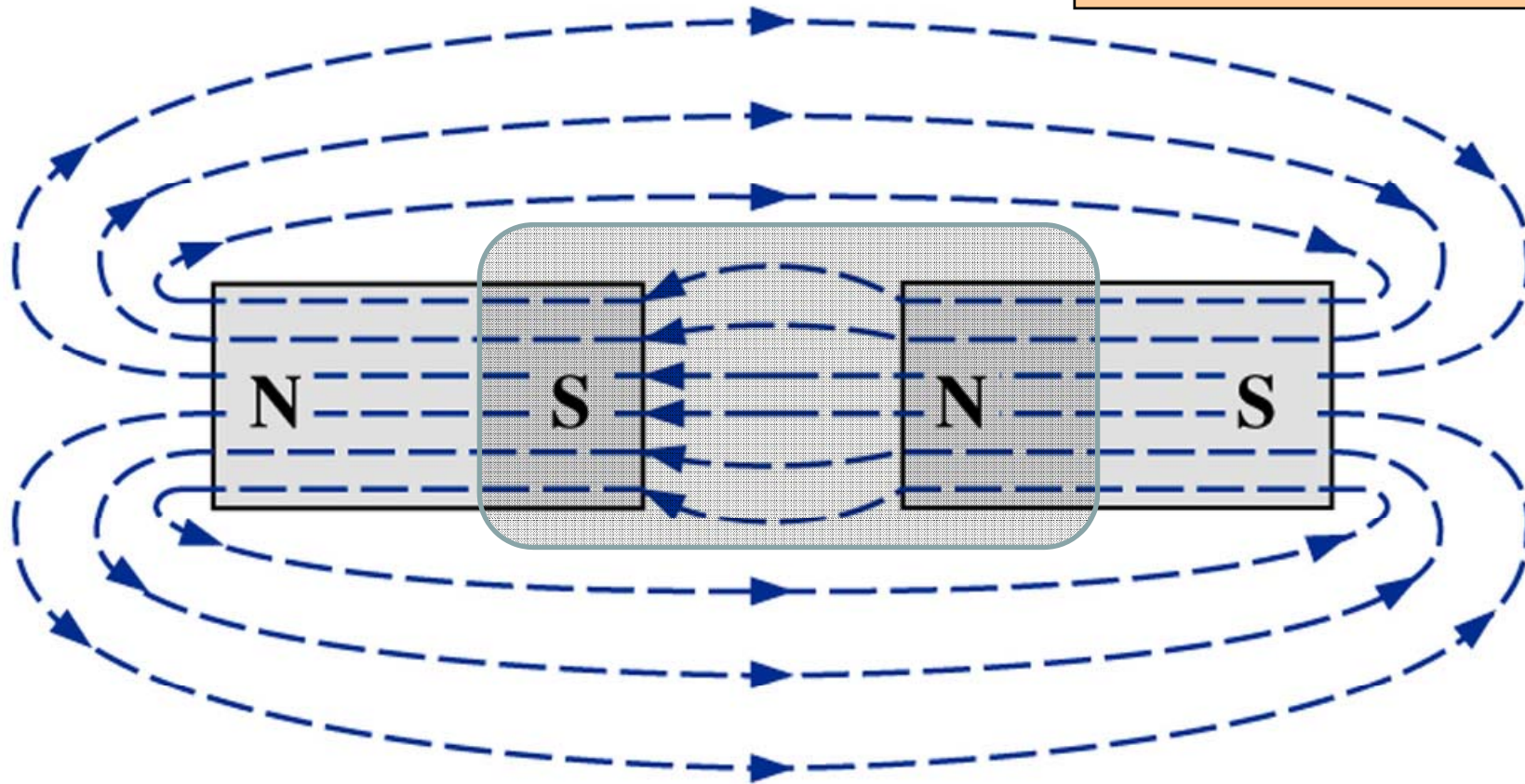
# Campo magnético



Linhas de campo magnético para um imã permanente.

# Campo magnético

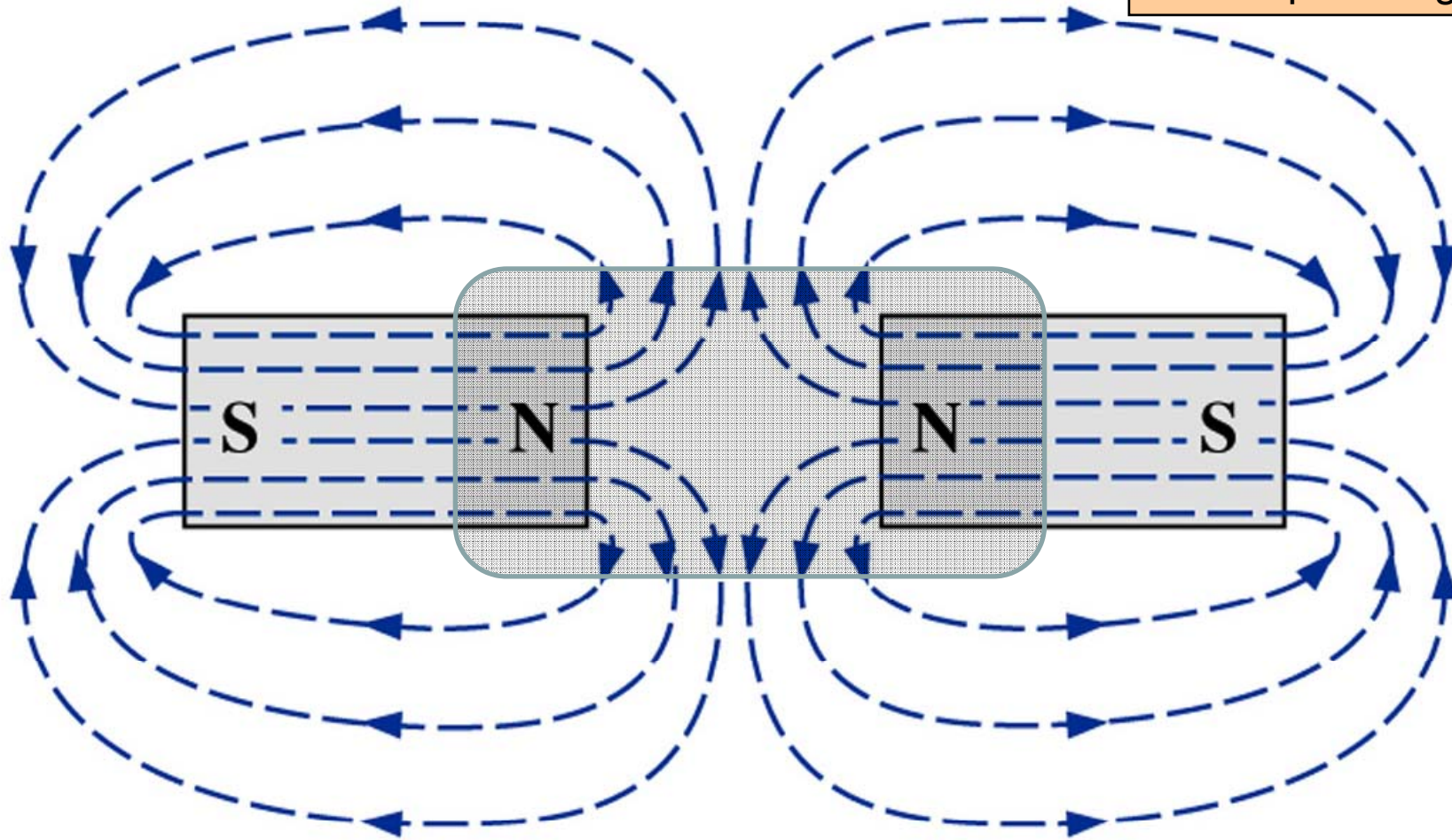
Pólos opostos adjacentes



Distribuição das linhas de campo para um sistema de dois ímãs.

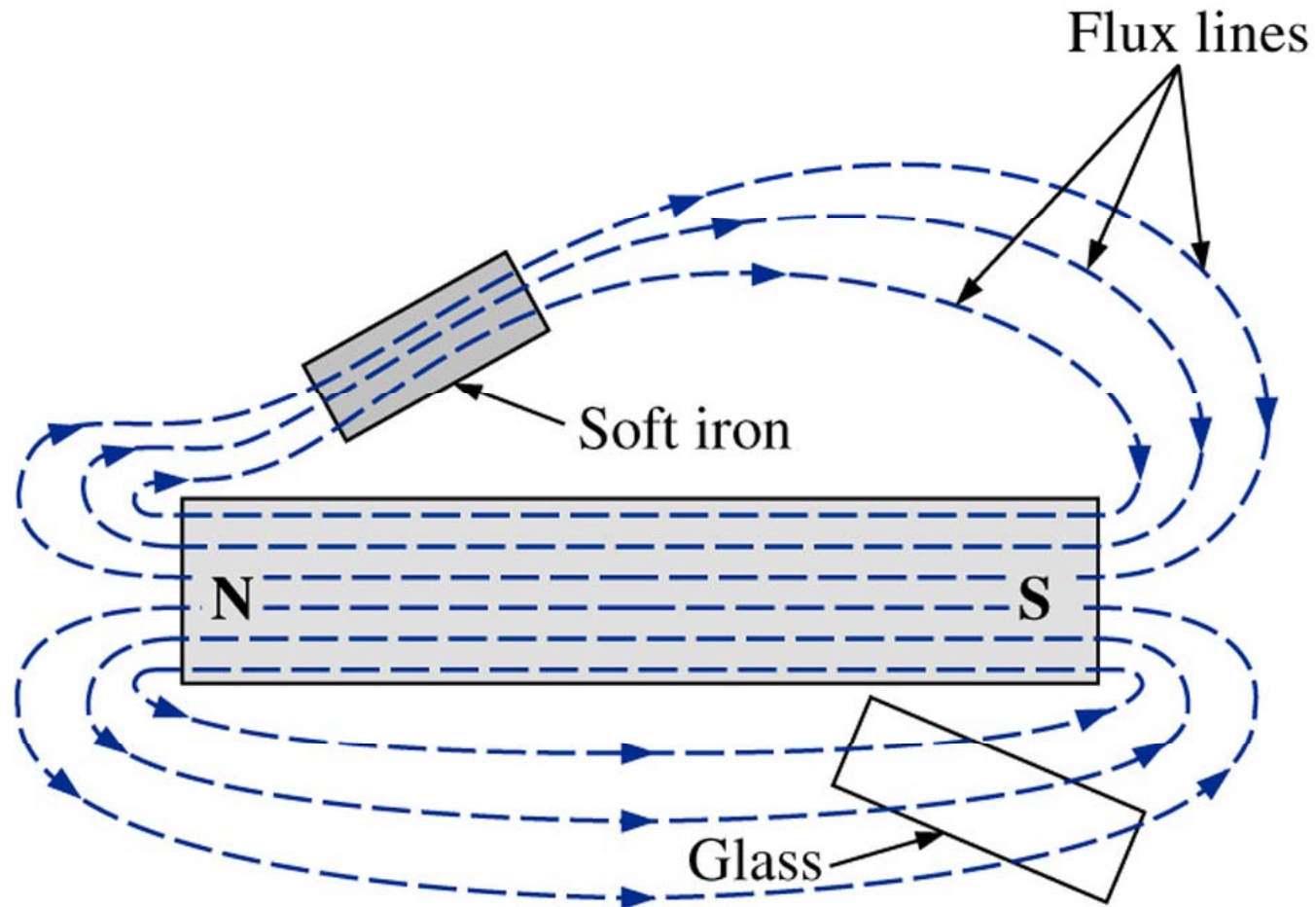
# Campo magnético

Pólos opostos iguais



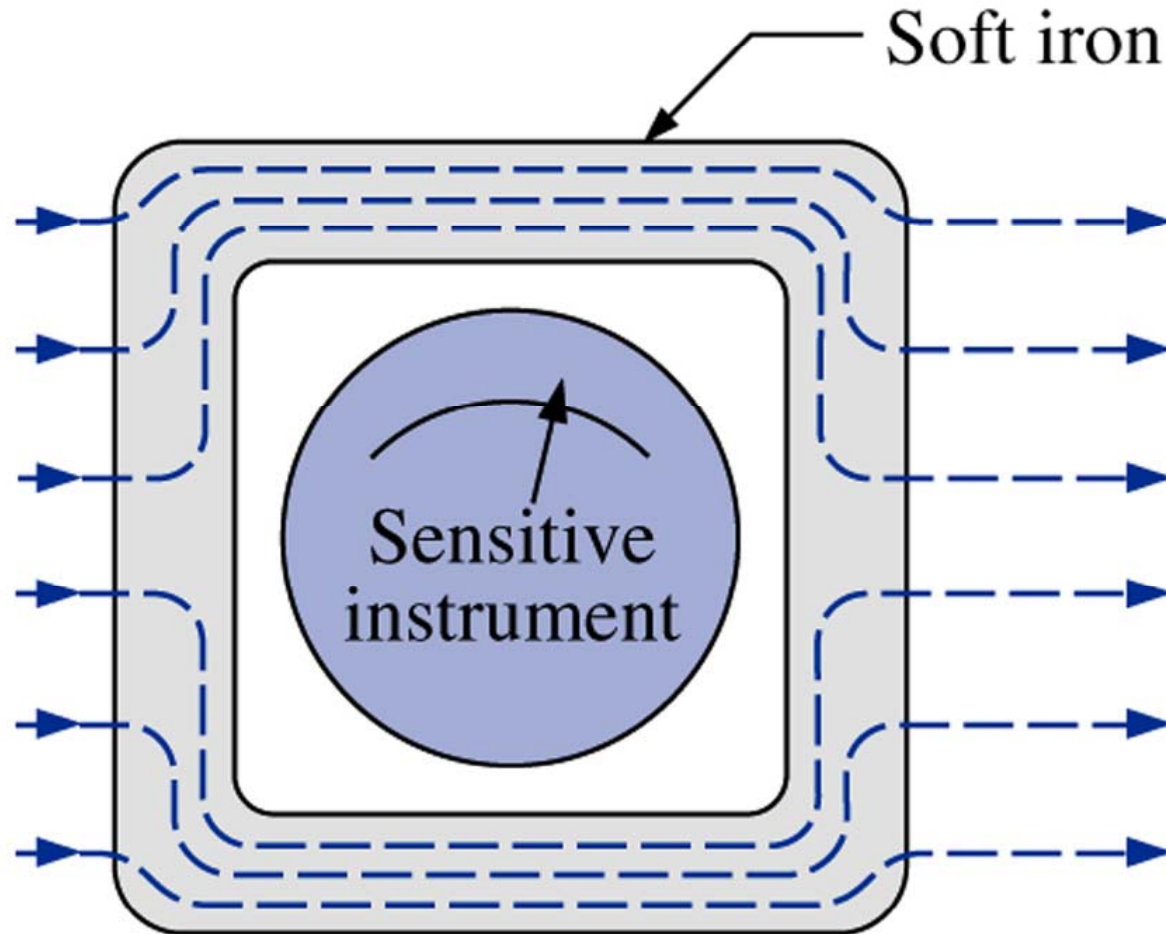
Distribuição das linhas de campo para um sistema de dois ímãs.

# Campo magnético



Efeito de material ferromagnético sobre as linhas de campo.

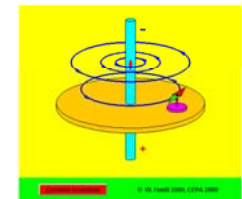
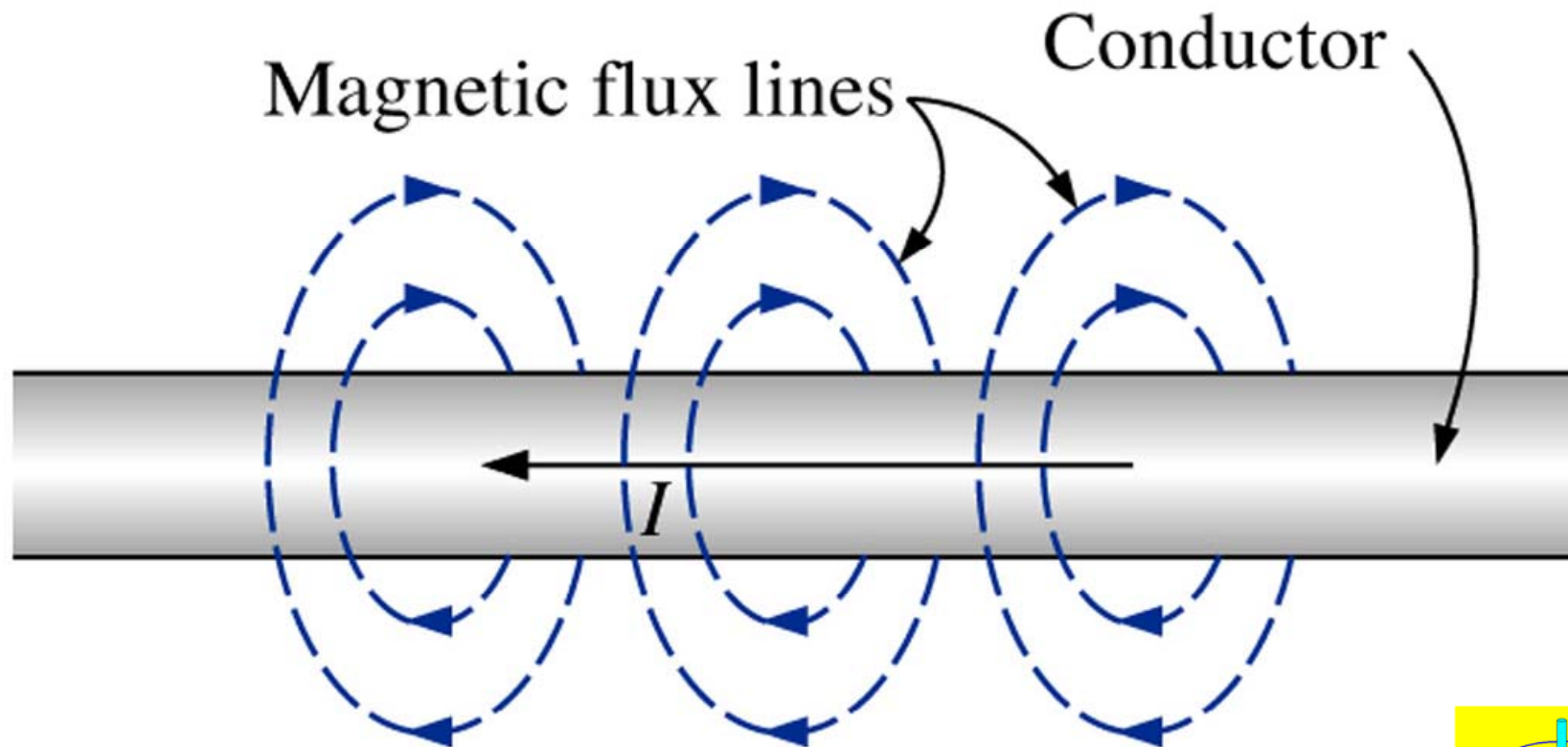
## Campo magnético



Efeito de material ferromagnético sobre as linhas de campo.

## Campo magnético

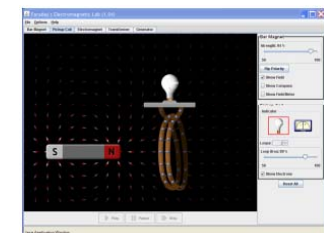
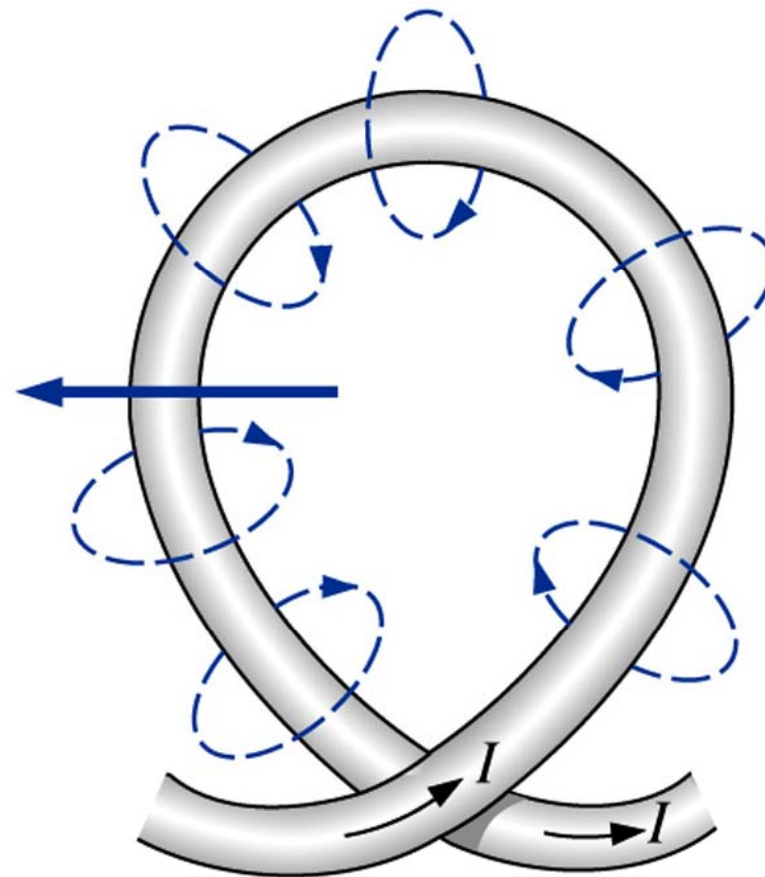
**Linhas de campo em um condutor retilíneo percorrido por corrente:**





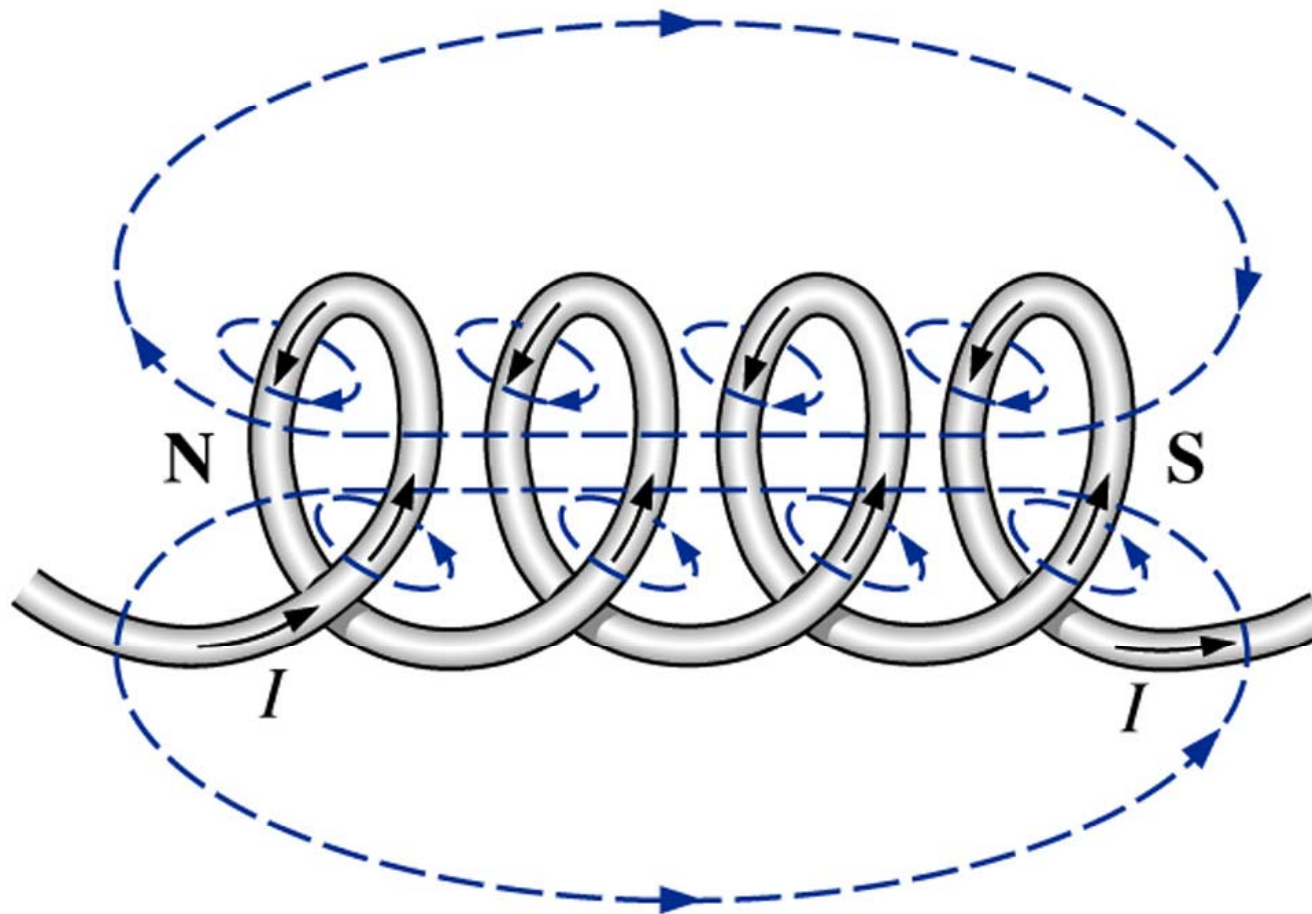
## Campo magnético

**Linhas de campo em uma espira circular percorrida por corrente:**



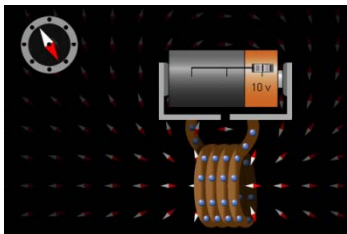
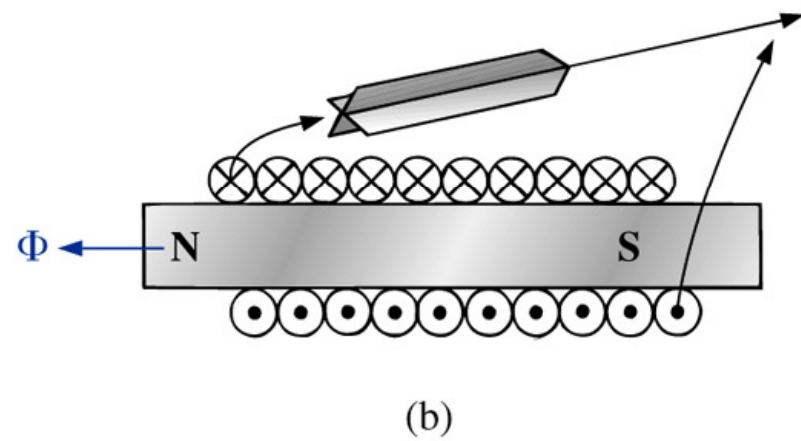
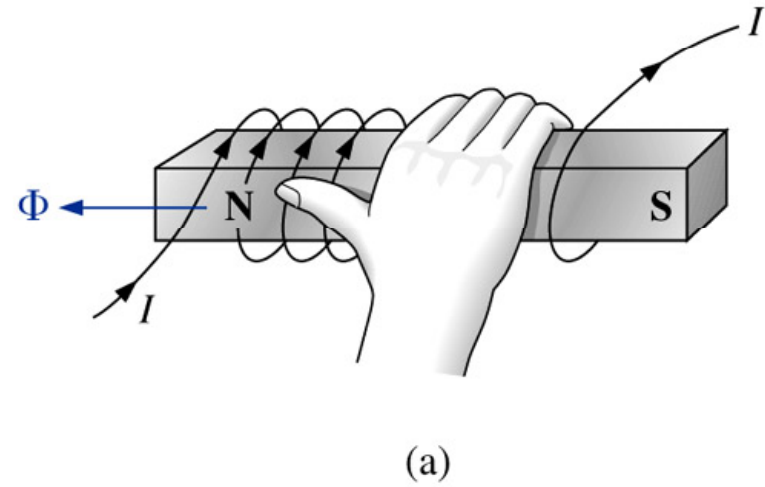
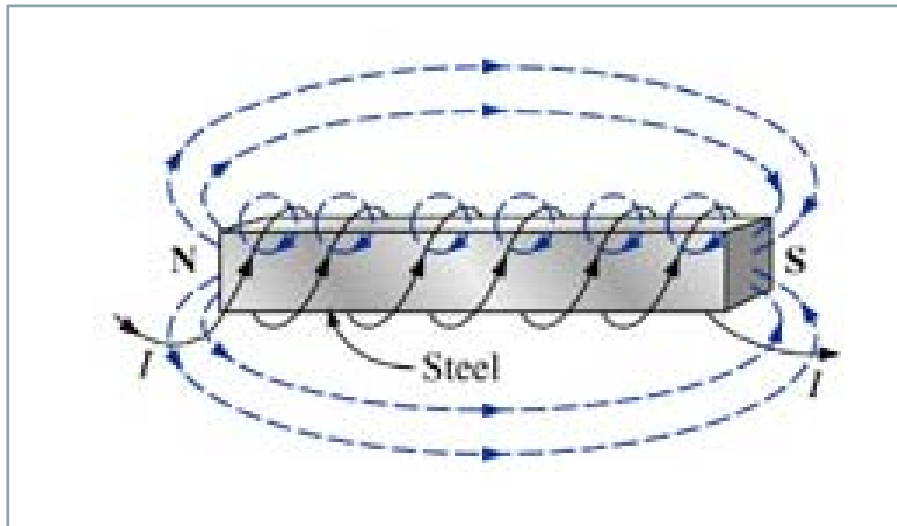
## Campo magnético

**Linhas de campo em uma bobina percorrida por corrente:**



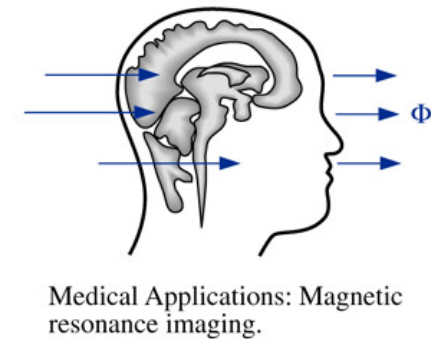
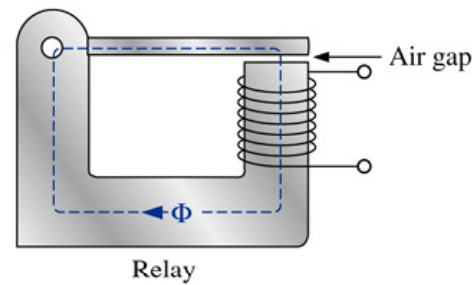
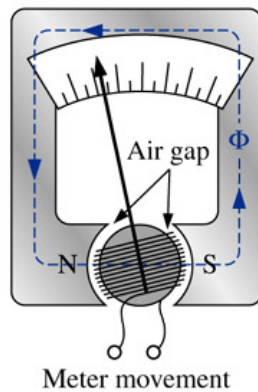
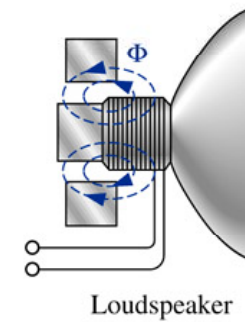
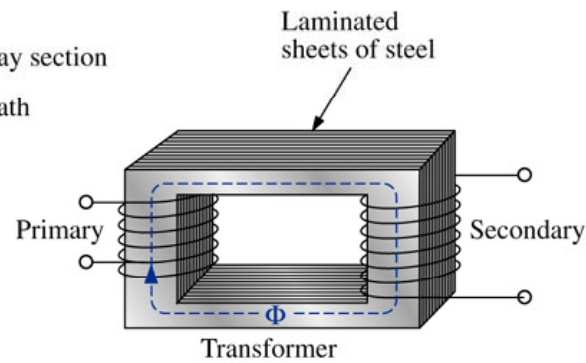
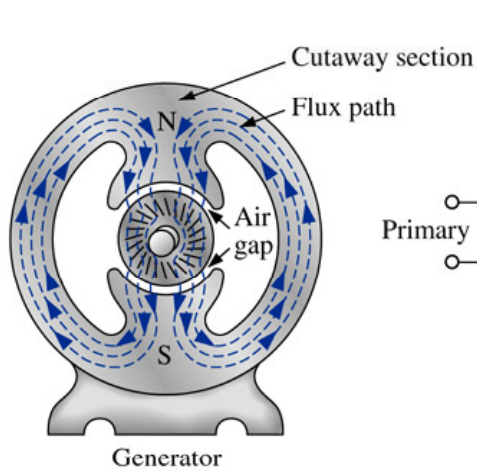
# Campo magnético

**Eletroímã:**



# Campo magnético

## Algumas aplicações de efeitos magnéticos:



## Densidade de fluxo magnético

### Densidade de fluxo magnético:

- Densidade de fluxo (B) é número de linhas de campo por unidade de área.
- Unidade é Tesla [T];
- Um Tesla é igual a 1 Weber por metro quadrado de área.

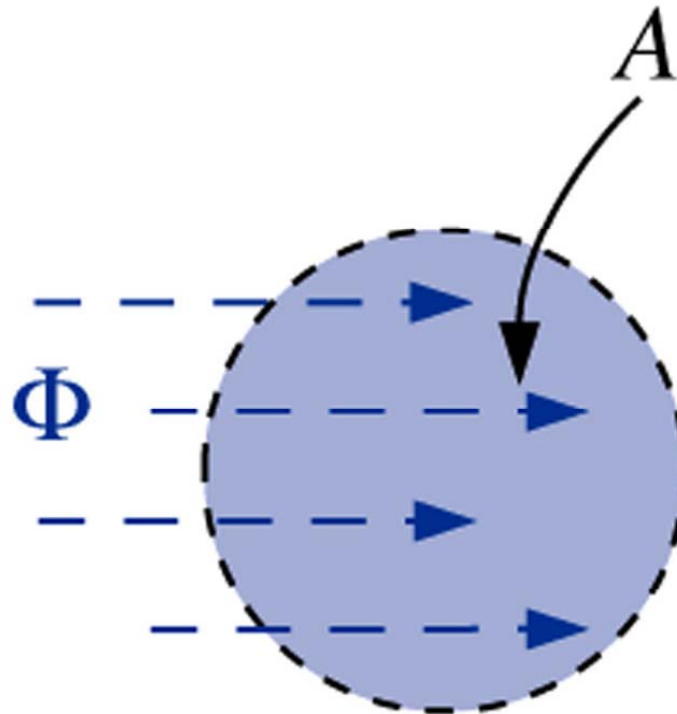
### Fluxo magnético:

- Fluxo ( $\phi$ ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma área.
- Unidade é weber [Wb];
- Um Weber corresponde a  $1 \times 10^8$  linhas de campo.

## Densidade de fluxo magnético

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

- B = teslas (T)
- $\Phi$  = webers (Wb)
- A = metros quadrados ( $m^2$ )



## Densidade de fluxo magnético

Exemplo 11.1: Determine, para a peça da figura abaixo, a densidade de fluxo em teslas:



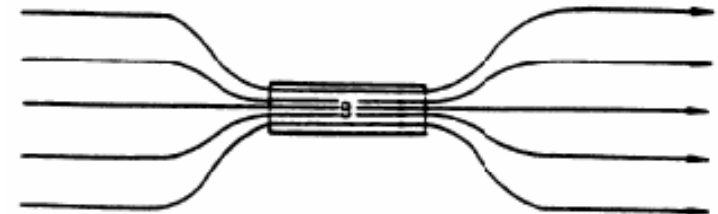
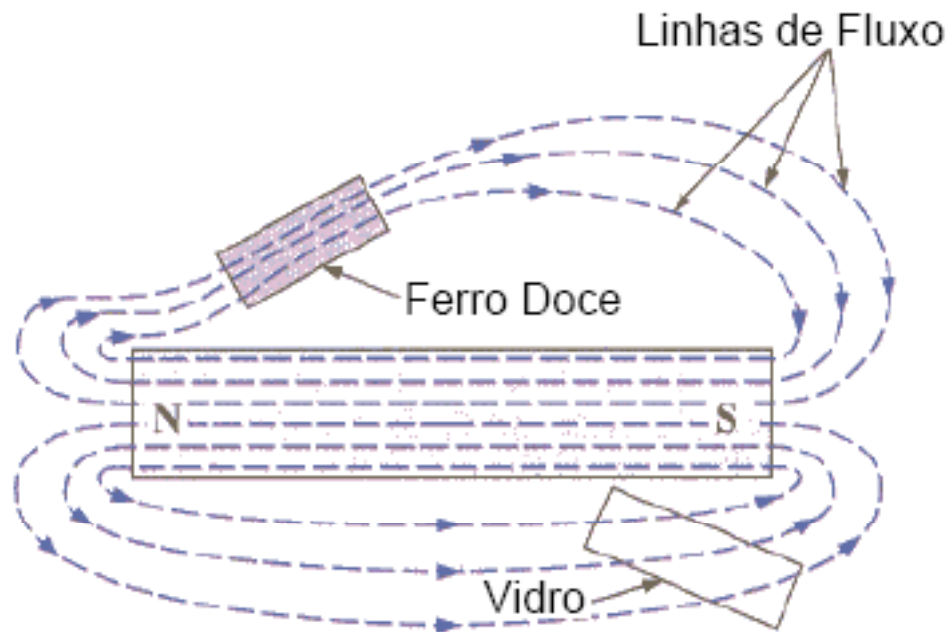
$$\begin{aligned}\Phi &= 6 \times 10^{-5} \text{ Wb} \\ A &= 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{6 \cdot 10^{-5}}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 5 \cdot 10^{-2} T$$

# Permeabilidade magnética

## Permeabilidade magnética:

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





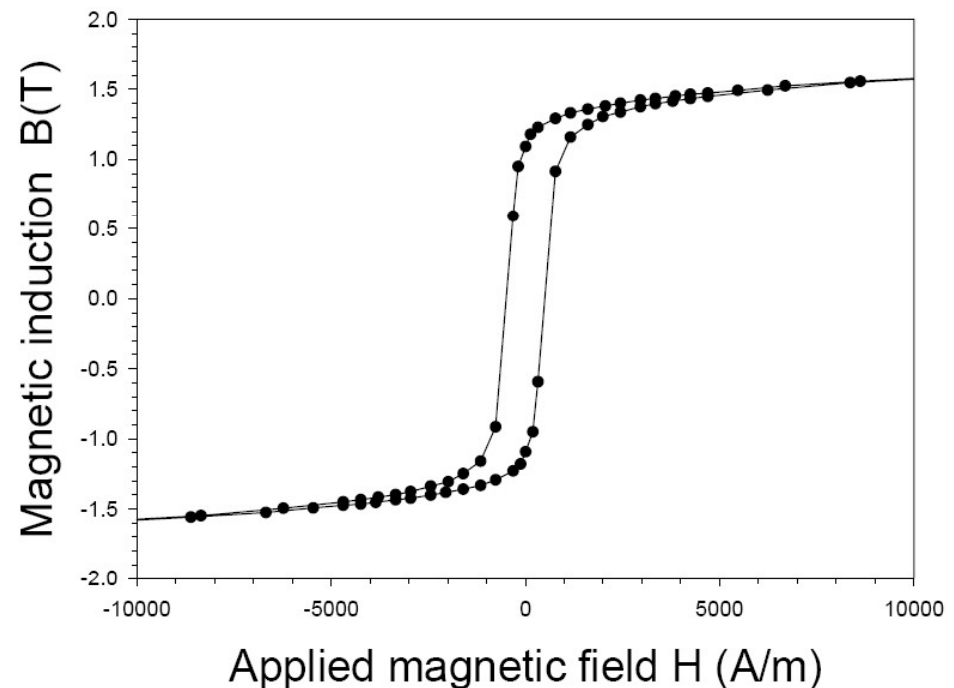
## Permeabilidade magnética

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

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

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A \cdot m}$$

Permeabilidade do vácuo



## Permeabilidade magnética

| Permeabilidade Relativa, $\mu_R$ | Tipo de Material |
|----------------------------------|------------------|
| $\gg 1$                          | Ferromagnéticos  |
| $\cong 1$                        | Paramagnéticos   |
| $< 1$                            | Diamagnéticos    |

| Tipo de Material | Permeabilidade Relativa, $\mu_R$ |
|------------------|----------------------------------|
| Ferro Comercial  | 9.000                            |
| Ferro Purificado | 200.000                          |
| Ferro Silício    | 55.000                           |
| Permalloy        | $1 \times 10^6$                  |
| Supermalloy      | $1 \times 10^7$                  |
| Permendur        | 5.000                            |
| Ferrite          | 2.000                            |

# Susceptibilidade magnética

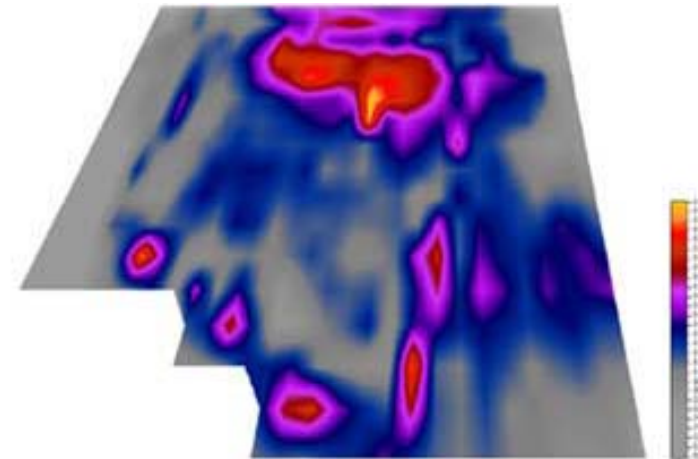
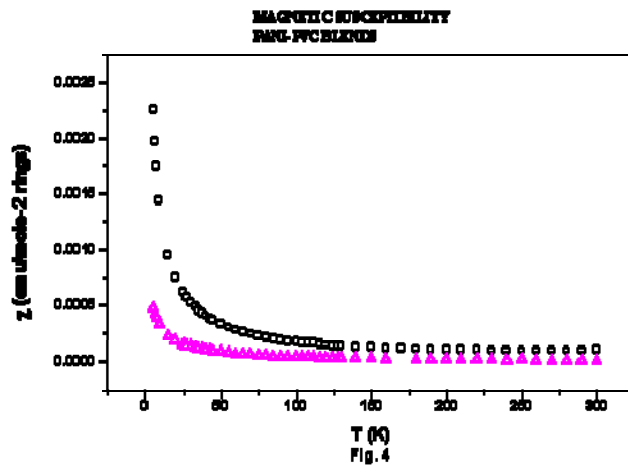
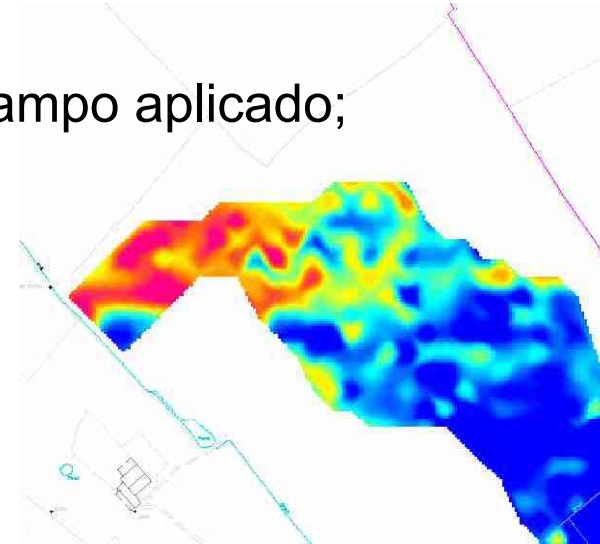
## Susceptibilidade magnética:

- É a resposta do material a um campo aplicado;
- Simbolizado pela letra  $\chi$ .

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

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

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



## Relutância magnética

### Relutância magnética:

- É uma medida da oposição que um meio oferece ao estabelecimento e concentração das linhas de campo magnético.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

- $\mathfrak{R}$  = relutância (A/Wb)
- $\mu$  = permeabilidade (Wb/A/m)
- $l$  = comprimento (m)

## Relutância magnética

Lei de ohm para circuitos magnéticos:

$$\text{Efeito} = \frac{\text{causa}}{\text{oposição}}$$

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$$

$$\mathcal{F} = NI$$

- $\mathcal{R}$  = relutância (A/Wb)
- $\mathcal{F}$  = força magnetomotriz (A)
- $\Phi$  = fluxo magnético (Wb)

