

**Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina**  
**Departamento Acadêmico de Eletrônica**  
**Retificadores**



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

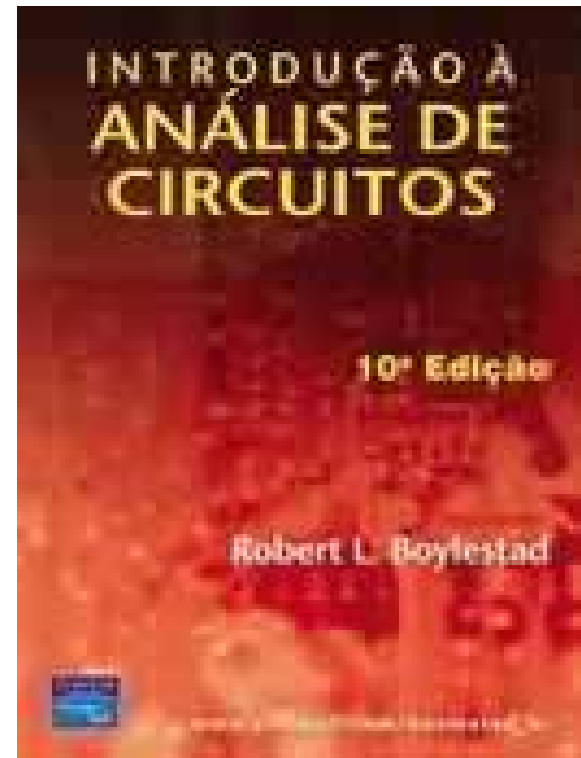
**Prof. Clóvis Antônio Petry.**

**Florianópolis, abril de 2008.**

# Bibliografia para esta aula

## Capítulo 11: Circuitos Magnéticos

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



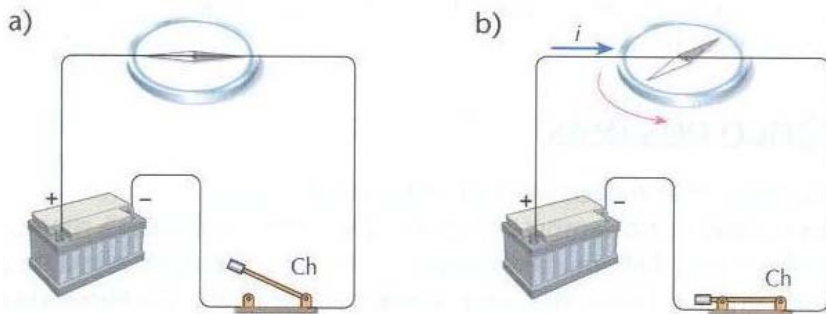
[www.cefetsc.edu.br/~petry](http://www.cefetsc.edu.br/~petry)

# Conceitos iniciais

## Divisão histórica:

- Magnetismo;
- Eletromagnetismo.

## Breve história do eletromagnetismo



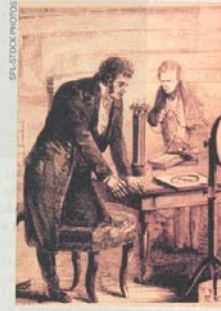
Experiência de Oersted em 1820

## HISTÓRIA DA FÍSICA

### DO MAGNETISMO AO ELETROMAGNETISMO

Pouco se sabe a respeito da origem do magnetismo. Uma lenda estabelece que um anônimo pastor de ovelhas da Grécia antiga fez a primeira observação de um fenômeno magnético, ao perceber que a extremidade metálica de seu cajado ficava presa ao se aproximar de determinada pedra. Presume-se que aquela pedra fosse um pedaço de magnetita, um ímã natural. Entretanto, outras referências históricas fornecem versões diferentes para o advento do magnetismo. Parece que os chineses, considerados os inventores da bússola, e outros povos antigos havia muito tempo lidavam com fenômenos magnéticos. O estudo sistemático desses fenômenos, na Europa, teve início com o cientista inglês William Gilbert (1544-1603), contemporâneo de Galileu, que o apontou como o criador do método experimental. Em 1600, publicou sua principal obra *De magnete*, na qual descreveu várias experiências magnéticas, chegando à conclusão, entre outras, de que a Terra era uma grande esfera imantada.

O nascimento do Eletromagnetismo se deu com a clássica experiência do físico dinamarquês HANS CHRISTIAN OERSTED (1771-1851). Em 1820, ele verificou que, ao colocar uma bússola sob um fio elétrico, a agulha se desviava quando se fazia passar uma corrente pelo fio. A partir desse fato, foi possível estabelecer a conexão entre a corrente elétrica e os fenômenos magnéticos, permitindo o extraordinário desenvolvimento científico nessa área.



Oersted e seu auxiliar realizando experiências.



Ampère e seu colega Arago fazendo experimentos de Eletromagnetismo.

Vários cientistas se destacaram nesse processo. O físico e matemático francês ANDRÉ-MARIE AMPÈRE (1775-1836) construiu o primeiro eletroímã. Esse dispositivo foi fundamental para a posterior invenção e aperfeiçoamento de vários aparelhos, como o telefone, o microfone, o telégrafo etc. MICHAEL FARADAY (1791-1867), notável cientista autodidata inglês, dedicou-se a diversos ramos da Física. No Eletromagnetismo, sua grande contribuição foi a descoberta do fenômeno da **indução eletromagnética**, que serviu de base para que pudessem surgir os geradores mecânicos de eletricidade e os transformadores.

Merecem ainda ser lembrados, por sua contribuição à evolução do Eletromagnetismo: o físico norte-americano JOSEPH HENRY (1797-1878), que continuou os trabalhos de Faraday sobre a indução eletromagnética; HEINRICH LENZ (1804-1865), físico russo, que também se dedicou a estudar esse fenômeno; WILHELM WEBER (1804-1891), físico alemão; NICOLAS TESLA (1856-1943), físico croata, entre outros.

Por fim, uma menção especial a JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879), notável físico escocês, cuja participação, se não foi exatamente prática, teve importância teórica fundamental. Maxwell conseguiu estabelecer uma teoria matemática consistente, em sua célebre obra *Tratado sobre eletricidade e magnetismo* (publicada em 1873), na qual generalizou os princípios da Eletricidade descobertos antes por Coulomb, Ampère, Faraday e outros. A descoberta posterior das ondas eletromagnéticas constituiu a verificação experimental do acerto da teoria de Maxwell.



Michael Faraday.



Joseph Henry.



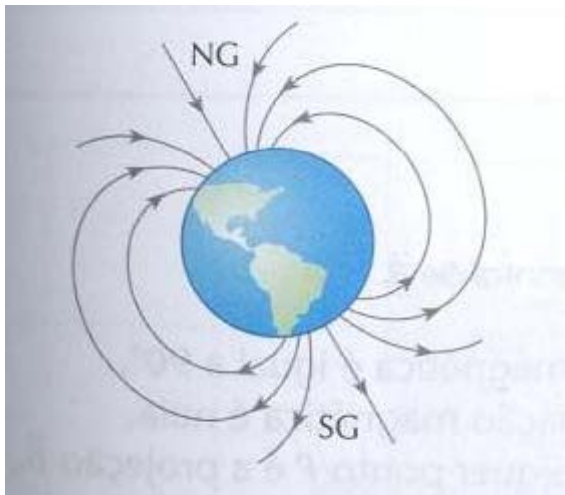
Nicolas Tesla.



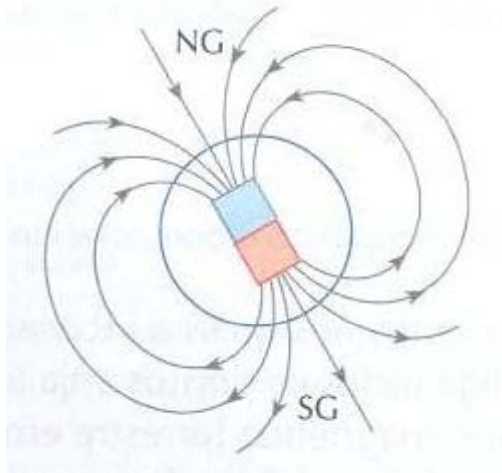
James Clerk Maxwell.

# Conceitos iniciais

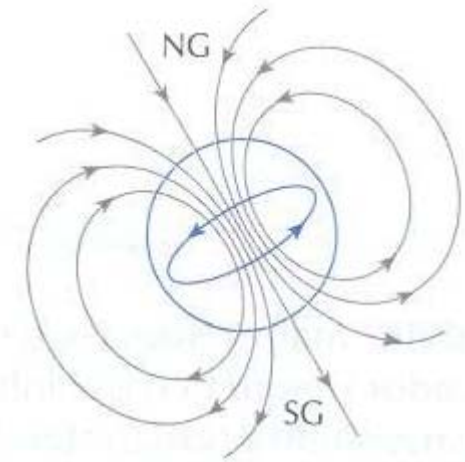
## Magnetismo terrestre



Magnetismo terrestre



A terra como um ímã

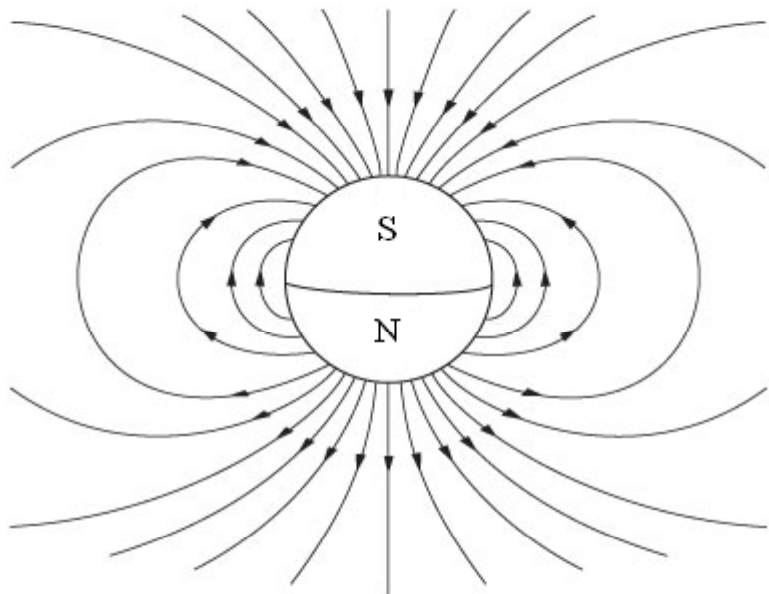


Explicação moderna

# Conceitos iniciais

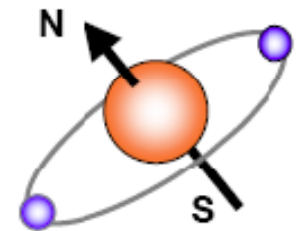
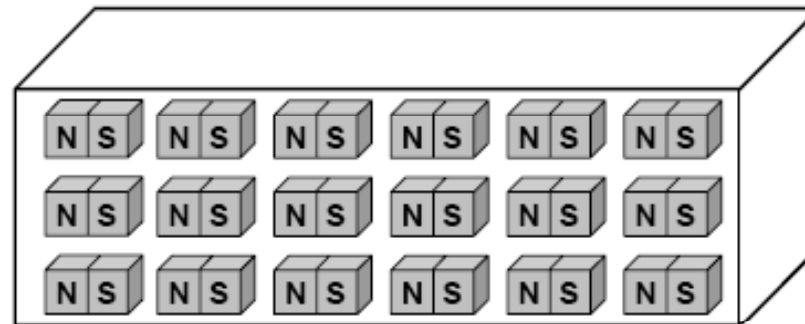
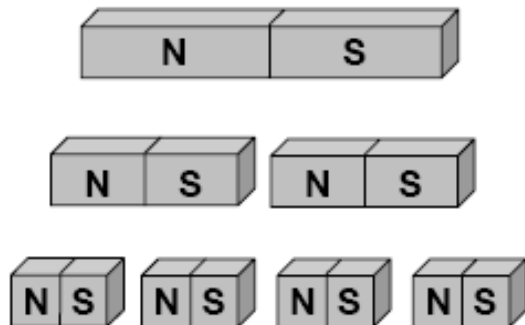
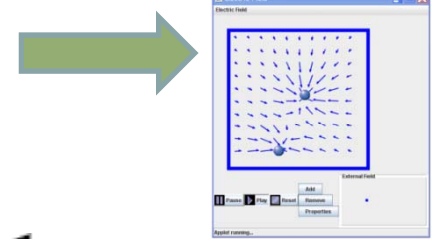
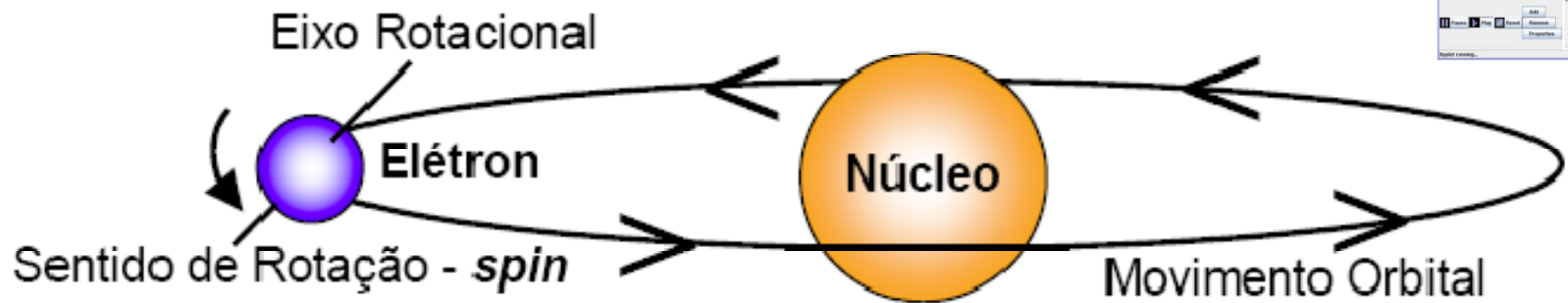
## Dipolos magnéticos:

- 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

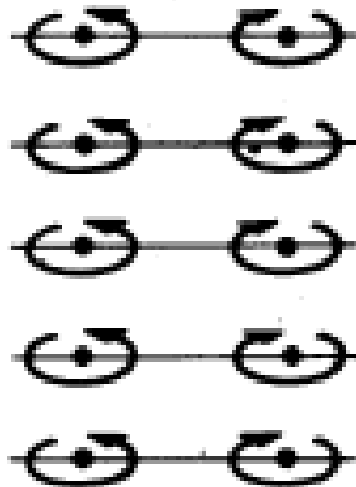
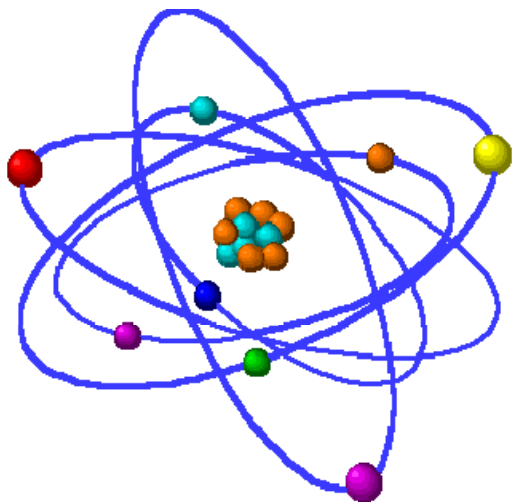
## Dipolos magnéticos



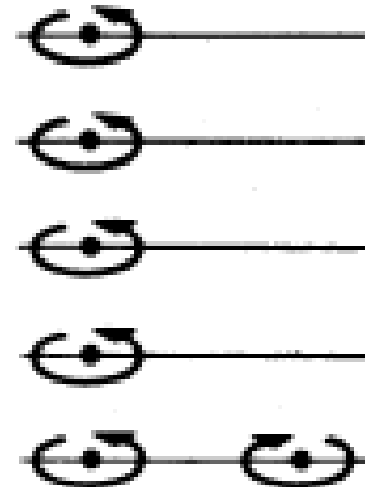
# Conceitos iniciais

## 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

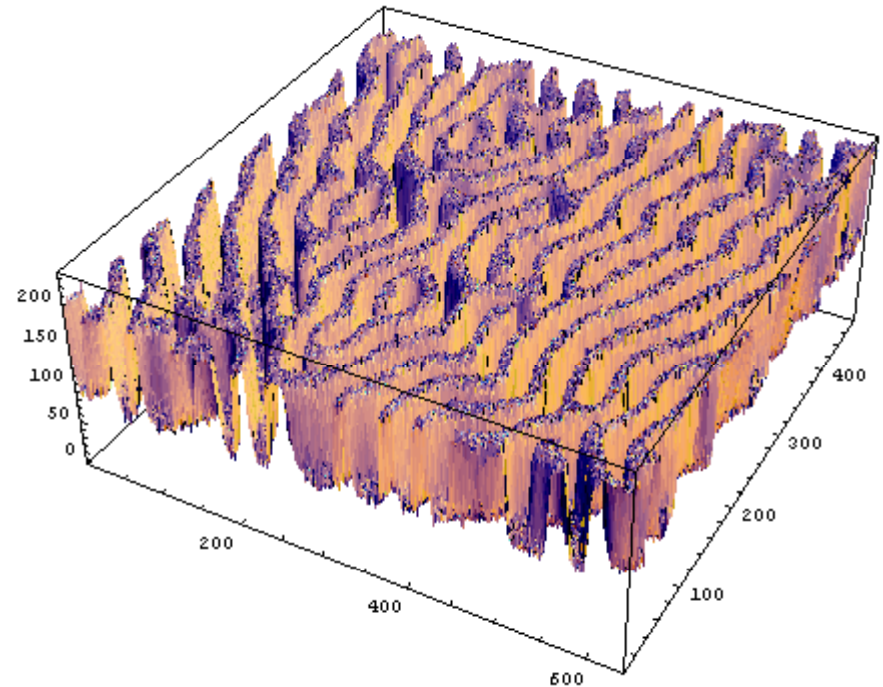
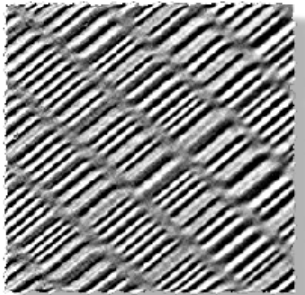
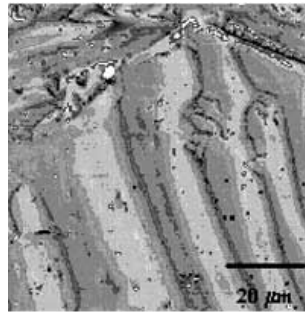
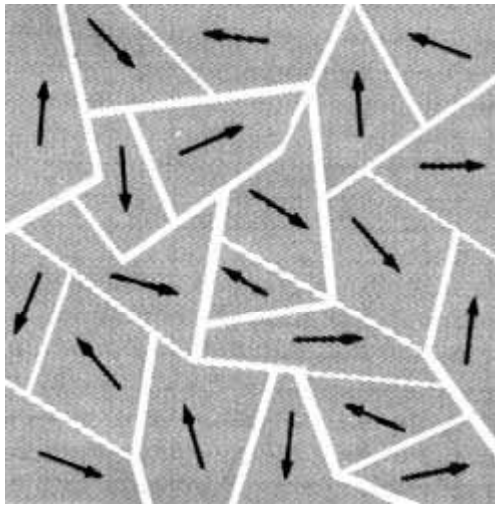


Momento  $\neq 0$

# Conceitos iniciais

## Domínios magnéticos:

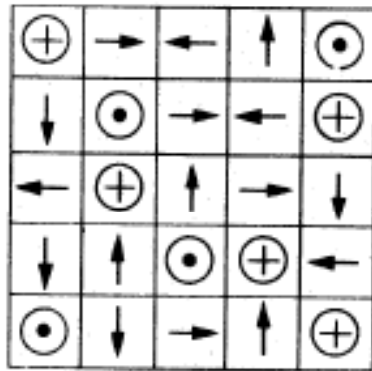
- Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
- Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
- Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.



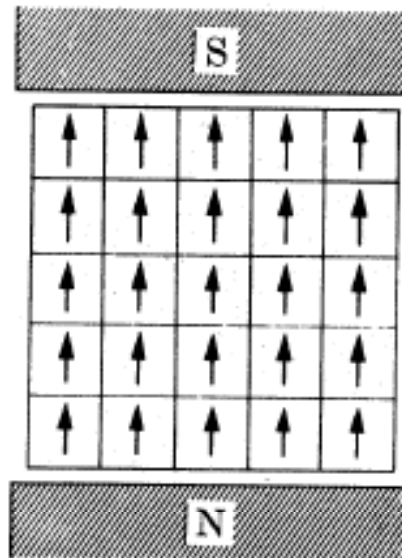
# Conceitos iniciais

## Alinhamento dos domínios:

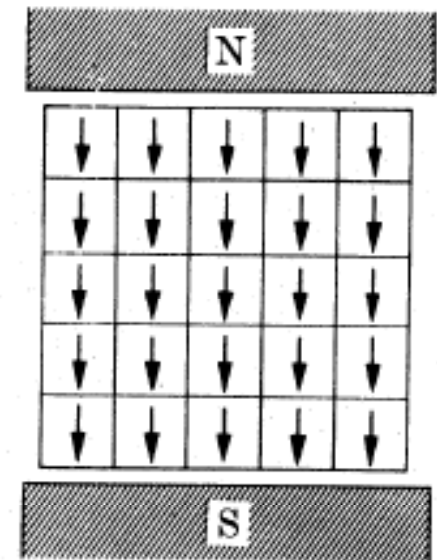
- Aplicando um *campo magnético* externo.



Desmagnetizado



Magnetizado

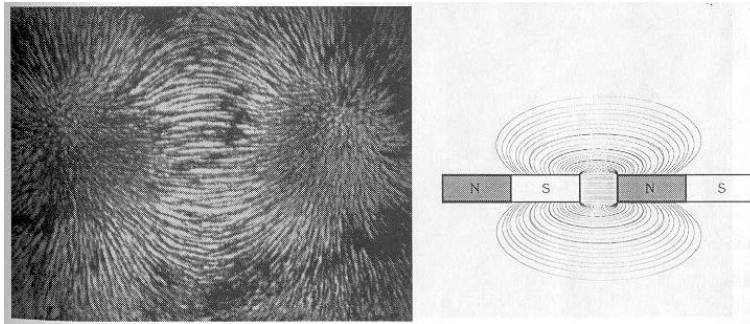


Magnetizado ao contrário

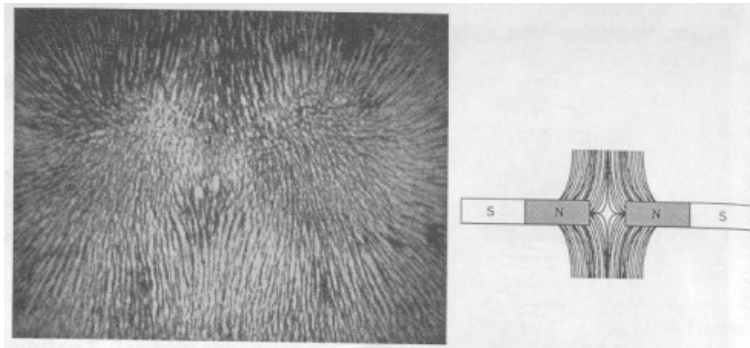
# Conceitos iniciais

## Forças de atração e repulsão magnéticas

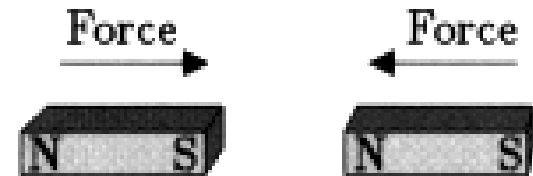
Atração



Repulsão



Repulsion



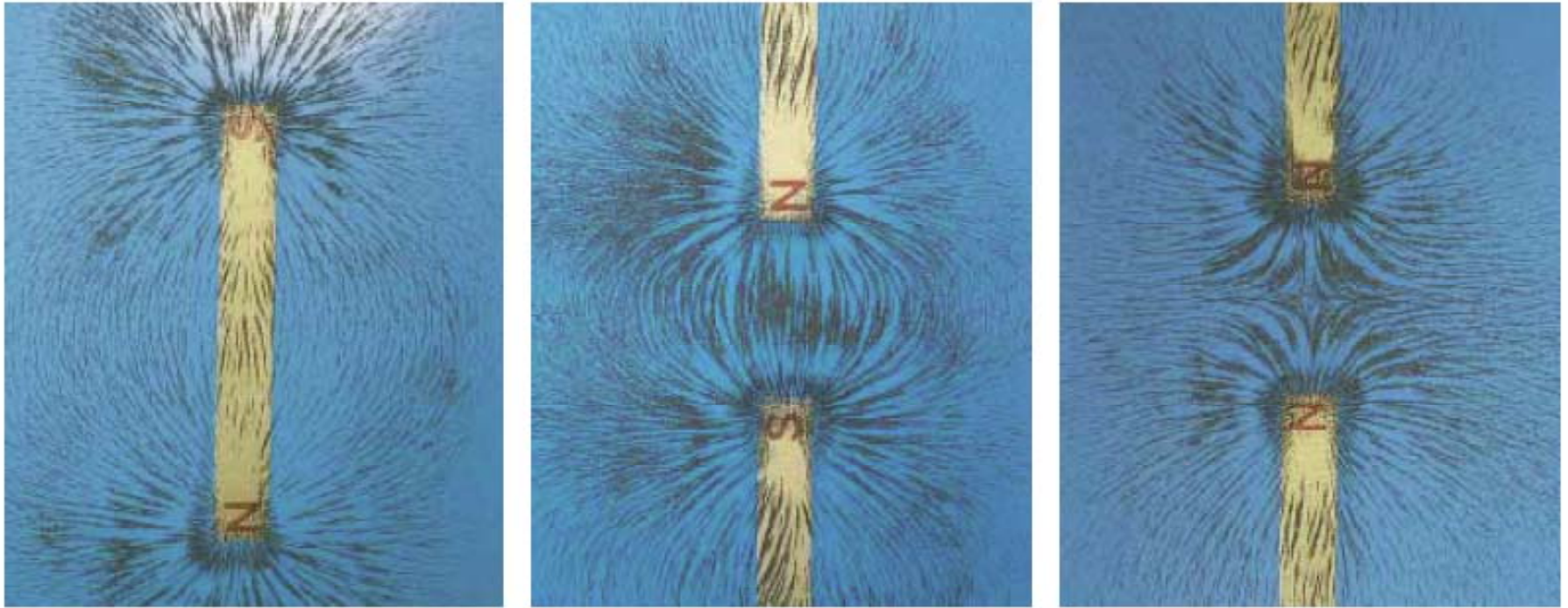
Attraction

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.

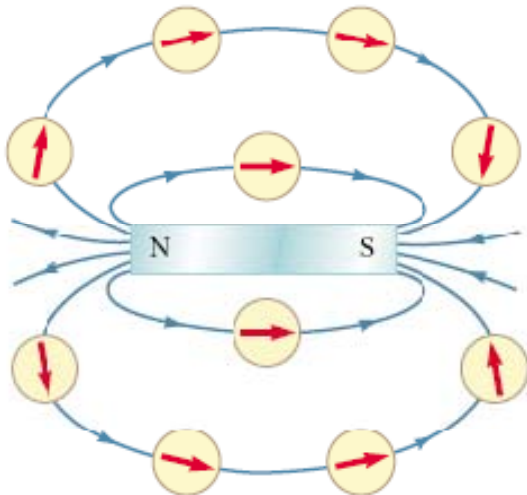


Um ímã produz um campo magnético vetorial,  $B$ , em todos os pontos ao seu redor.

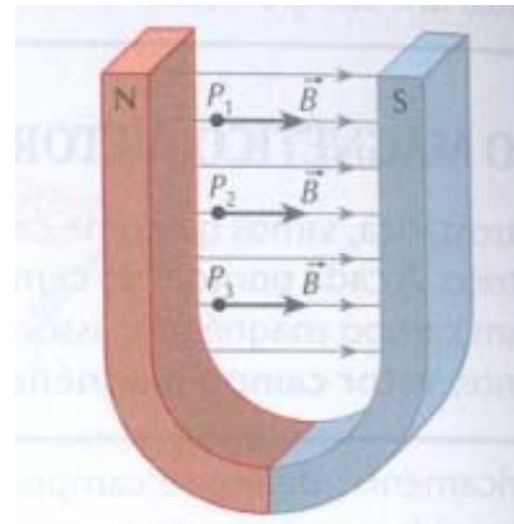
# Campo magnético

## 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.

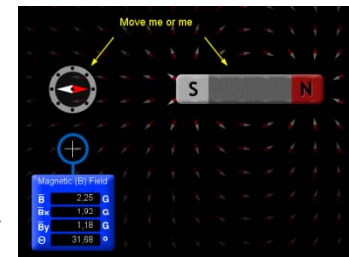
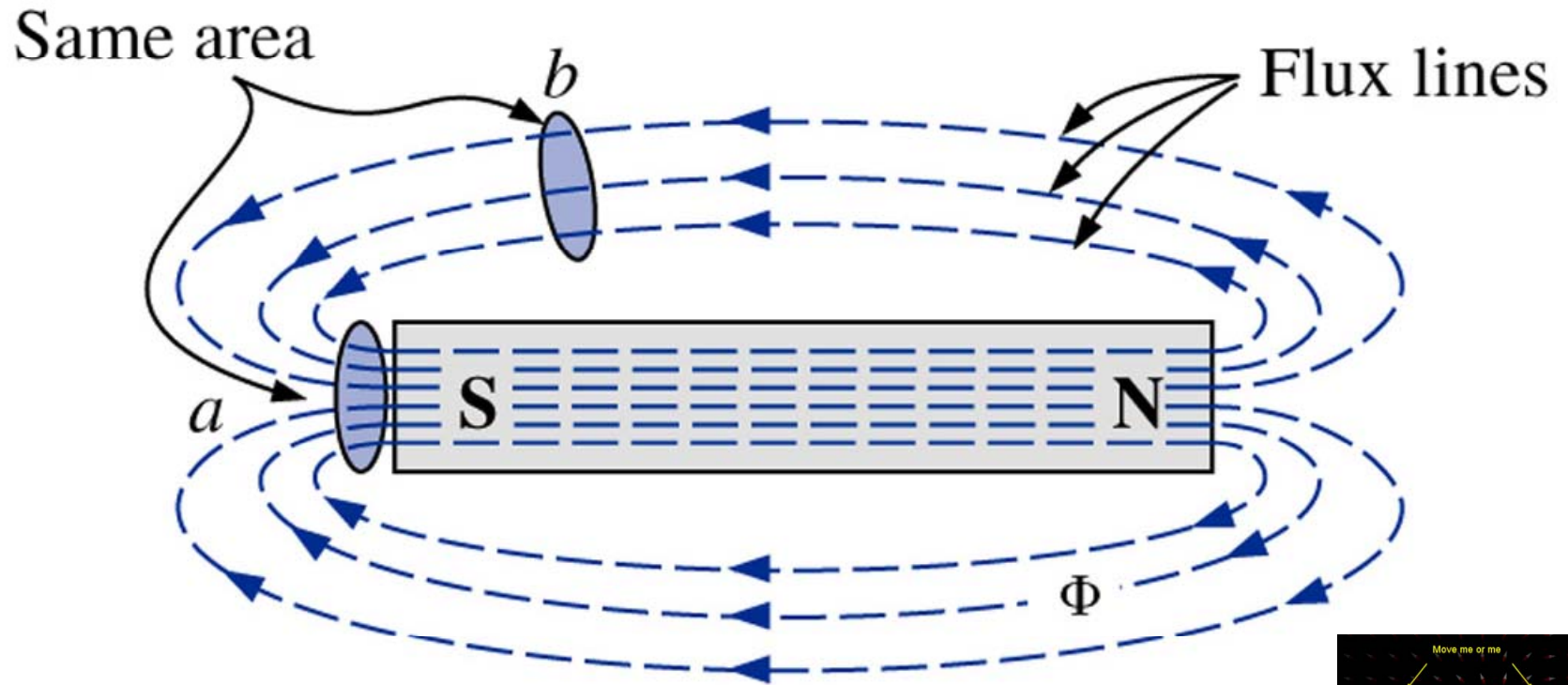


Campo não-uniforme



Campo uniforme

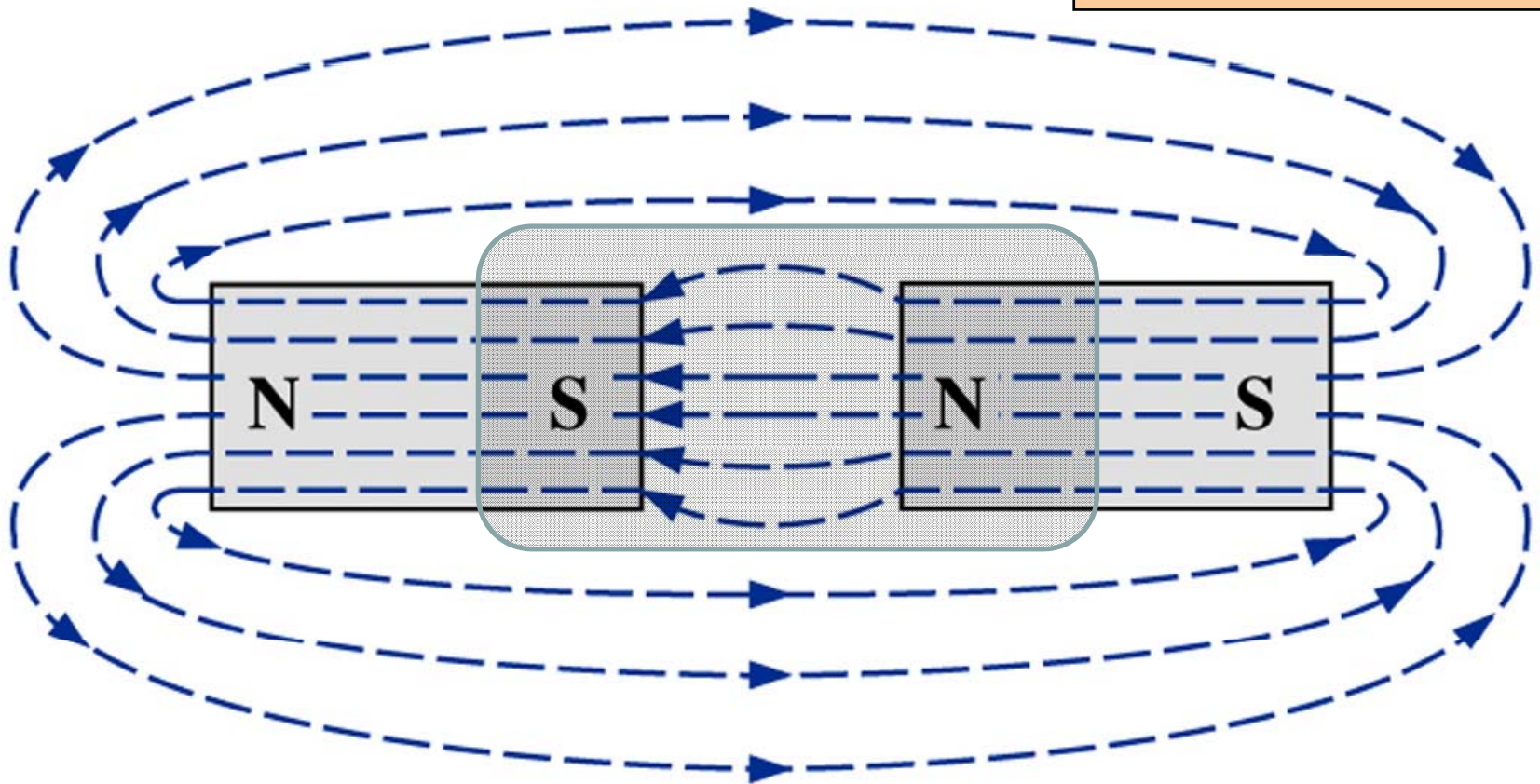
# Campo magnético



Linhas de campo magnético para um ímã permanente.

# Campo magnético

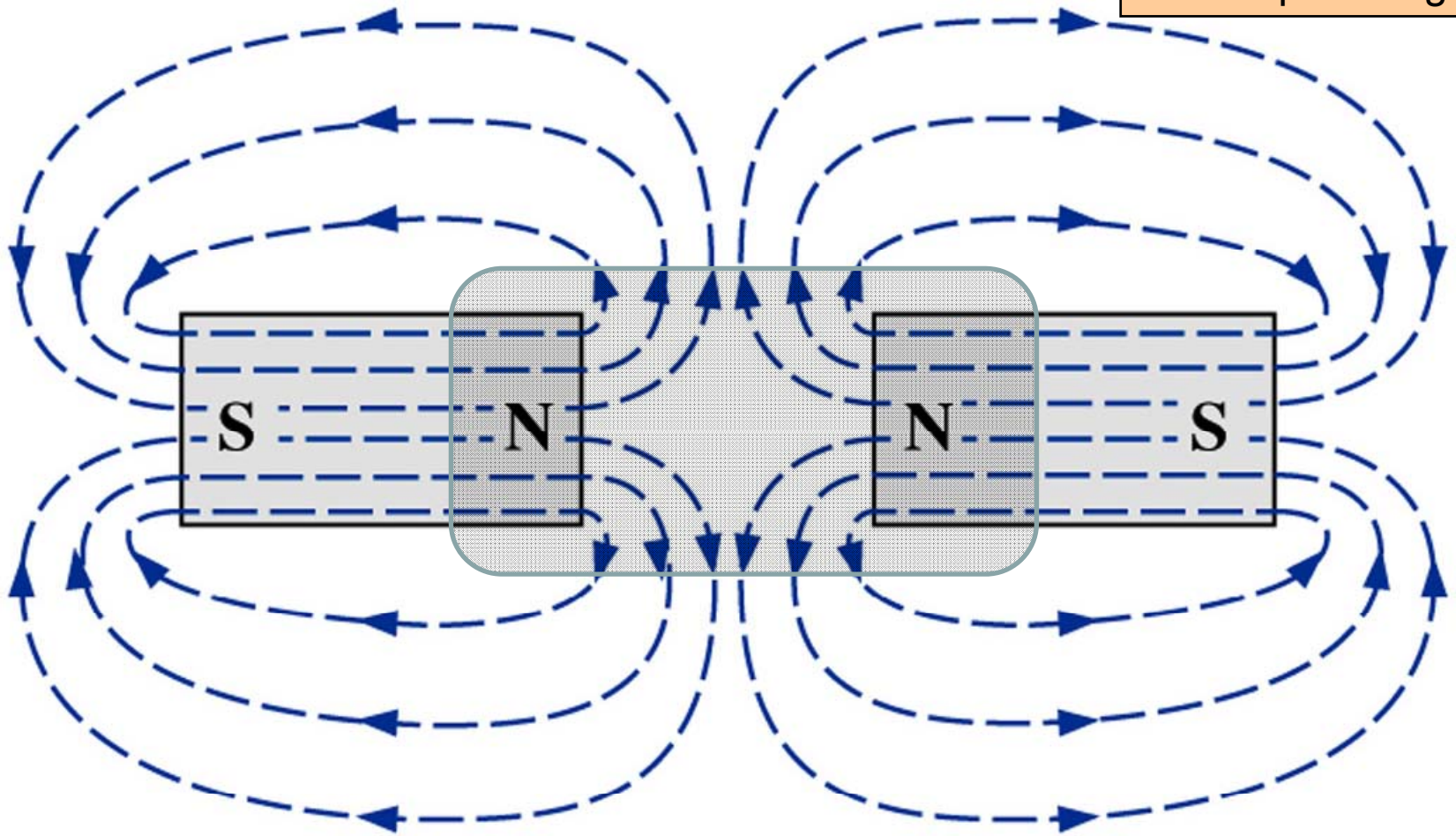
Pólos opostos adjacentes



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

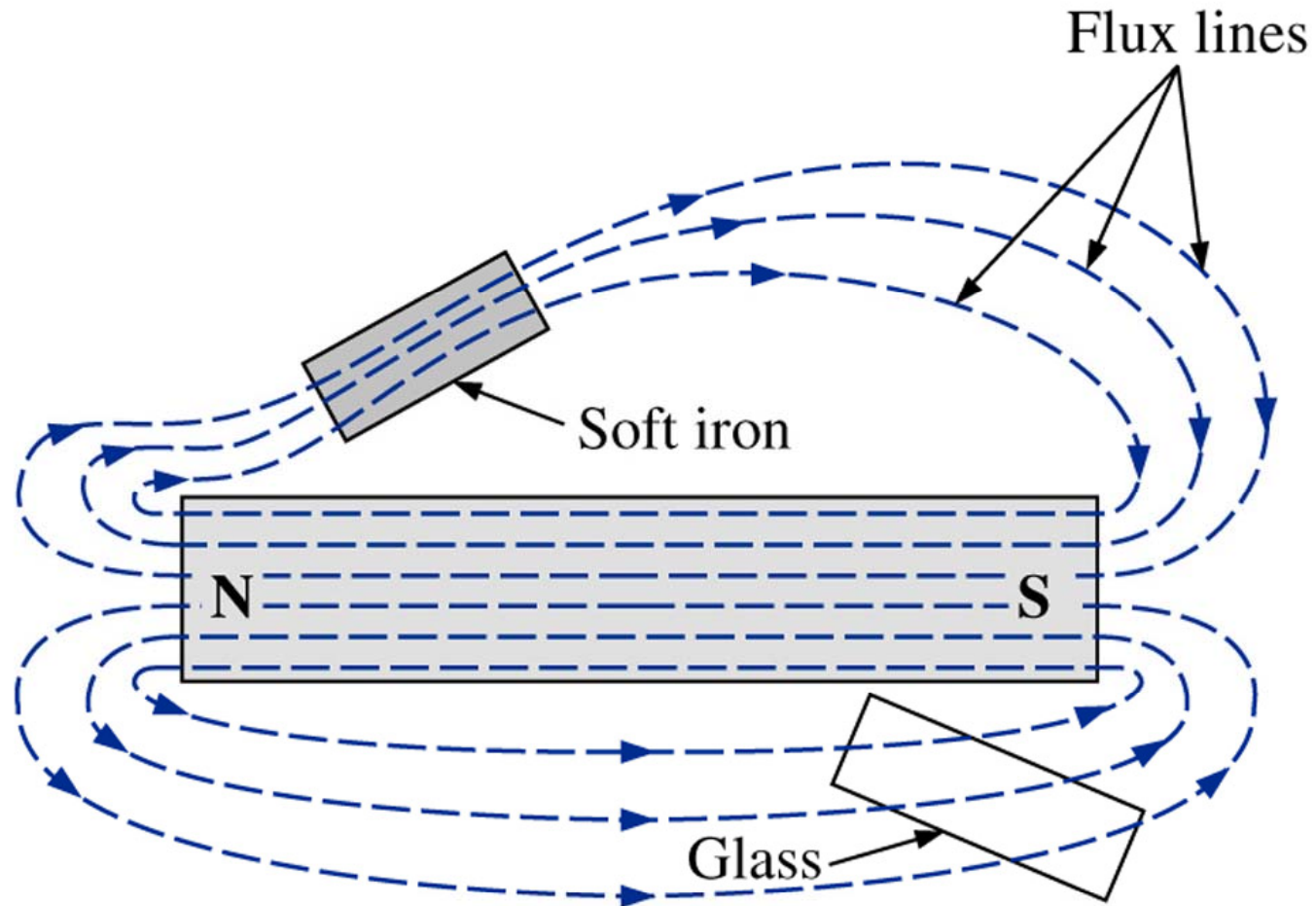
# Campo magnético

Pólos opostos iguais



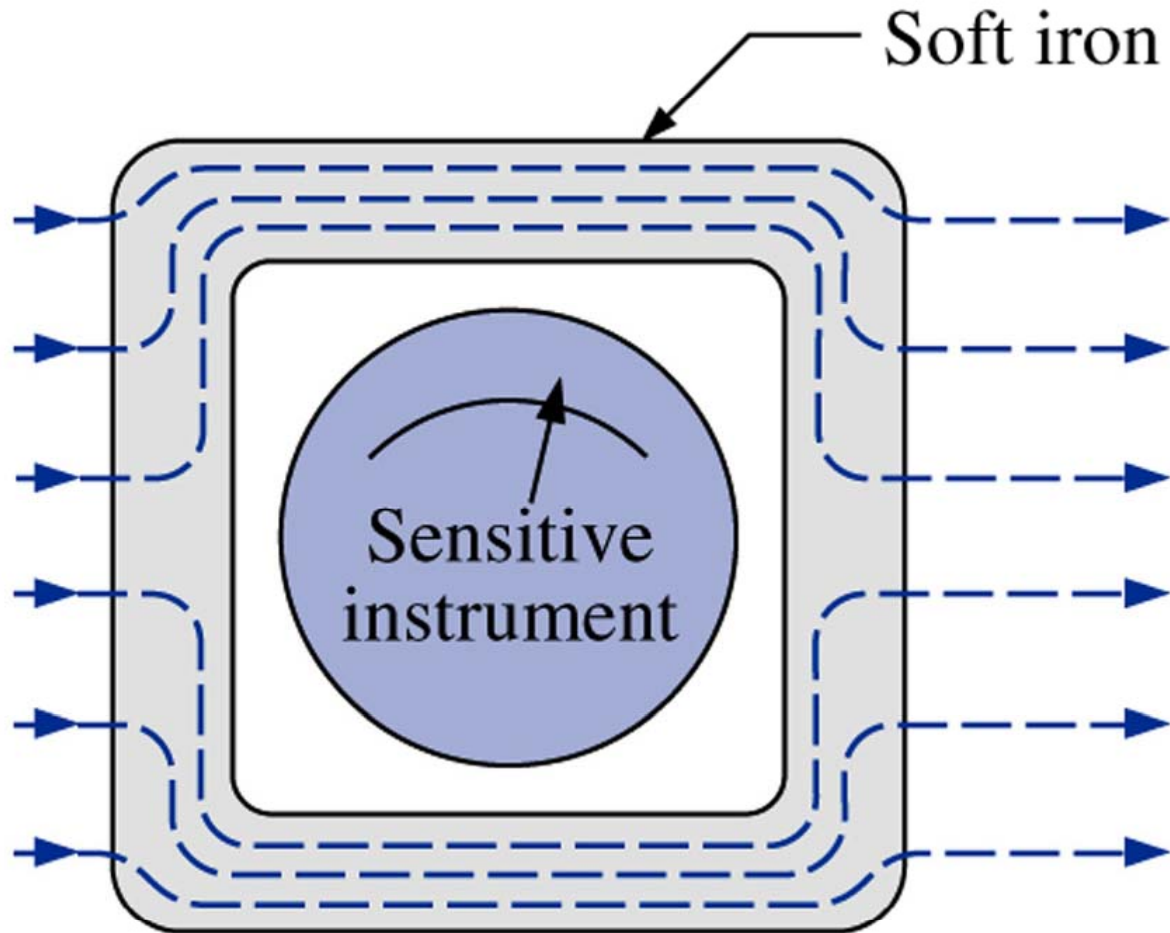
Distribuição das linhas de campo para um sistema de dois ímãs.

# Campo magnético



Efeito de material ferromagnético sobre as linhas de campo.

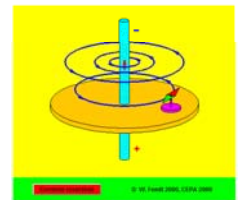
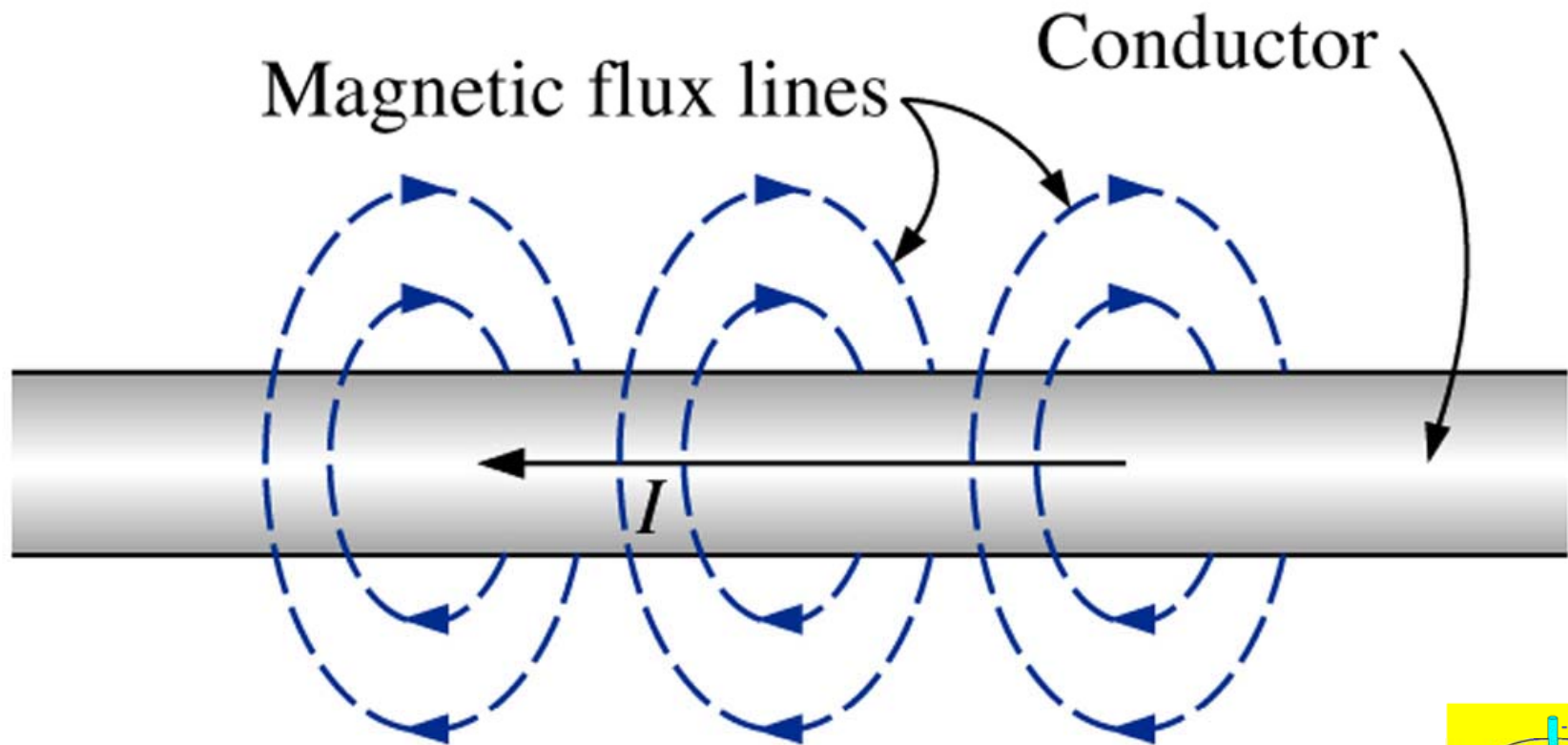
# Campo magnético



Efeito de material ferromagnético sobre as linhas de campo.

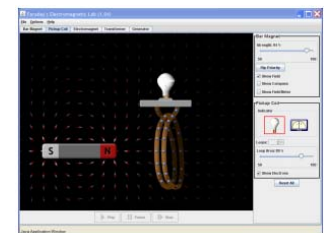
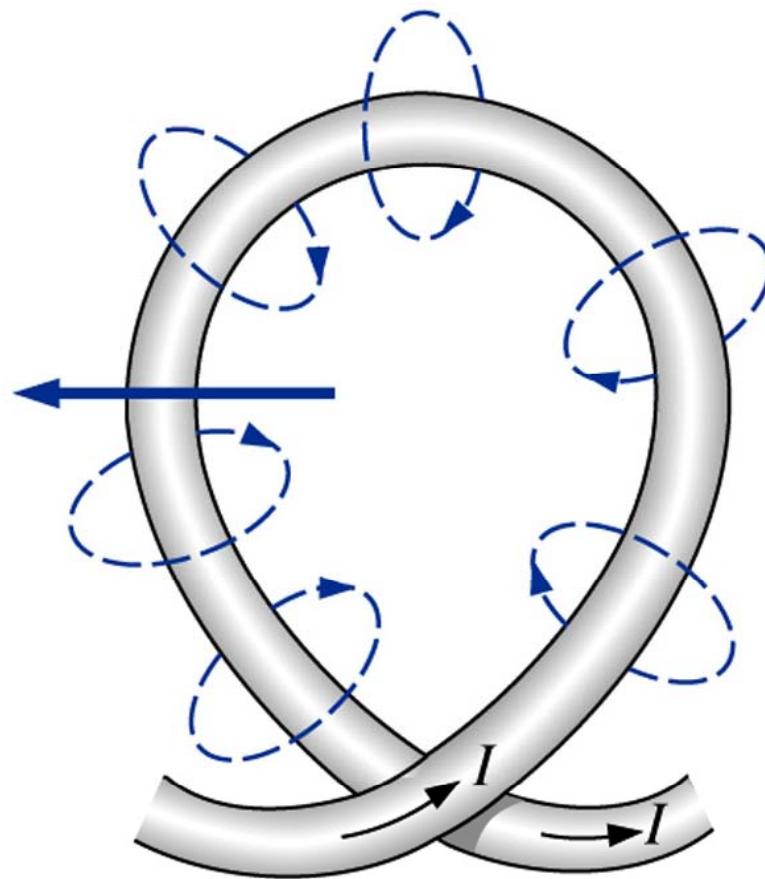
# Campo magnético

Linhas de campo em um condutor retilíneo percorrido por corrente:



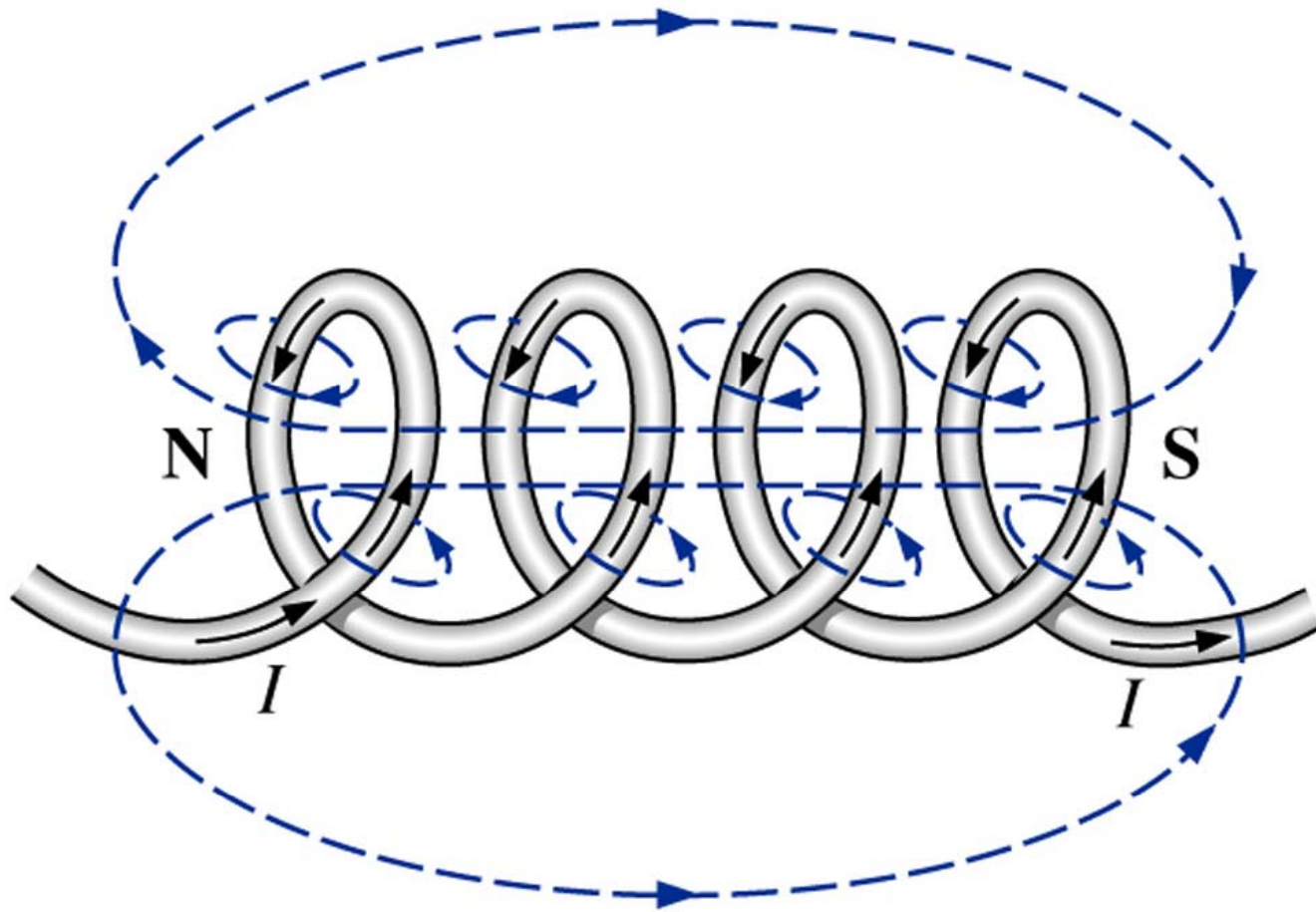
# Campo magnético

Linhas de campo em uma espira circular percorrida por corrente:



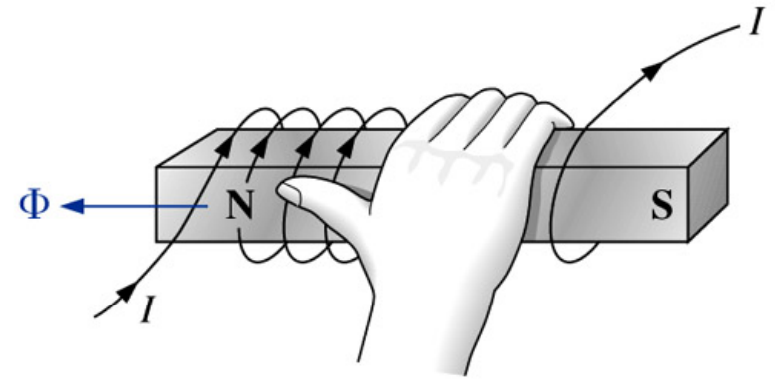
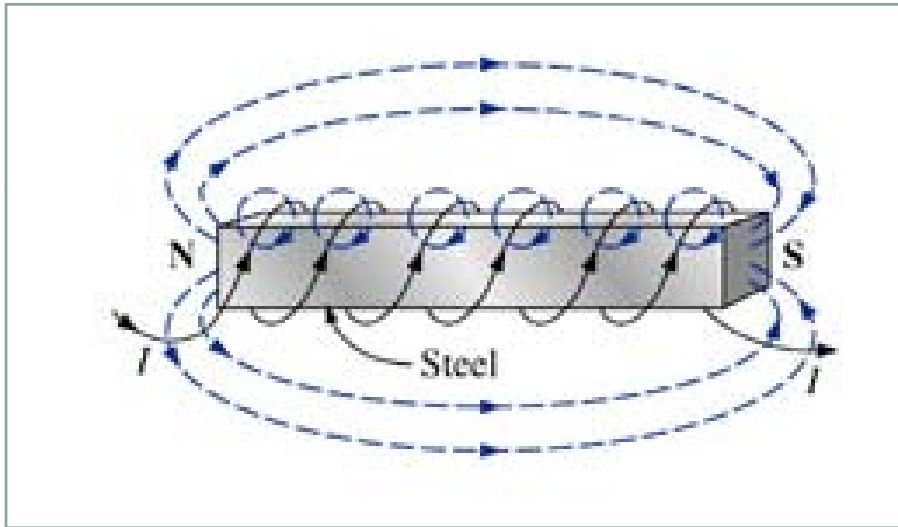
# Campo magnético

Linhas de campo em uma bobina percorrida por corrente:

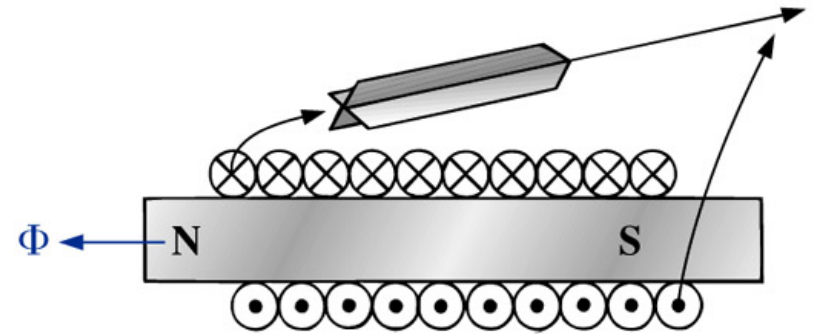


# Campo magnético

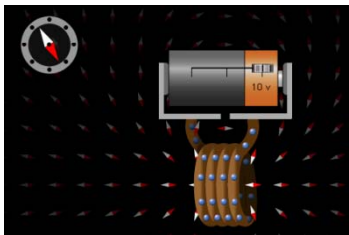
## Eletroímã:



(a)

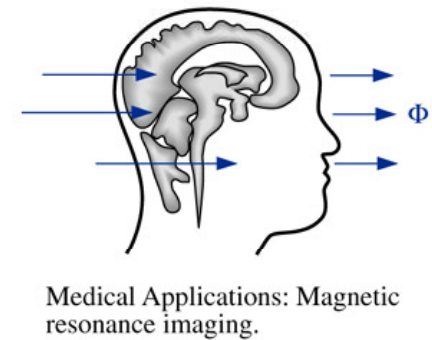
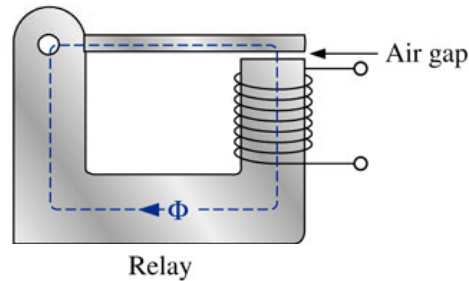
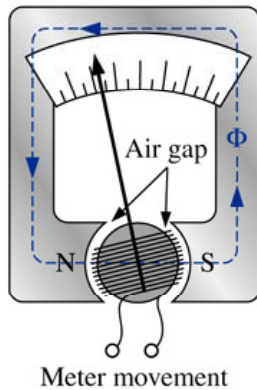
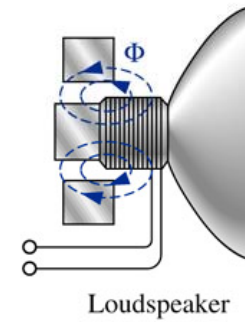
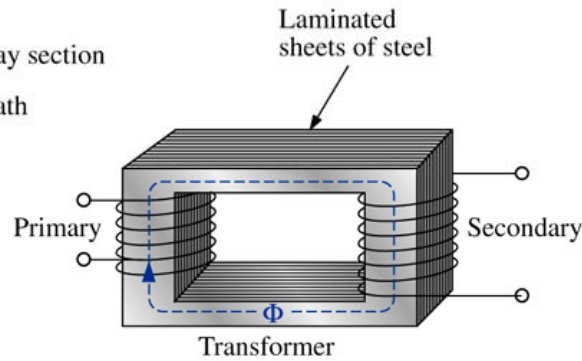
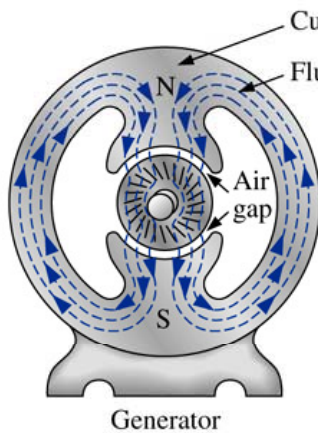


(b)



# 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.

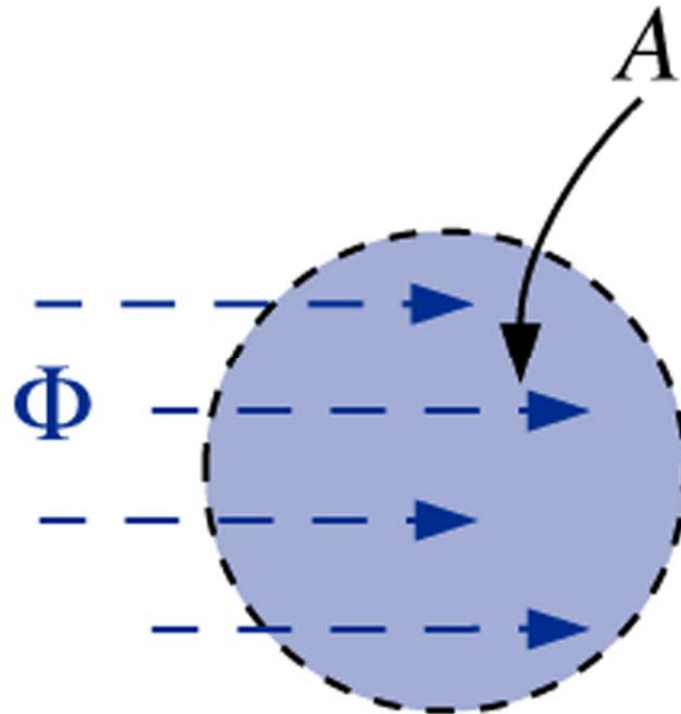
## Fluxo magnético:

- 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:



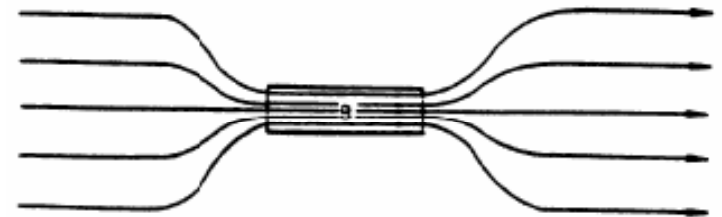
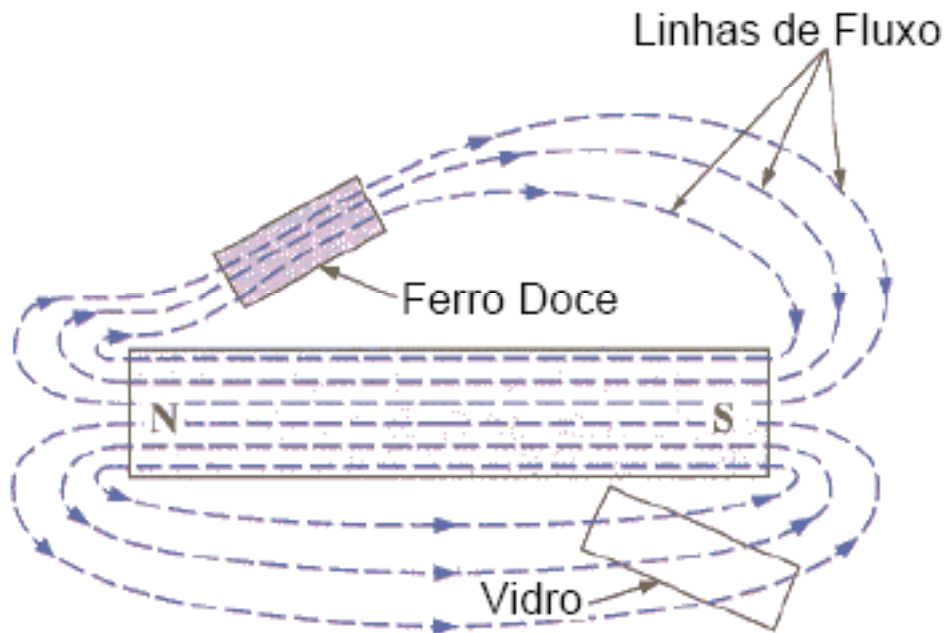
$$\begin{aligned}\Phi &= 6 \times 10^{-5} \text{ Wb} \\ A &= 1,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2\end{aligned}$$

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

# 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

$$\mu = \frac{B}{H}$$



Permeabilidade absoluta

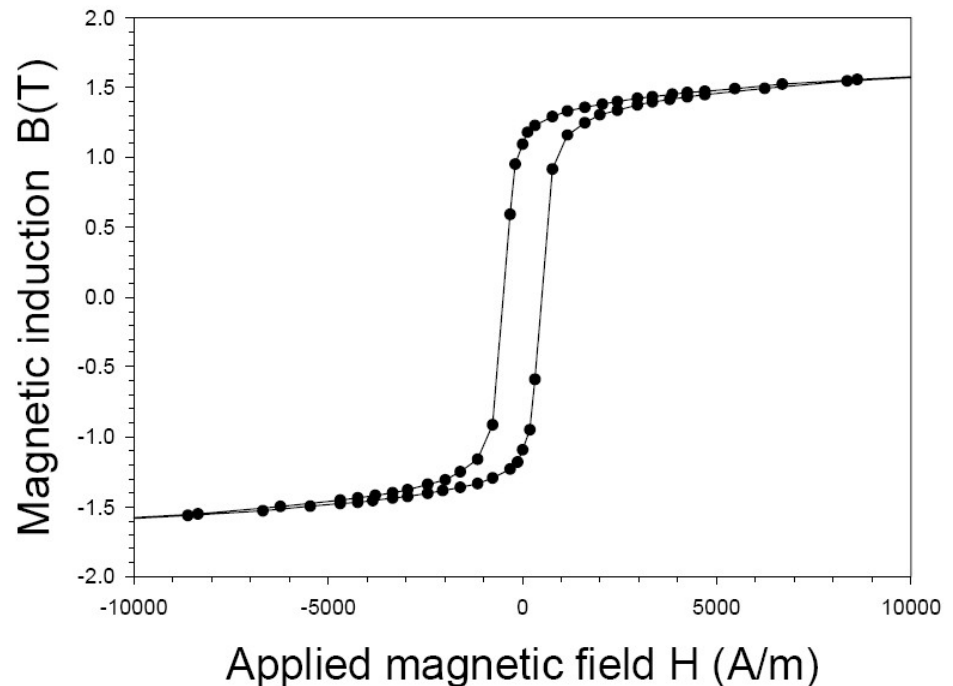
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$



Permeabilidade relativa

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

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

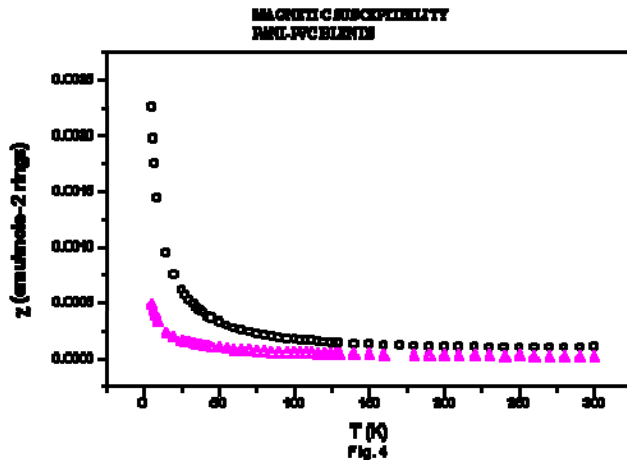
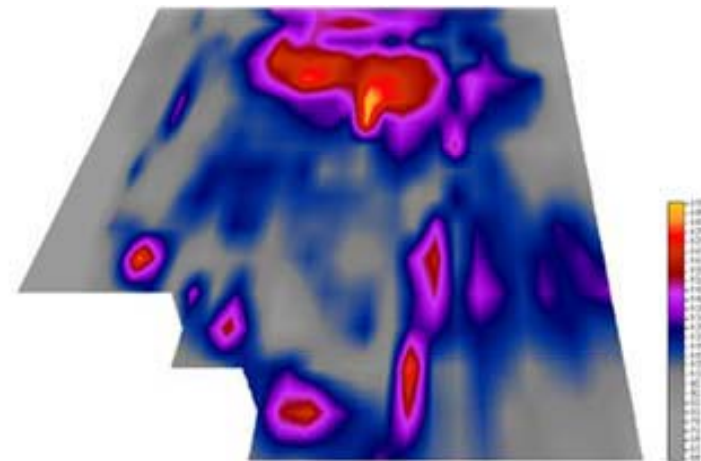
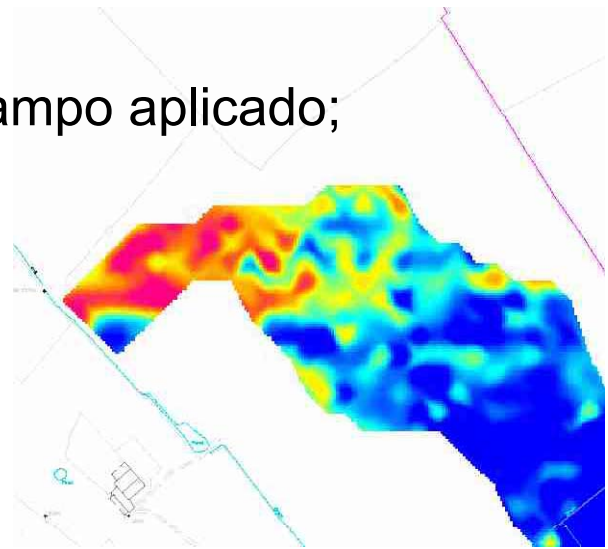
## Susceptibilidade magnética:

- 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

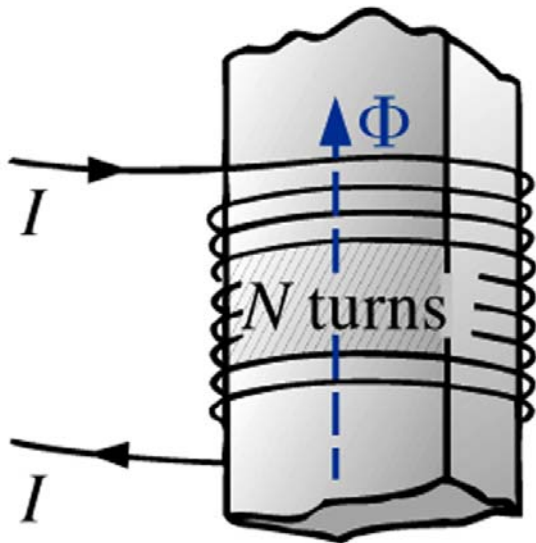
Lei de ohm para circuitos magnéticos:

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

$$\Phi = \frac{\mathfrak{I}}{\mathfrak{R}}$$

$$\mathfrak{I} = NI$$

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



# Na próxima aula

## Capítulo 11: Circuitos magnéticos

1. Força magnetizante;
2. Histerese;
3. Perdas magnéticas.

