



cap. 33 - O campo magnético

Instrutor: Prof. Carlos Eduardo Souza - Cadu

**Sala: A2-15 (IF, andar 1P)
Email: carlooseduardosouza@id.uff.br**



Objetivos:

- **Calcular o campo magnético produzido por partículas carregadas e correntes**
- **Descrever o movimento de uma partícula carregada em um campo magnético**
- **Calcular forças e torques sobre correntes**
- **Descrever propriedades magnéticas de materiais**



● Ímã e magnetismo

O que é o magnetismo?

Como são criados os campos magnéticos?

Quais são suas propriedades?

Como são utilizados?



● Ímã e magnetismo

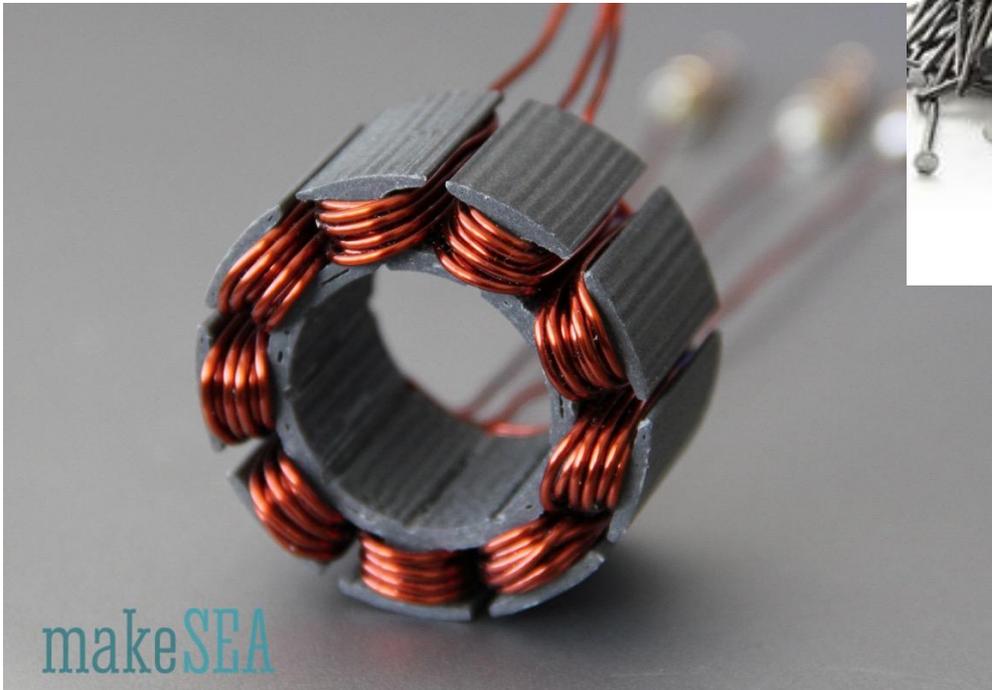
O que é o magnetismo?

Como são criados os campos magnéticos?

Quais são suas propriedades?

Como são utilizados?

Exemplos:



Bobina de motor

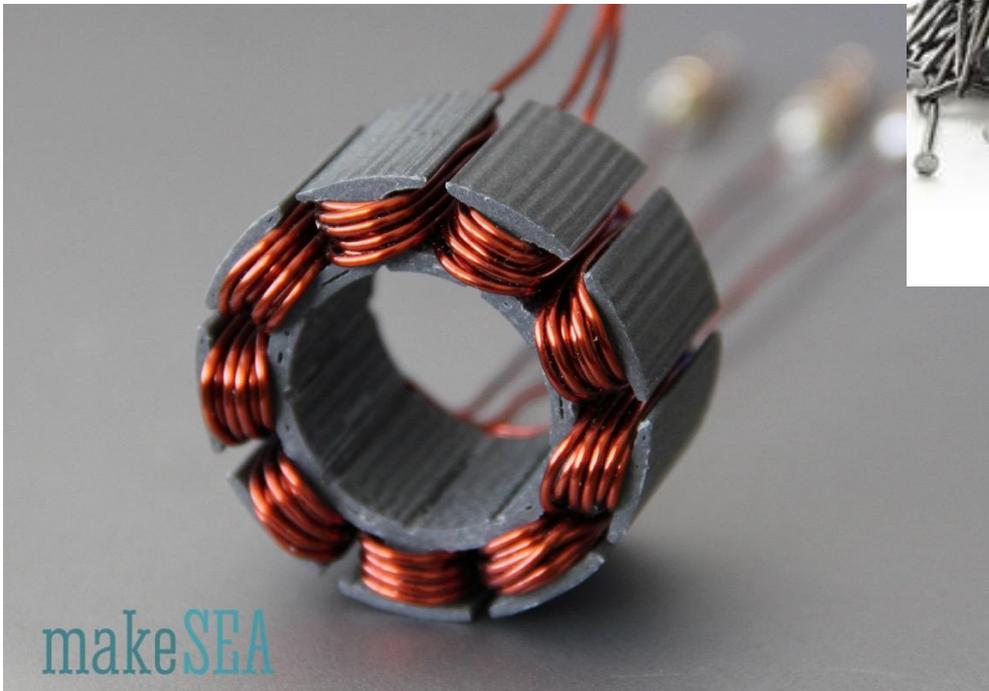


● Ímã e magnetismo

O que é o magnetismo?
Como são criados os campos magnéticos?
Quais são suas propriedades?
Como são utilizados?

O que a bobina de motor tem a ver com os ímãs?

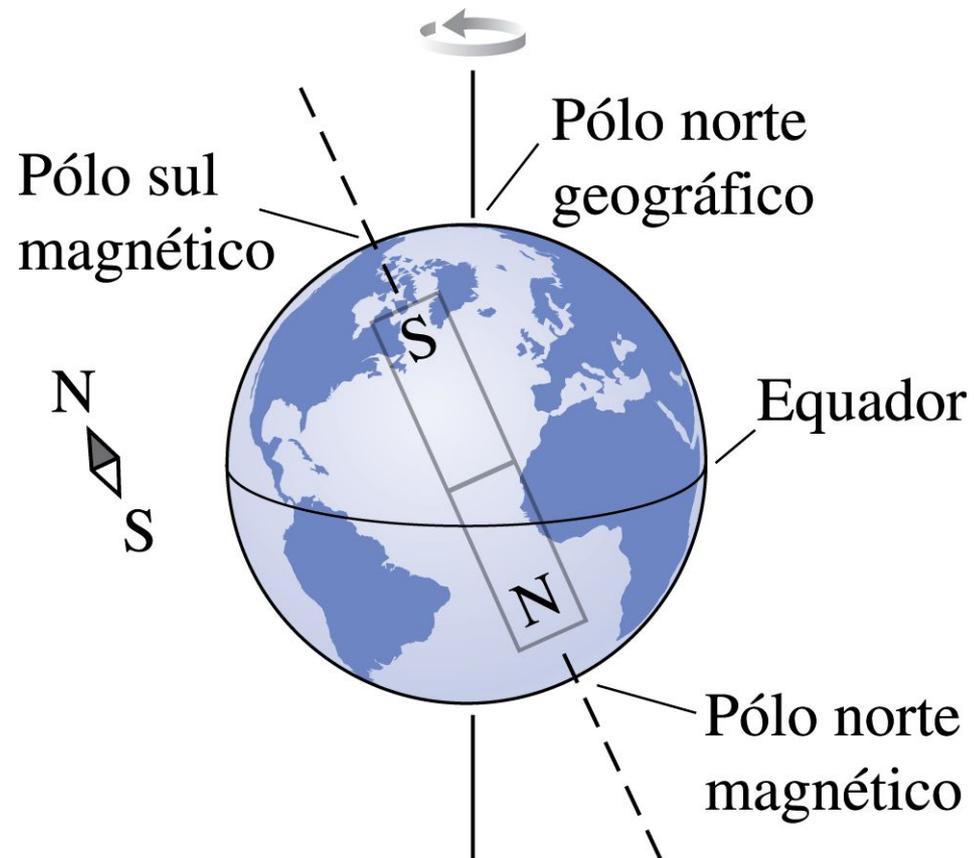
Exemplos:



Bobina de motor



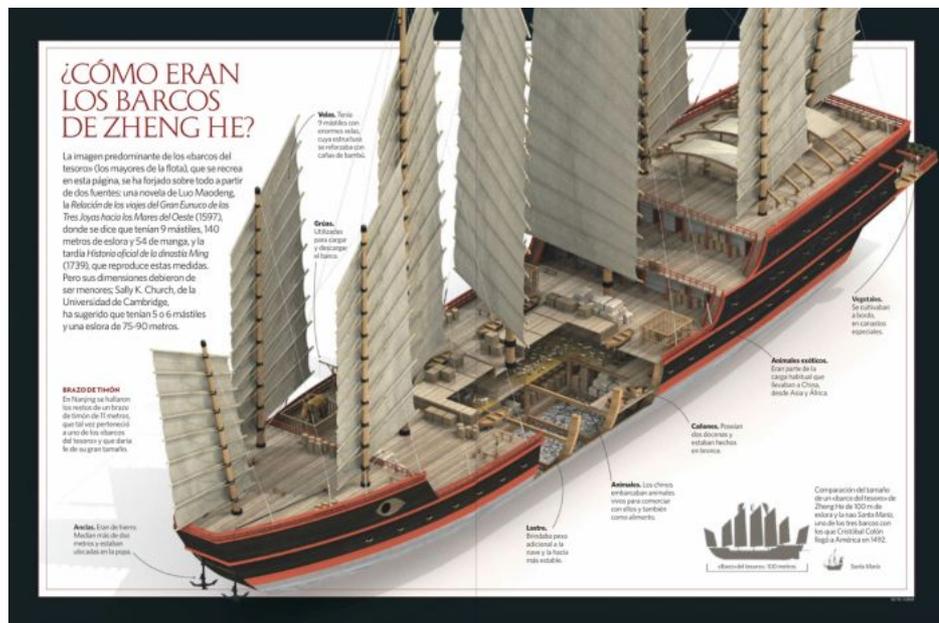
● Descobrendo o magnetismo





● Descobrimdo o magnetismo

Os chineses já exploravam o magnetismo antes mesmo dos anos 1000 com a bússola...



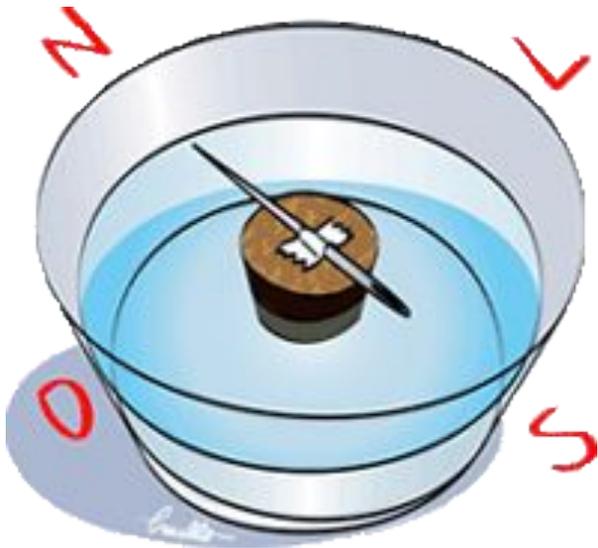
Almirante Zheng He



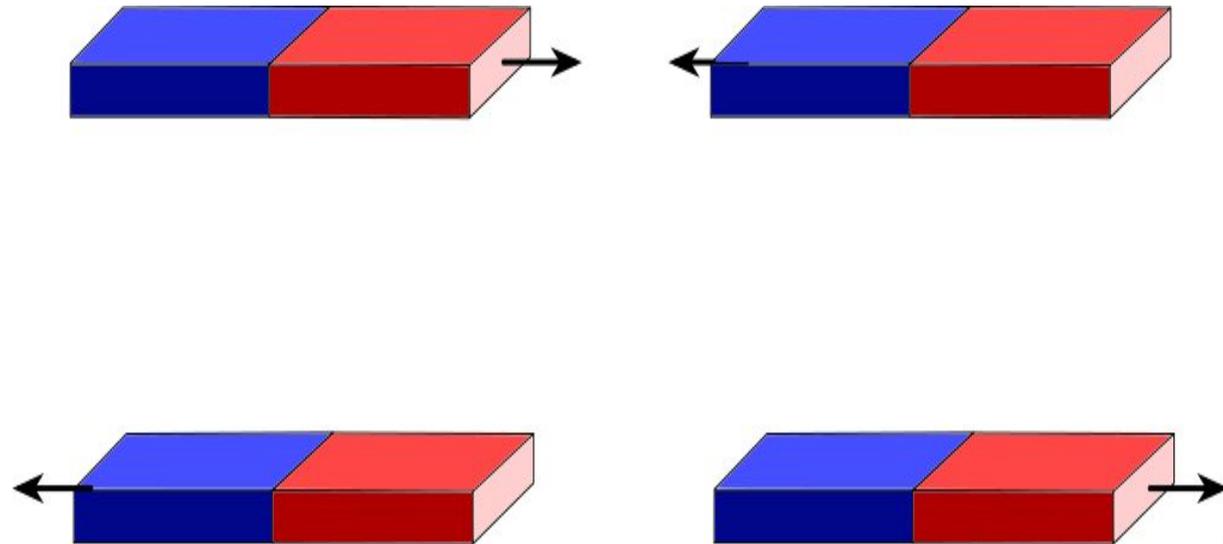
● Descobrindo o magnetismo

A observação de experimentos simples

1-



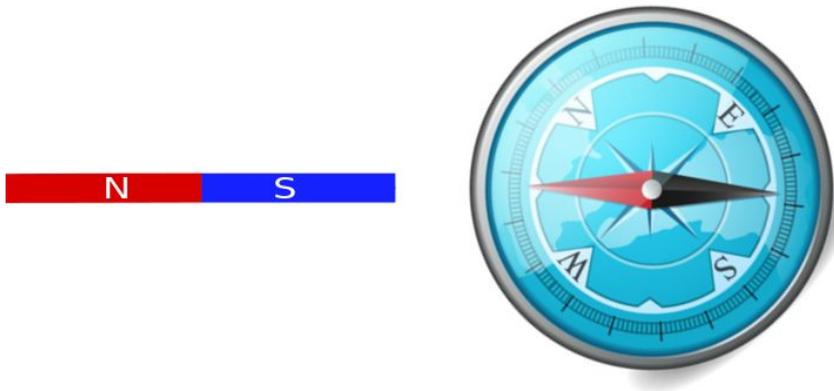
2-



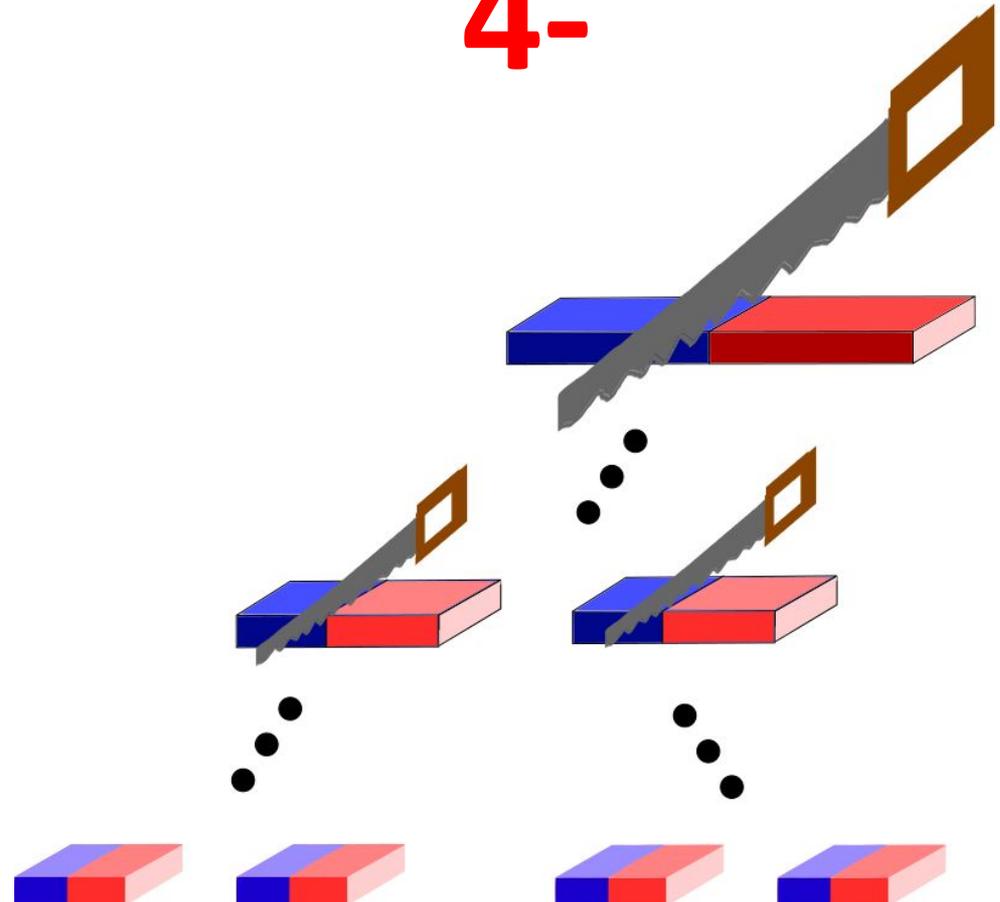
● Descobrindo o magnetismo

A observação de experimentos simples

3-



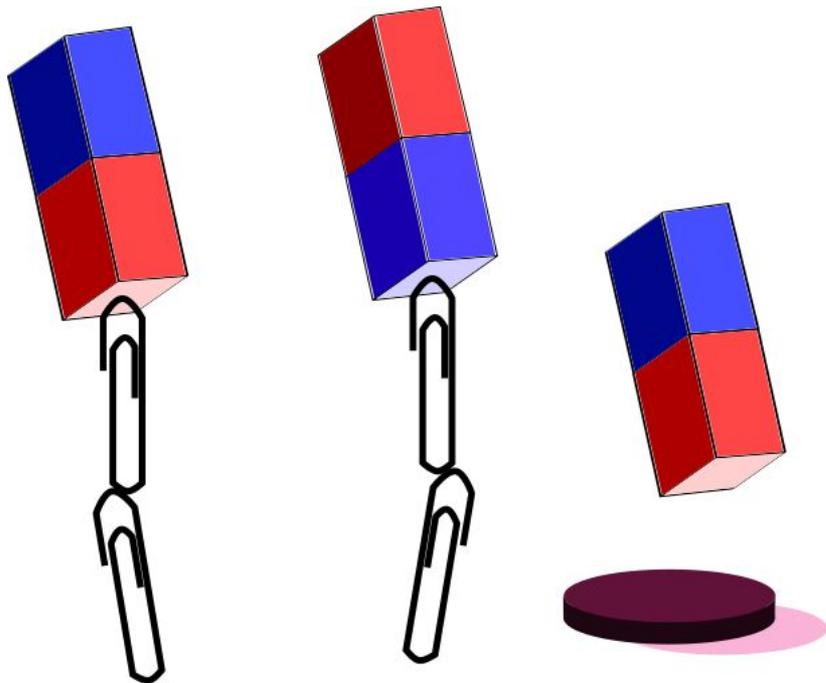
4-



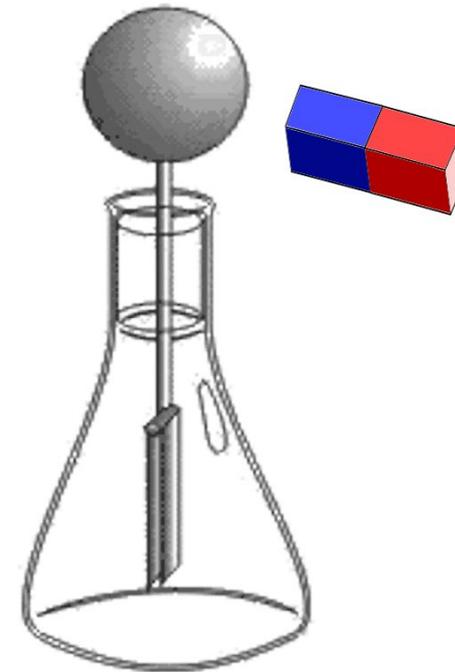
● Descobrindo o magnetismo

A observação de experimentos simples

5-



6-



sem efeito...



● **Descobrendo o magnetismo**

Observações

- **pólos magnéticos são diferentes de cargas elétricas**
- **Força magnética é de ação a distância**
- **Nem todos os materiais exibem comportamento magnético**
- **Materiais magnéticos são sempre atraídos por ímãs, independente do pólo.**

● **Descobrimos o magnetismo**

Observações

- **pólos magnéticos são diferentes de cargas elétricas**
- **Força magnética é de ação a distância**
- **Nem todos os materiais exibem comportamento magnético**
- **Materiais magnéticos são sempre atraídos por ímãs, independente do pólo.**

Substâncias paramagnéticas: substâncias que apresentam **dificuldade de imantação** em presença de um campo B . - madeira, couro, óleo, vidro...

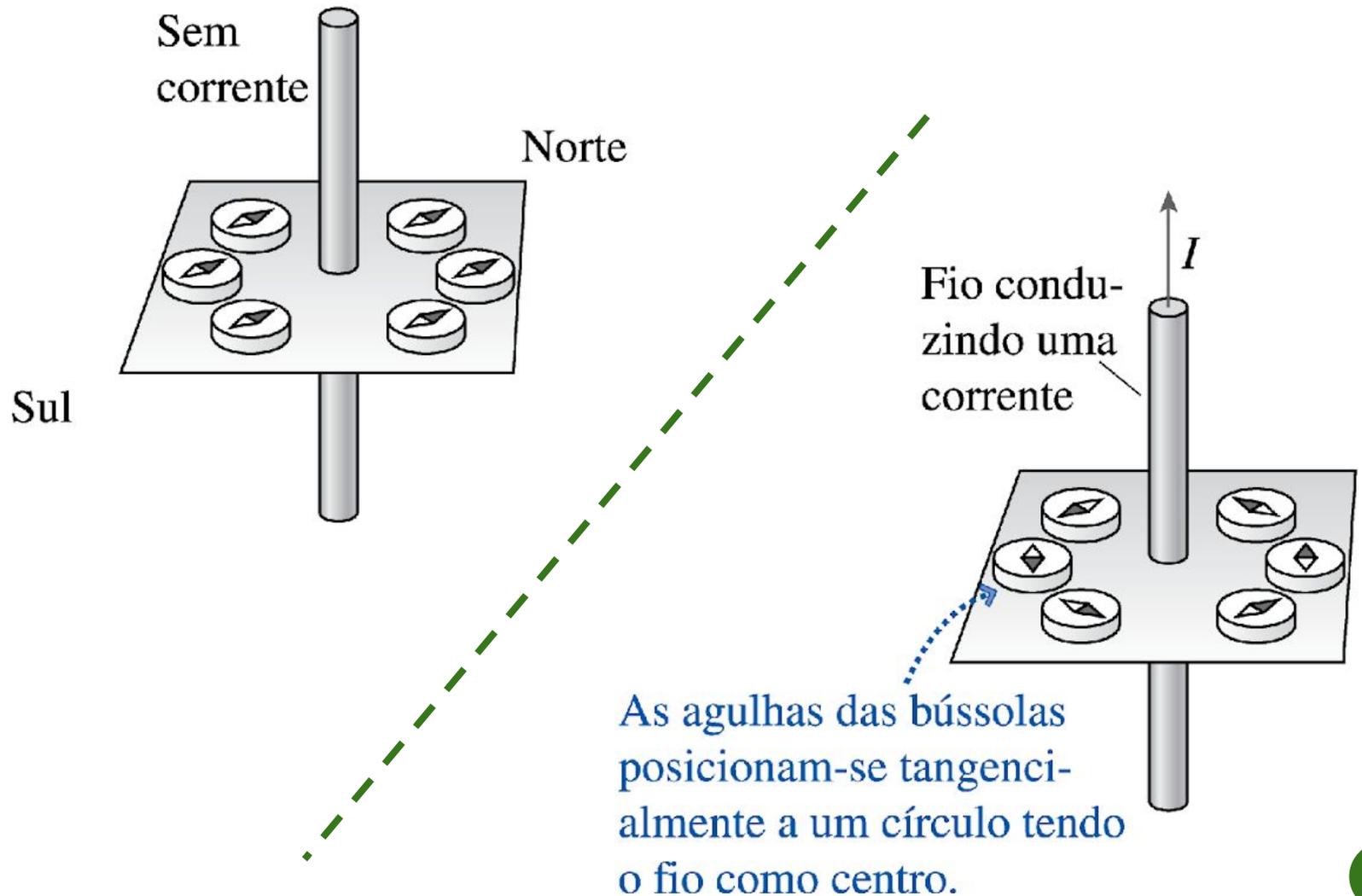
Substâncias ferromagnéticas: substâncias que apresentam **facilidade de imantação** em presença de um campo B . - ferro, cobalto...

Substâncias diamagnéticas: substâncias que apresentam **imantação oposta** em presença de um campo B . - cobre, ouro...



● A descoberta do campo magnético

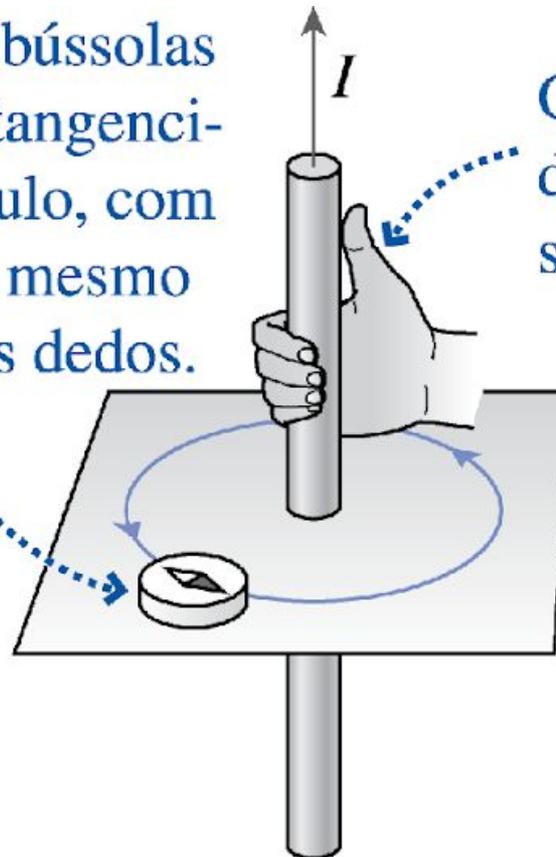
Hans Christian Oersted, em 1819, durante uma aula de demonstração experimental.





● A descoberta do campo magnético

As agulhas das bússolas posicionam-se tangencialmente ao círculo, com o pólo norte no mesmo sentido dos seus dedos.

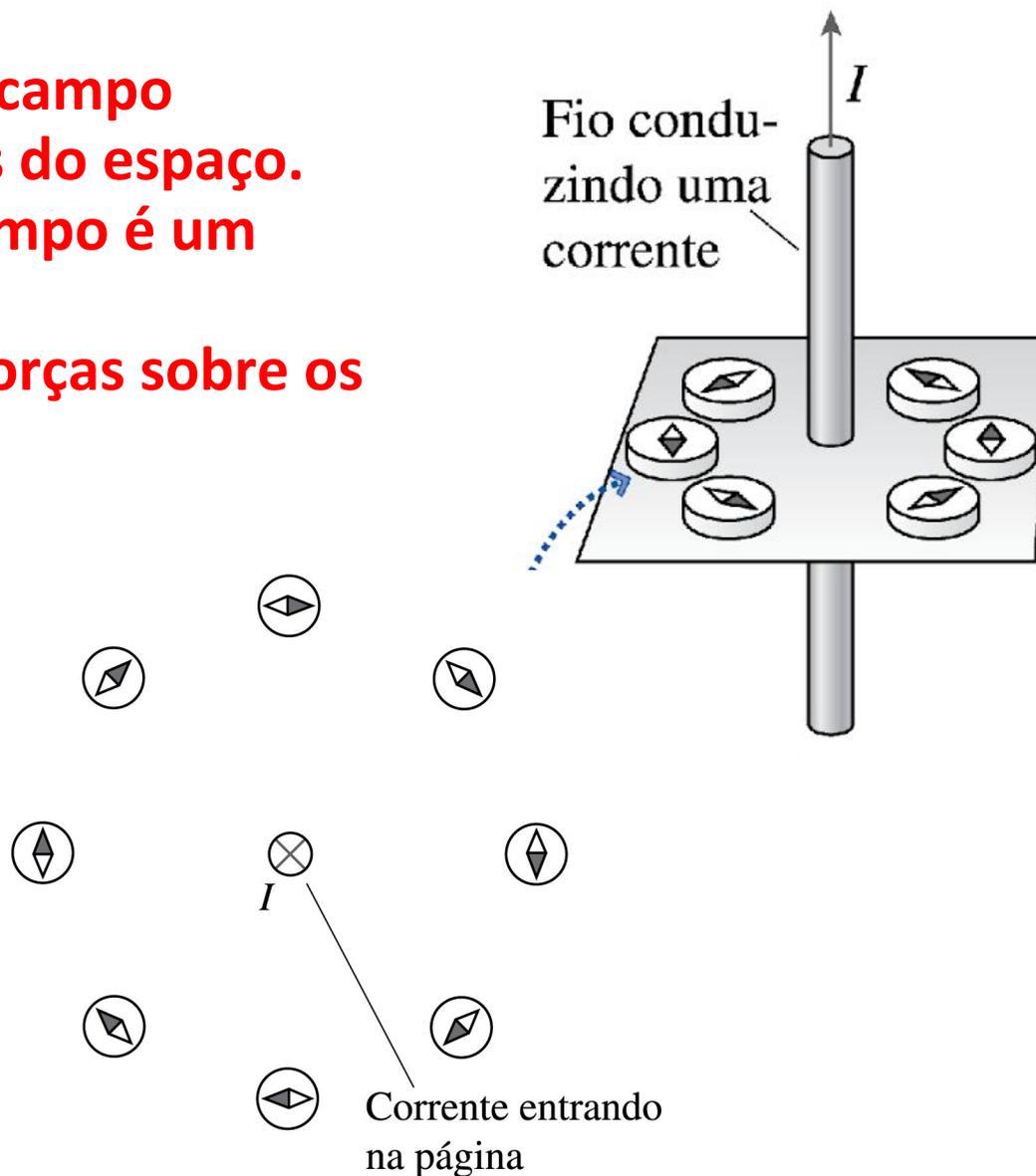


O polegar da mão direita aponta no sentido da corrente.

● A descoberta do campo magnético

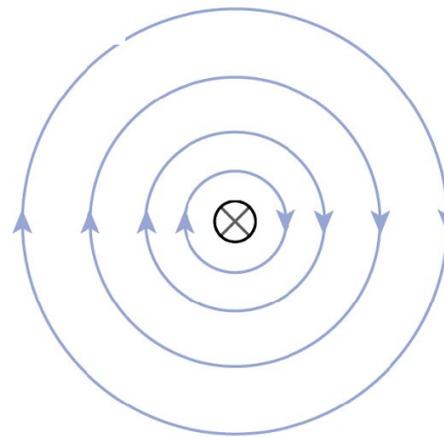
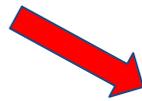
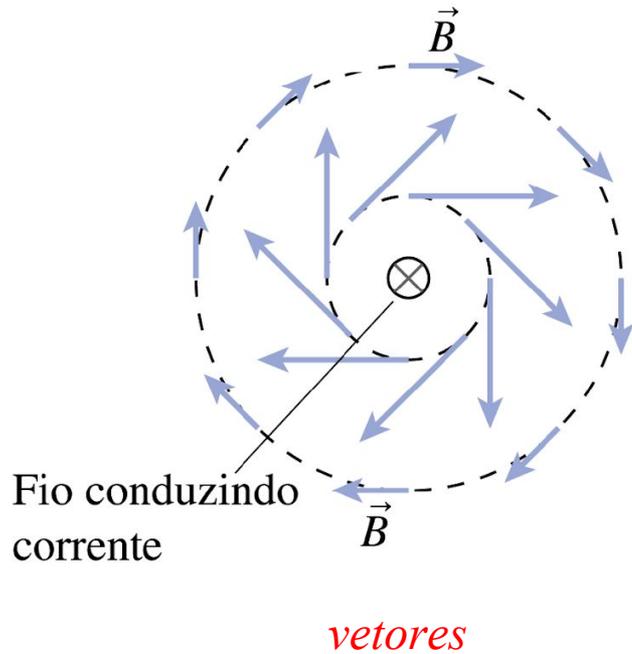
Observações

- toda corrente que flui cria um campo magnético em todos os pontos do espaço.
- em cada ponto do espaço o campo é um vetor
- o campo magnético B exerce forças sobre os pólos magnéticos



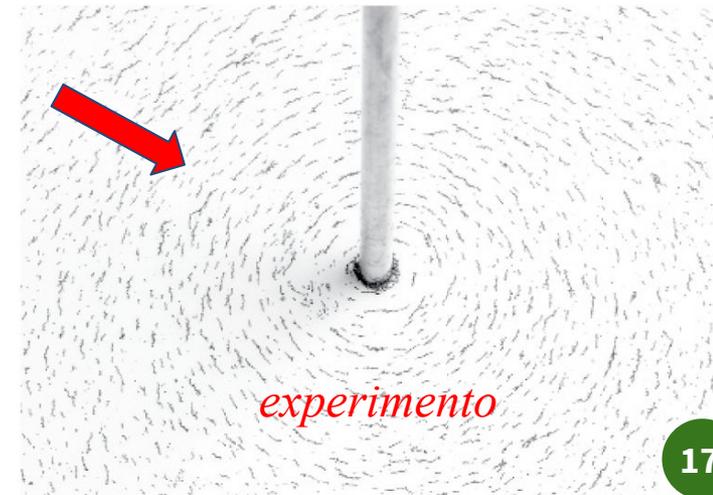


● Representando o campo magnético



linhas de campo

O campo (magnético) produzido por um fio que conduz uma corrente é muito diferente do campo (elétrico) produzido por um fio carregado.





O magnetismo produzido por ímãs permanentes é igual ao magnetismo produzido por correntes?



O magnetismo produzido por ímãs permanentes é igual ao magnetismo produzido por correntes?

- Essas duas maneiras distintas de produzir efeitos magnéticos constituem dois aspectos de uma *única* força magnética.



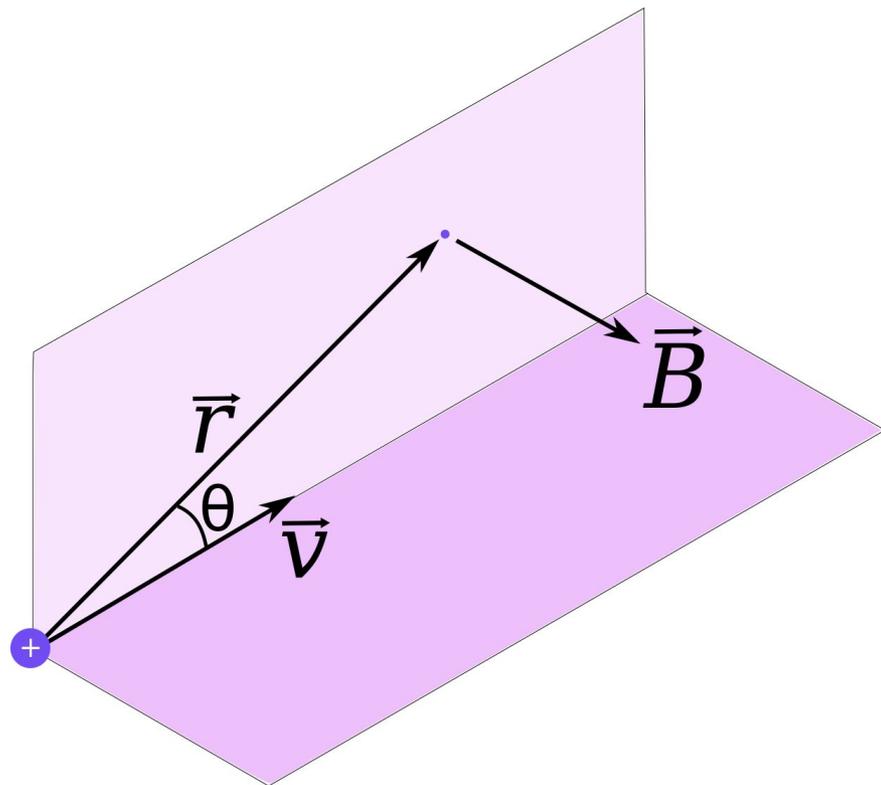
O magnetismo produzido por ímãs permanentes é igual ao magnetismo produzido por correntes?

- Essas duas maneiras distintas de produzir efeitos magnéticos constituem dois aspectos de uma *única* força magnética.

- As cargas elétricas em movimento representam uma fonte de campo magnético.

A Lei de Biot- Savart

$$\vec{B}_{carga} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \hat{r}}{r^2}$$



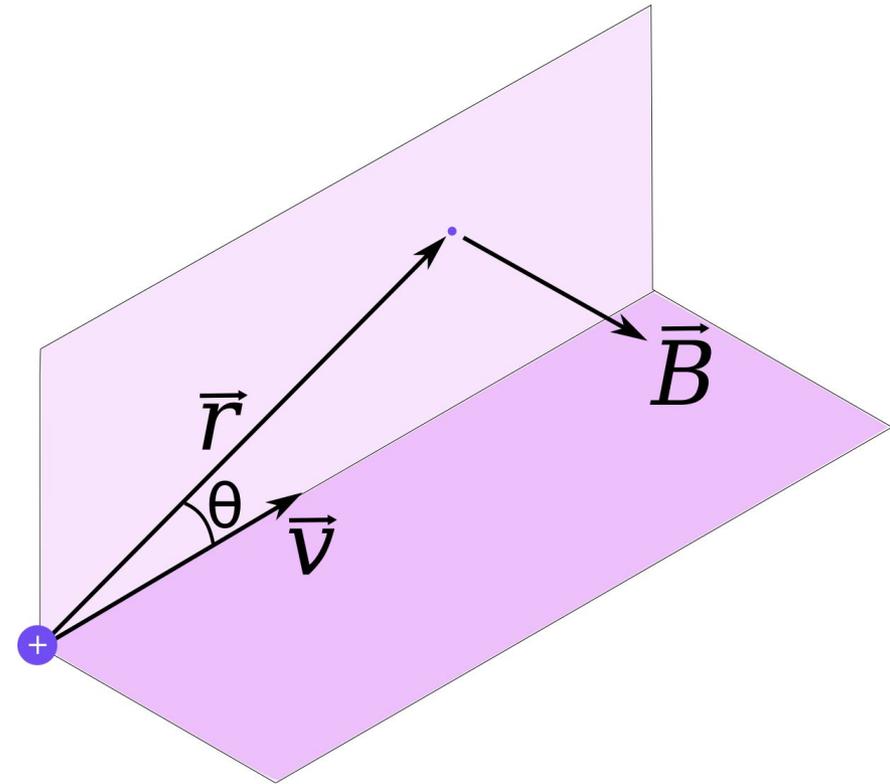
Unidade no SI:

$$1 \text{ tesla} = 1\text{T} = \text{N/Am}$$

- As cargas elétricas em movimento representam uma fonte de campo magnético.

A Lei de Biot- Savart

$$\vec{B}_{carga} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \hat{r}}{r^2}$$



constante de permeabilidade magnética:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$$

Unidade no SI:

$$1 \text{ tesla} = 1\text{T} = \text{N/Am}$$



- *Valores típicos de campos magnéticos*

superfície da Terra -> $0,6 \mu T$

Ímã de geladeira -> $5 mT$

Ímã de laboratório -> $0,1 a 1 T$

Supercondutores -> $10 T$



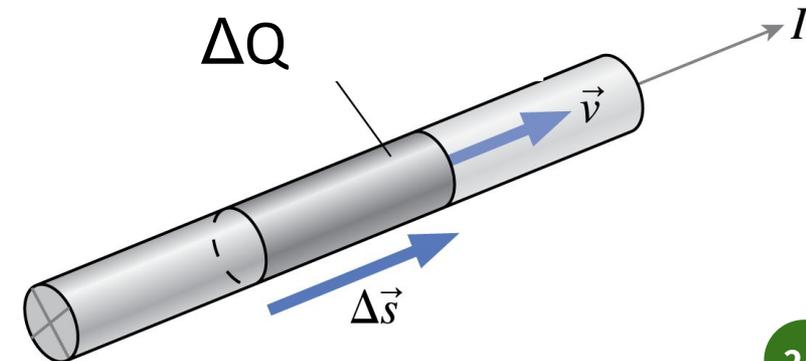
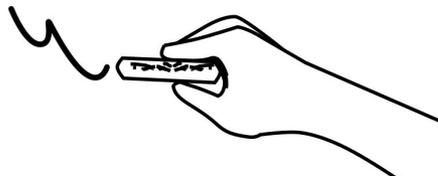
● Cálculo do campo magnético produzido por uma corrente elétrica

Bases:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{A Lei de Biot-Savart} \rightarrow \vec{B}_{\text{carga}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \hat{r}}{r^2} \\ + \\ \text{Princípio da superposição} \rightarrow \vec{B}_{\text{res}} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_N \end{array} \right.$$

A Lei de Biot-Savart em função da corrente elétrica.

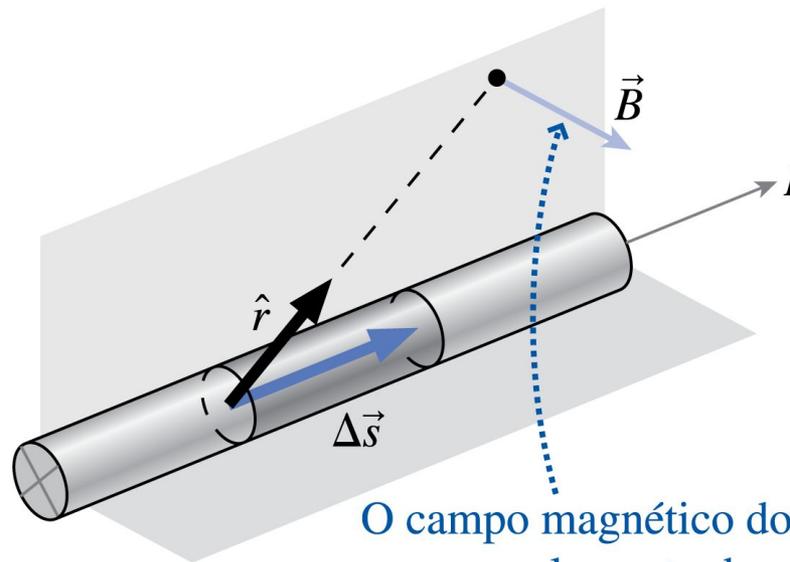
**considerando o fio
com corrente I ao lado...**





A Lei de Biot-Savart em função da corrente elétrica.

$$\vec{B}_{\text{seguimento de corrente}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \Delta \vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$$

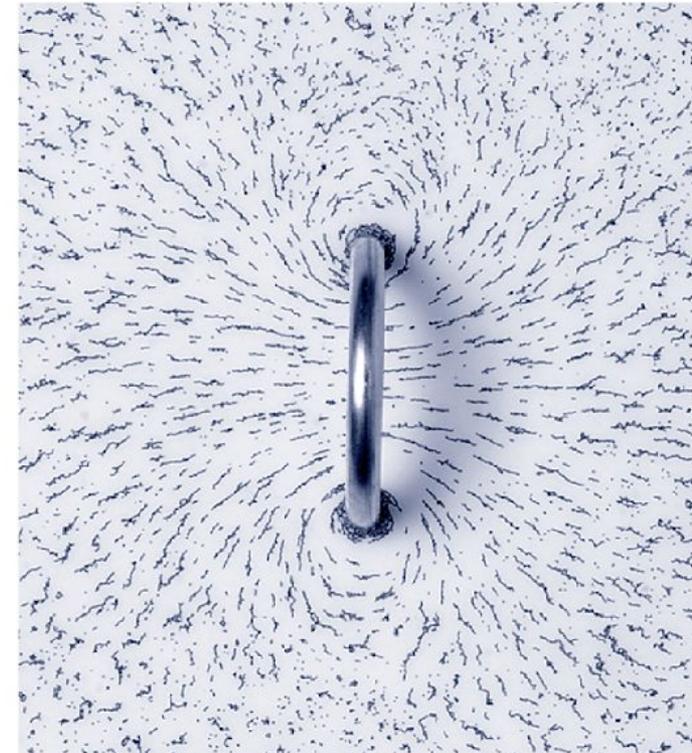
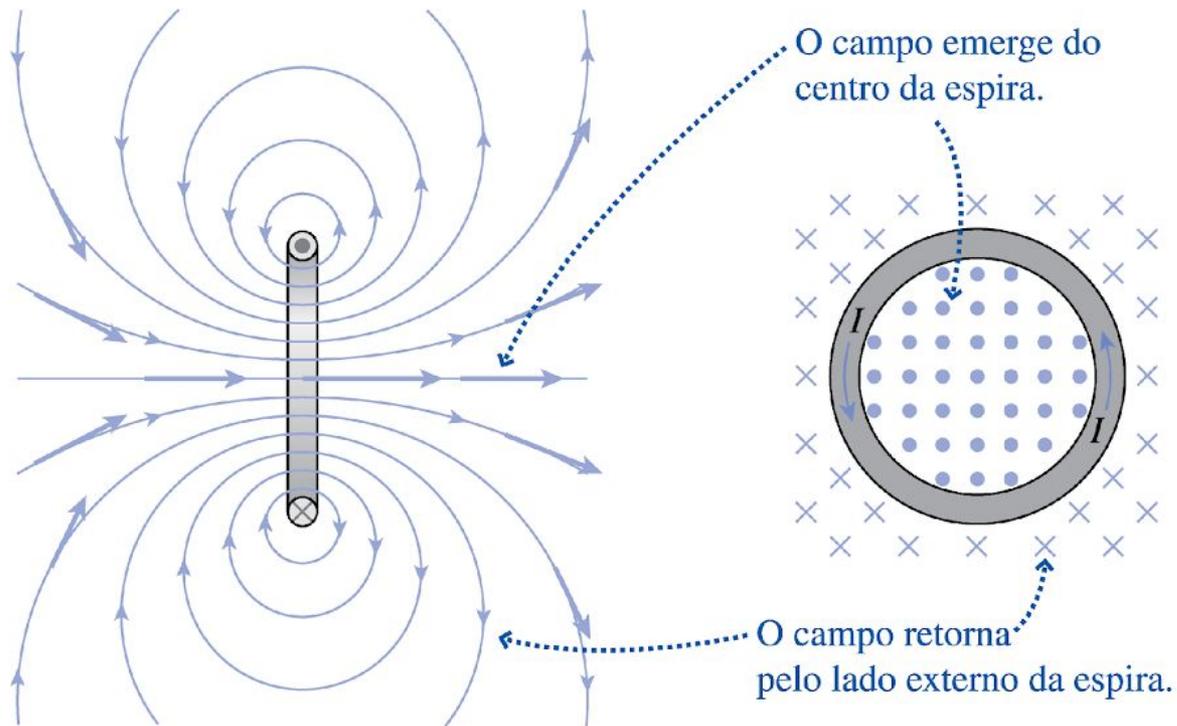


O campo magnético do pequeno elemento de corrente tem a orientação de $\Delta \vec{s} \times \hat{r}$.

● Dipolo magnético

A espira de corrente constitui um dipolo magnético...

(a) Secção transversal da espira de corrente (b) A espira de corrente vista a partir da direita (c) Uma foto com limalha de ferro





cap. 33 - O campo magnético

Instrutor: Prof. Carlos Eduardo Souza - Cadu

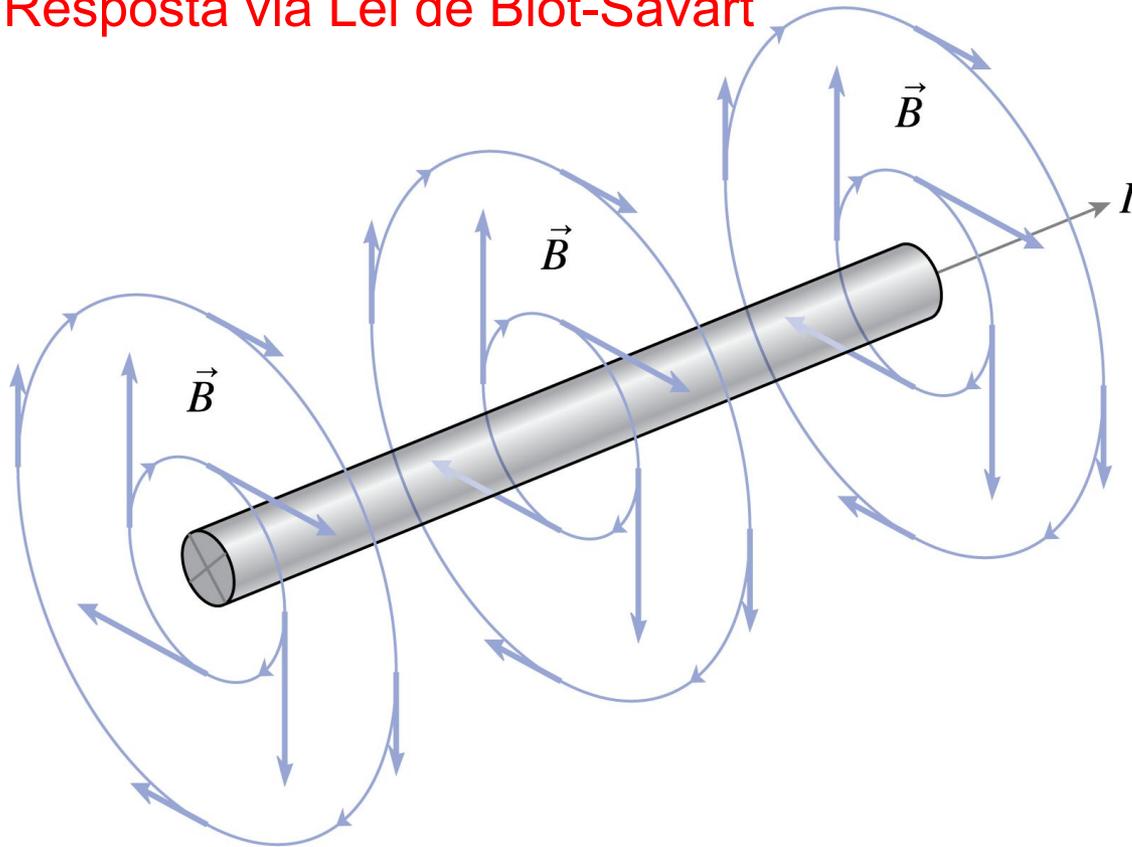
**Sala: A2-15 (IF, andar 1P)
Email: carlooseduardosouza@id.uff.br**



● Problema:

Um fio muito longo e reto conduz uma corrente I . Determine o campo magnético a uma distância d do fio.

Resposta via Lei de Biot-Savart



$$\vec{B}_{fio} = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \hat{\varphi}$$

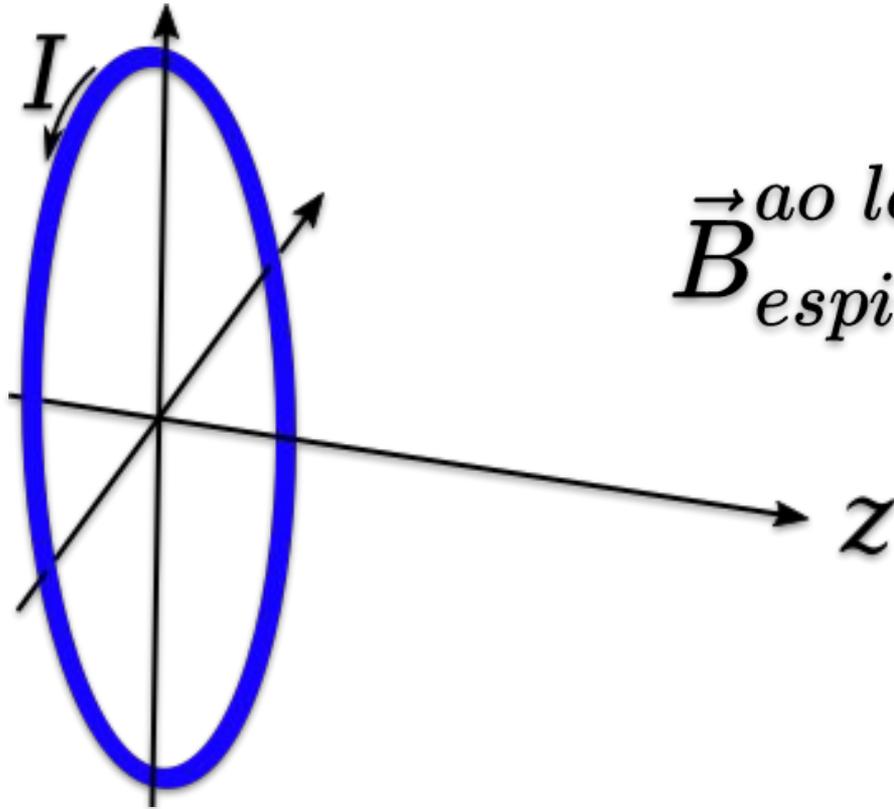
$\hat{\varphi} \Rightarrow$ versor tangente a um círculo em torno do fio orientado pela mão direita.



● Problema:

Qual o campo magnético gerado por uma espira de corrente a uma distância z sobre o eixo de simetria da mesma?

Resposta via Lei de Biot-Savart



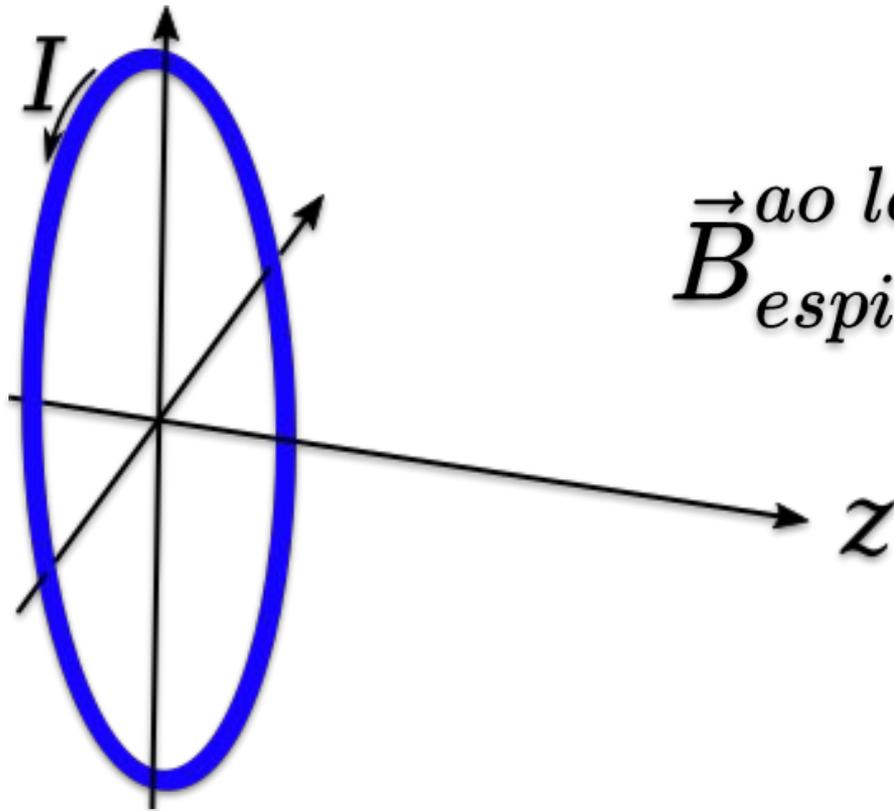
$$\vec{B}_{\text{espira}} \text{ ao longo de } z = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \hat{z}$$



● Problema:

Qual o campo magnético gerado por uma espira de corrente a uma distância z sobre o eixo de simetria da mesma?

Resposta via Lei de Biot-Savart



$$\vec{B}_{\text{espira}} \text{ ao longo de } z = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \hat{z}$$

$\hat{\mu} \rightarrow$ momento de dipolo magnético

Se $z \gg R$

...

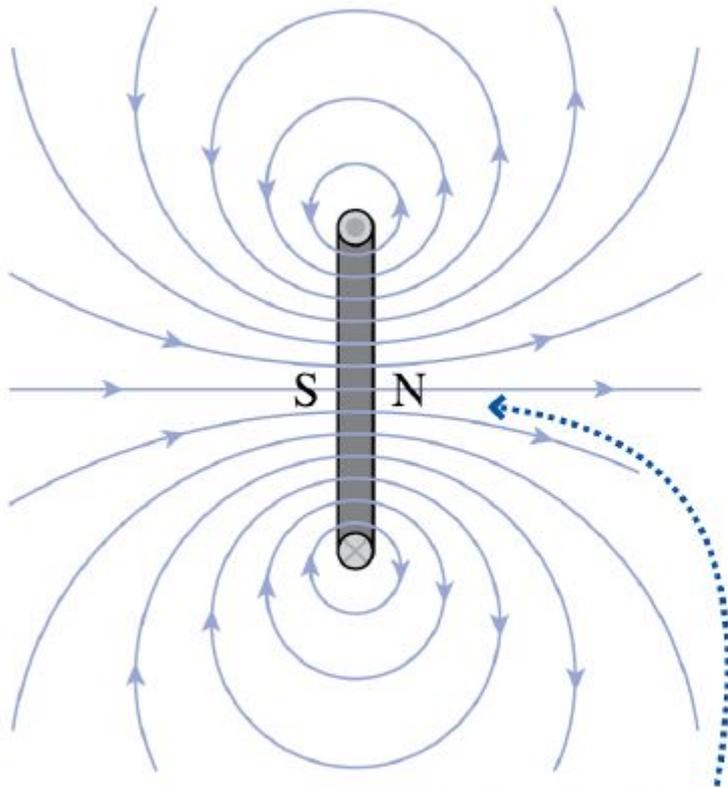
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2IA}{z^3} \hat{z} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{\mu}}{z^3}$$



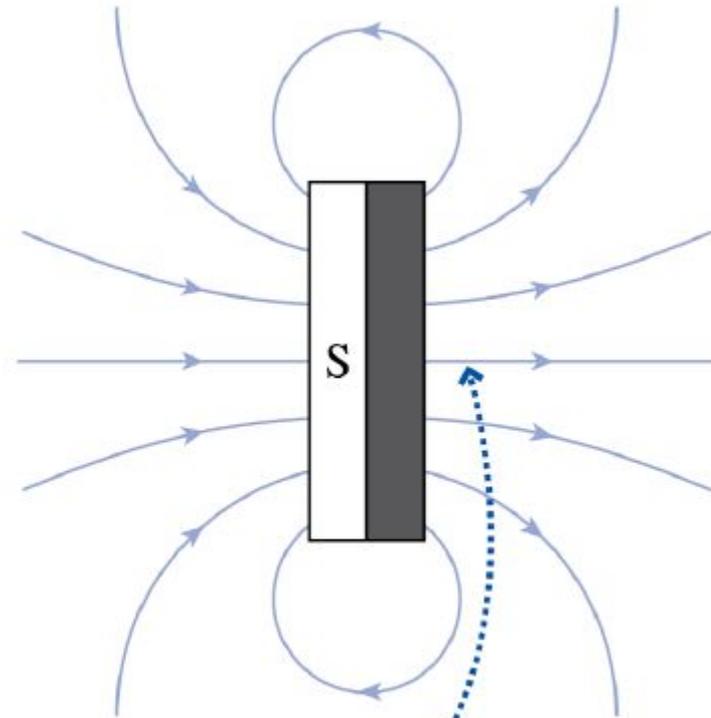
● Dipolo magnético

A espira de corrente gera o mesmo campo (externo) que um ímã permanente.

(a) Espira de corrente



(b) Ímã permanente



Tanto faz se for uma espira de corrente ou um ímã permanente, o campo magnético emerge do pólo norte.



Objetivos:

- Definir e trabalhar com a Lei de Ampère
- Descrever o movimento de uma partícula carregada em um campo magnético: Forças magnéticas
- Descrever o movimento de fios condutores de correntes em um campo magnético: Forças magnéticas
- Descrever propriedades magnéticas de materiais



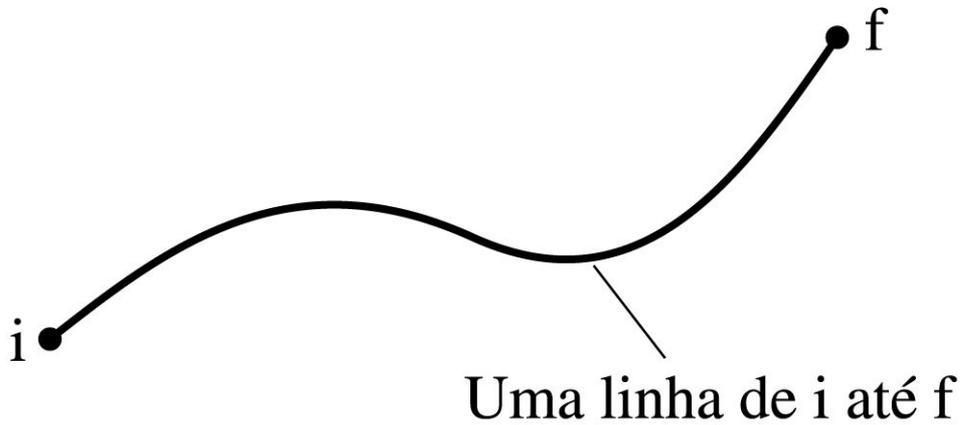
A Lei de Ampère



● A Lei de Ampère e os solenóides

Cálculo de campos com alto grau de simetria...

*Operacionalmente, precisaremos trabalhar com **integrais de linha**.*

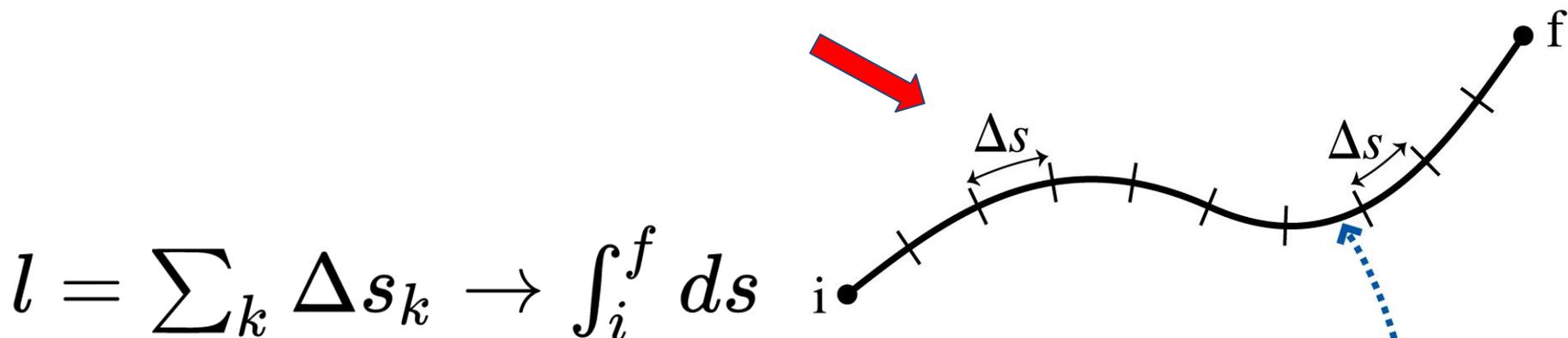
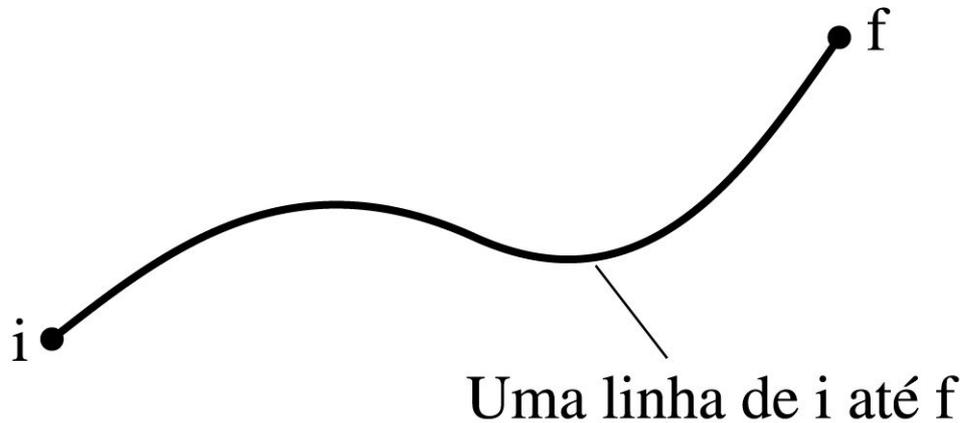




● A Lei de Ampère e os solenóides

Cálculo de campos com alto grau de simetria...

*Operacionalmente, precisaremos trabalhar com **integrais de linha**.*



A linha pode ser dividida em vários pequenos segmentos. A soma de todos os segmentos Δs é o comprimento total l da linha.

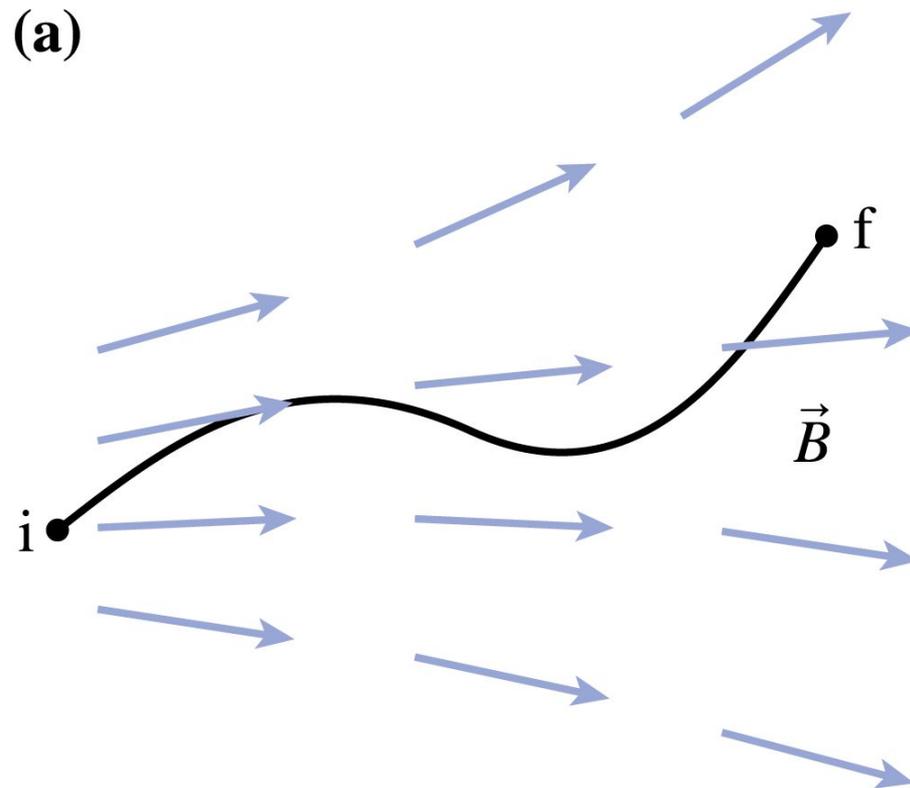


● A Lei de Ampère e os solenóides

Cálculo de campos com alto grau de simetria...

*Operacionalmente, precisaremos trabalhar com **integrais de linha**.*

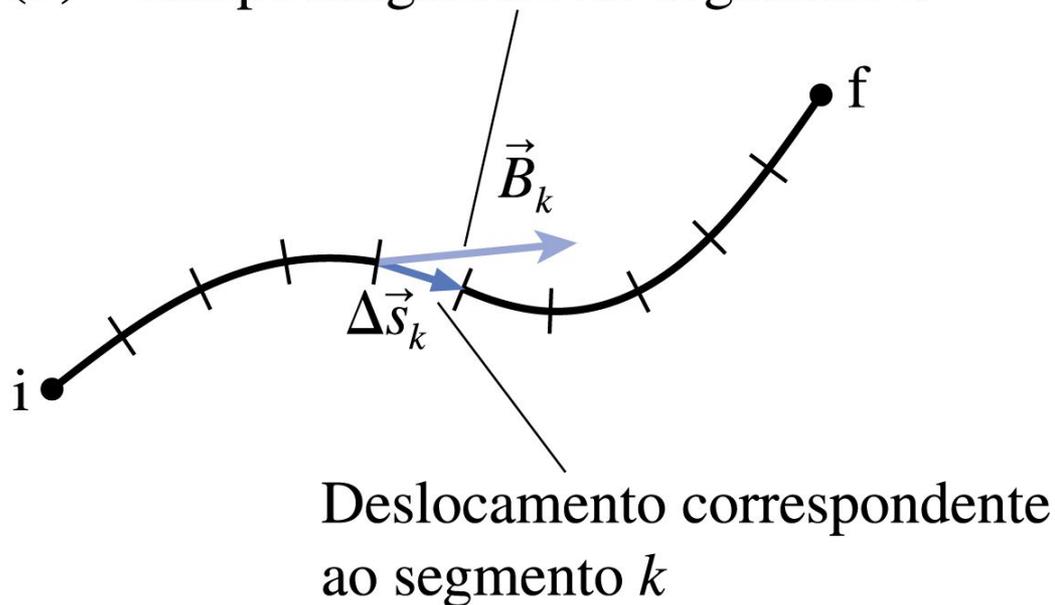
A utilidade de se trabalhar com as integrais de linha surge quando necessitamos trabalhar com campos vetoriais.



A linha atravessa um campo magnético.

● A Lei de Ampère e os solenóides

(b) Campo magnético no segmento k



$$\sum_k \vec{B}_k \cdot \Delta \vec{s}_k \Rightarrow \int_i^f \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

Dividimos a linha em uma infinidade de pequenos segmentos e calculamos $\vec{B}_k \cdot \Delta \vec{s}_k$ para cada um deles e, depois, adicionamos-os.



● A Lei de Ampère e os solenóides

Cálculo de campos com alto grau de simetria...

Em resumo :

$$\vec{B} \perp \text{à curva} \Rightarrow \int_i^f \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

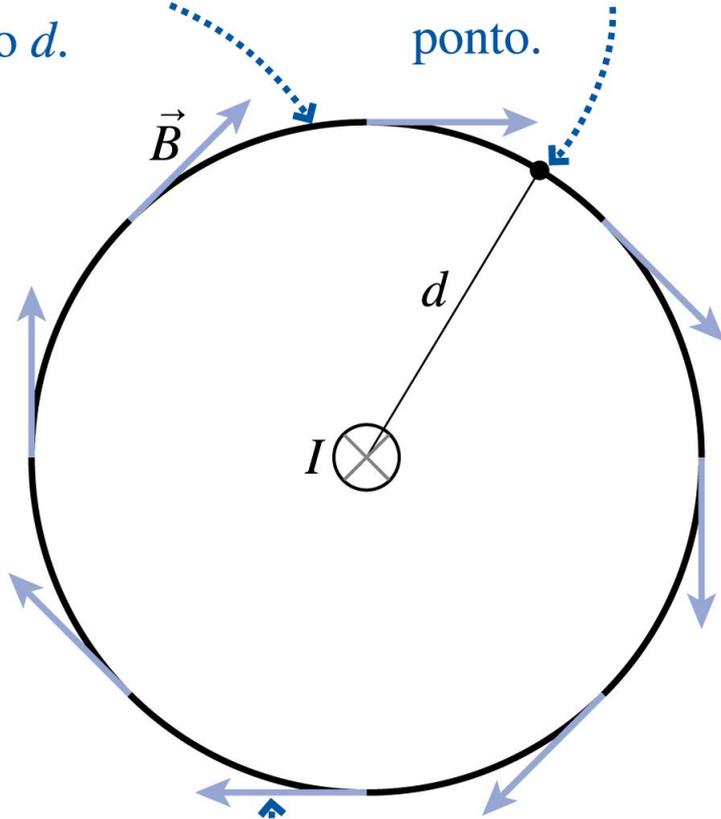
$$\vec{B} \parallel \text{à curva} \Rightarrow \int_i^f \vec{B} \cdot d\vec{s} = Bl$$



Usando a lei de Ampère: campo em um fio

O caminho de integração é um círculo de raio d .

A integração começa e termina no mesmo ponto.



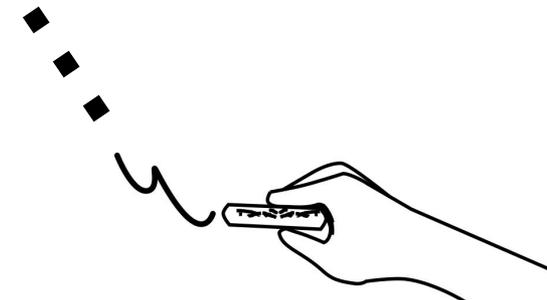
\vec{B} é tangente em qualquer lugar do caminho de integração e tem módulo constante.

Em resumo :

$$\vec{B} \perp \text{à curva} \Rightarrow \oint_i^f \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

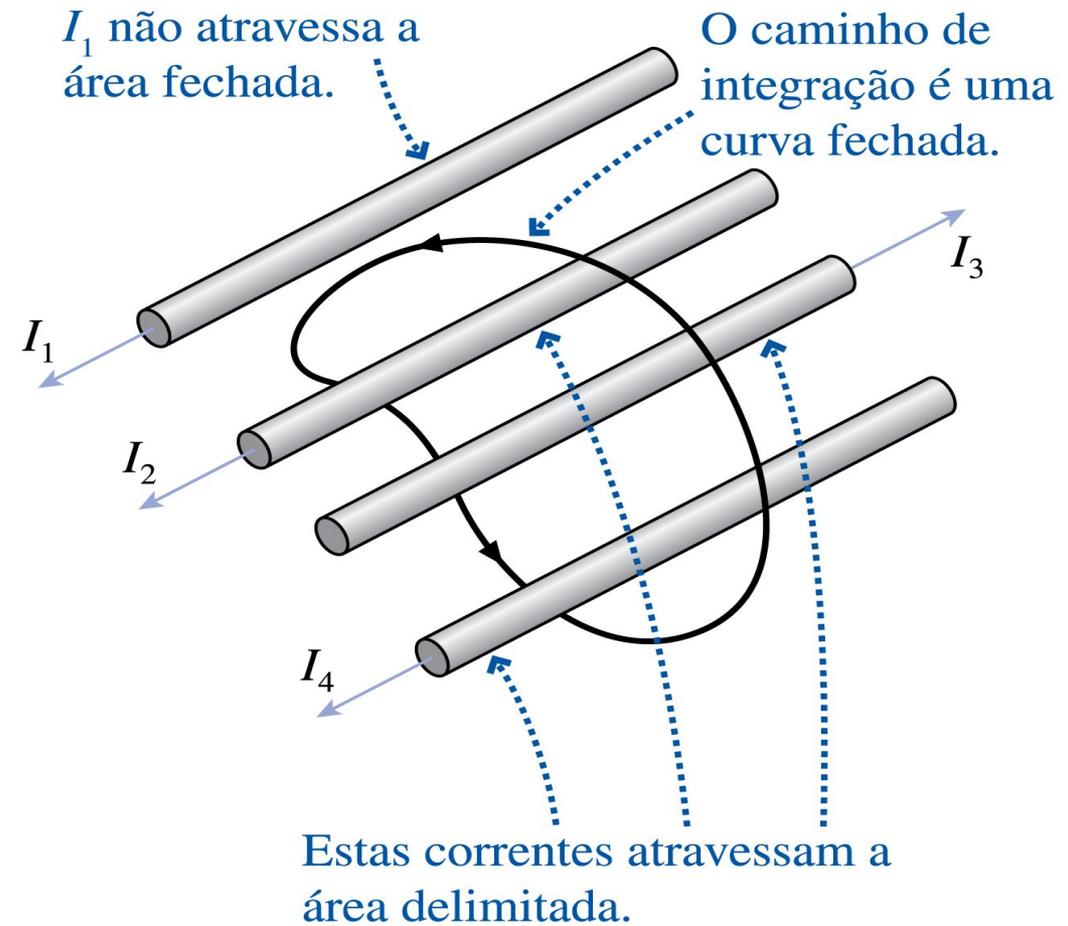
$$\vec{B} \parallel \text{à curva} \Rightarrow \oint_i^f \vec{B} \cdot d\vec{s} = Bl$$

$$\oint_i^f \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{\text{através}}$$



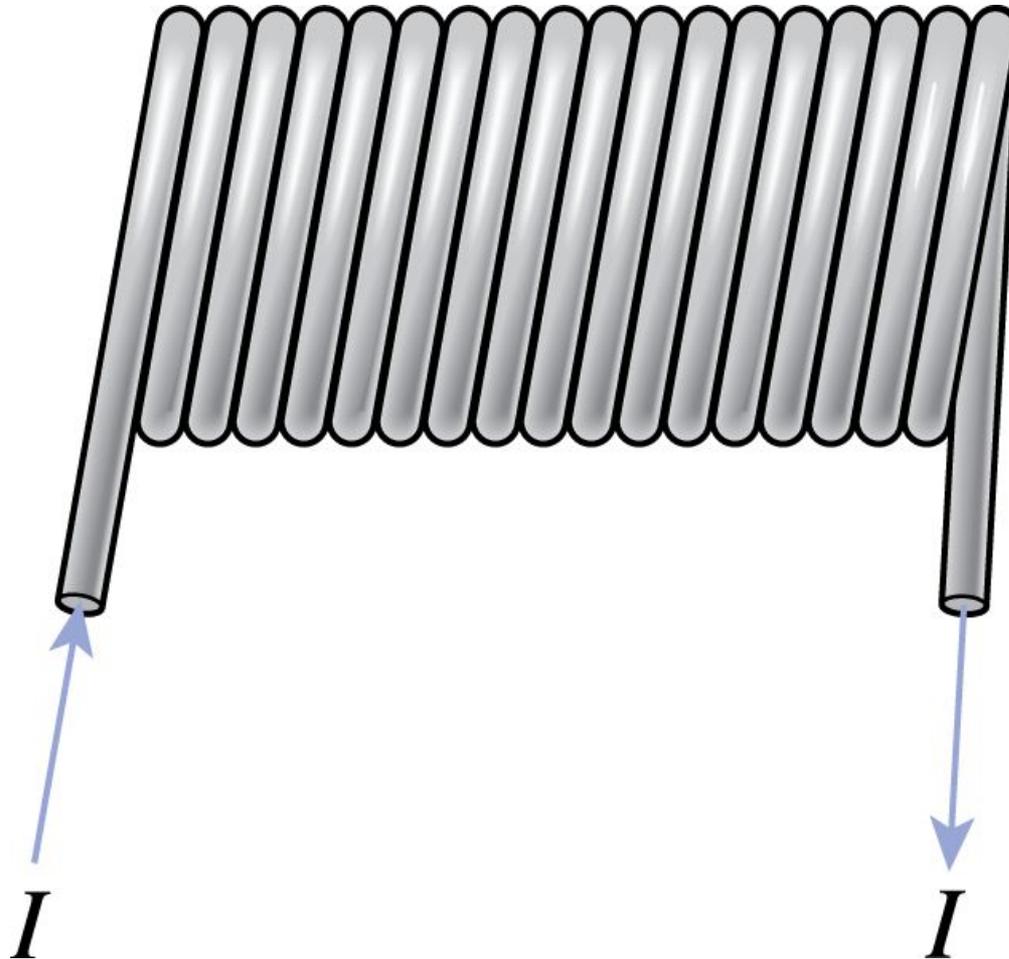
Usando a lei de Ampère...

$$\oint_i^f \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{\text{através}}$$



● O campo criado por um solenóide

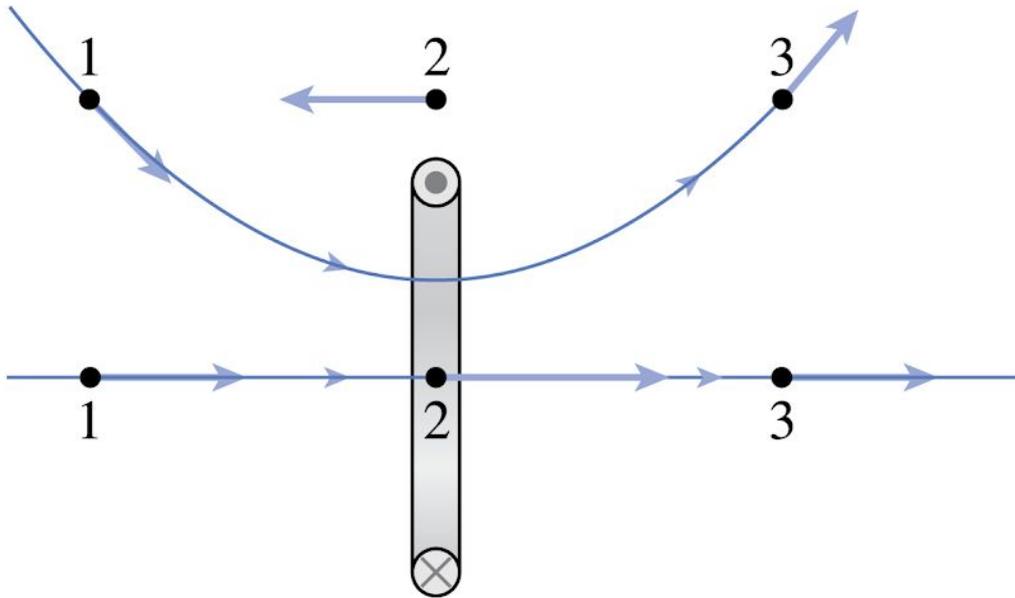
$$\vec{B} = ?$$





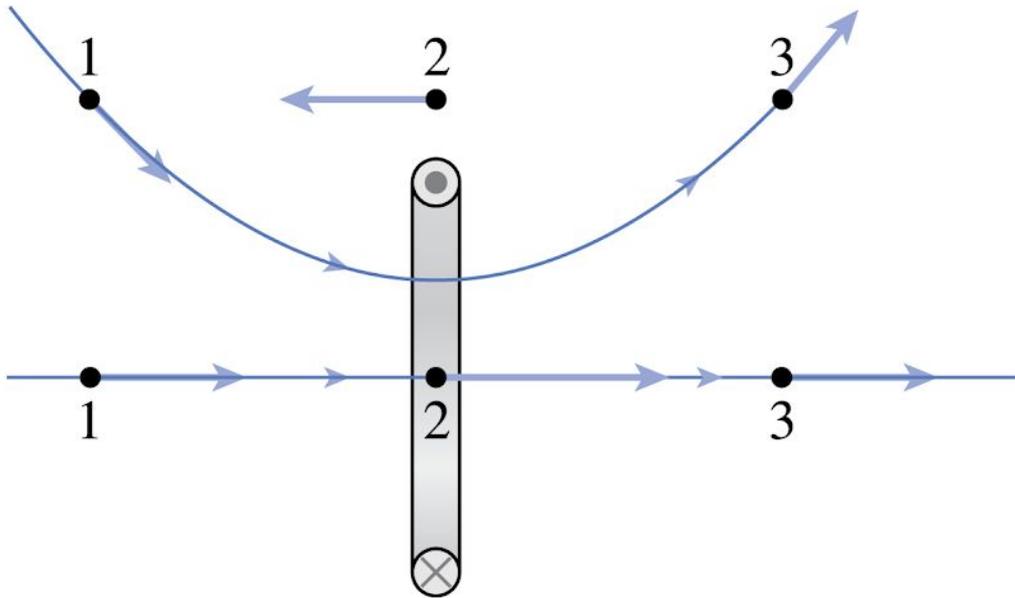
● O campo criado por um solenóide *qualitativamente...*

(a) Uma única espira

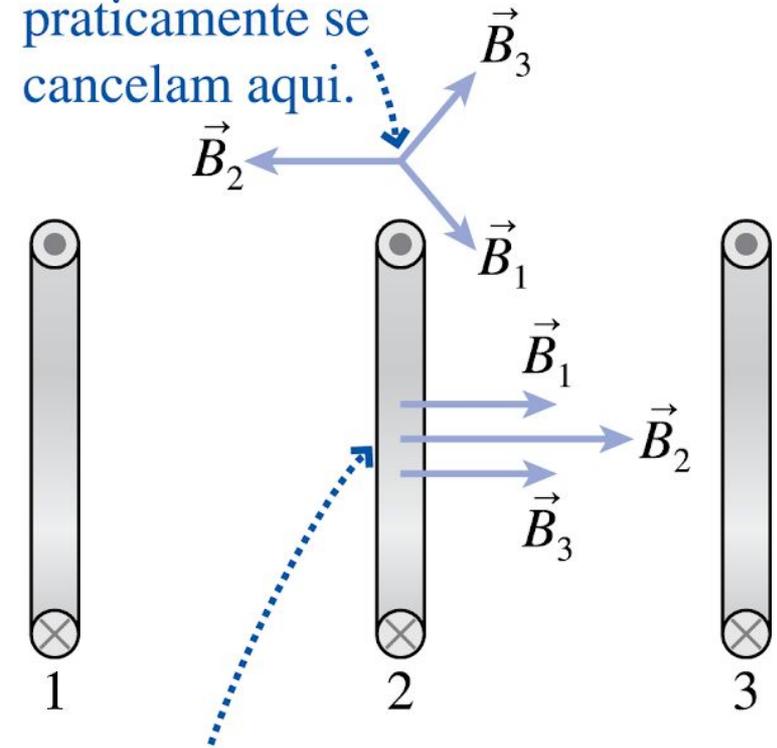


● O campo criado por um solenóide qualitativamente...

(a) Uma única espira



(b) Um grupo de três espiras
Os campos das três espiras praticamente se cancelam aqui.

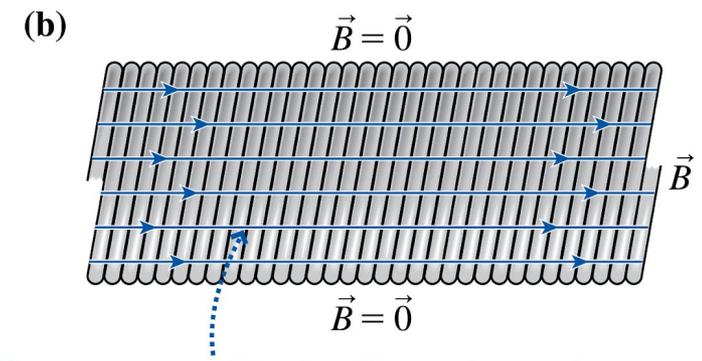
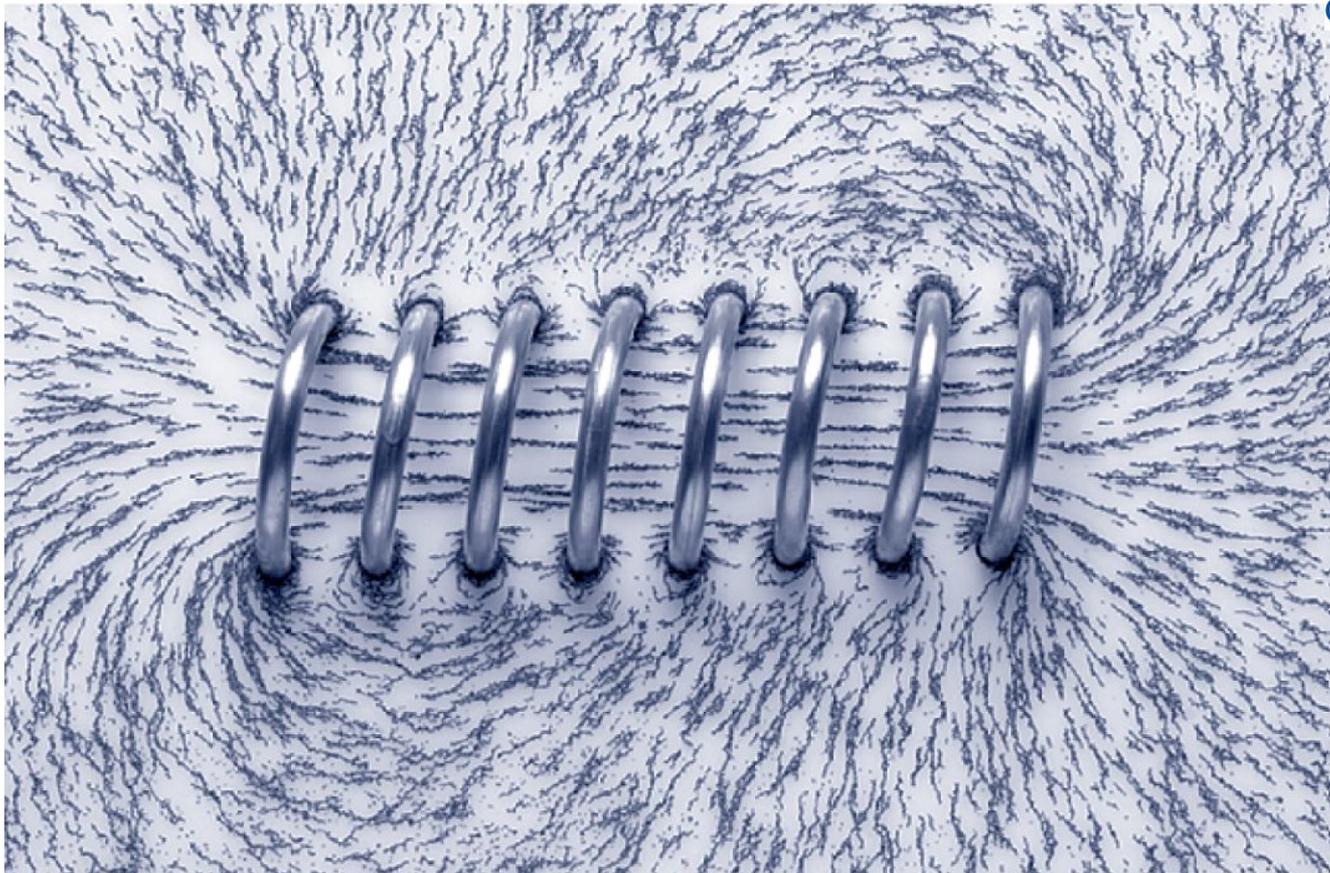


Os campos se reforçam aqui.



● O campo criado por um solenóide experimentalmente...

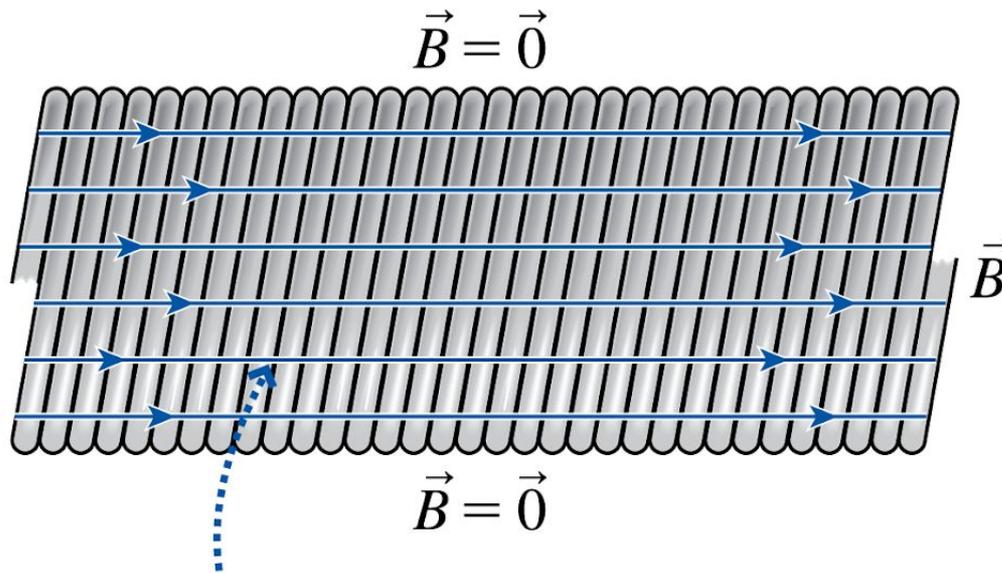
(a) Um solenóide curto



O campo magnético é uniforme dentro desta secção de um solenóide ideal infinitamente longo. O campo magnético fora do solenóide é nulo.



- O campo criado por um solenóide **Ideal (infinito)** quantitativamente...

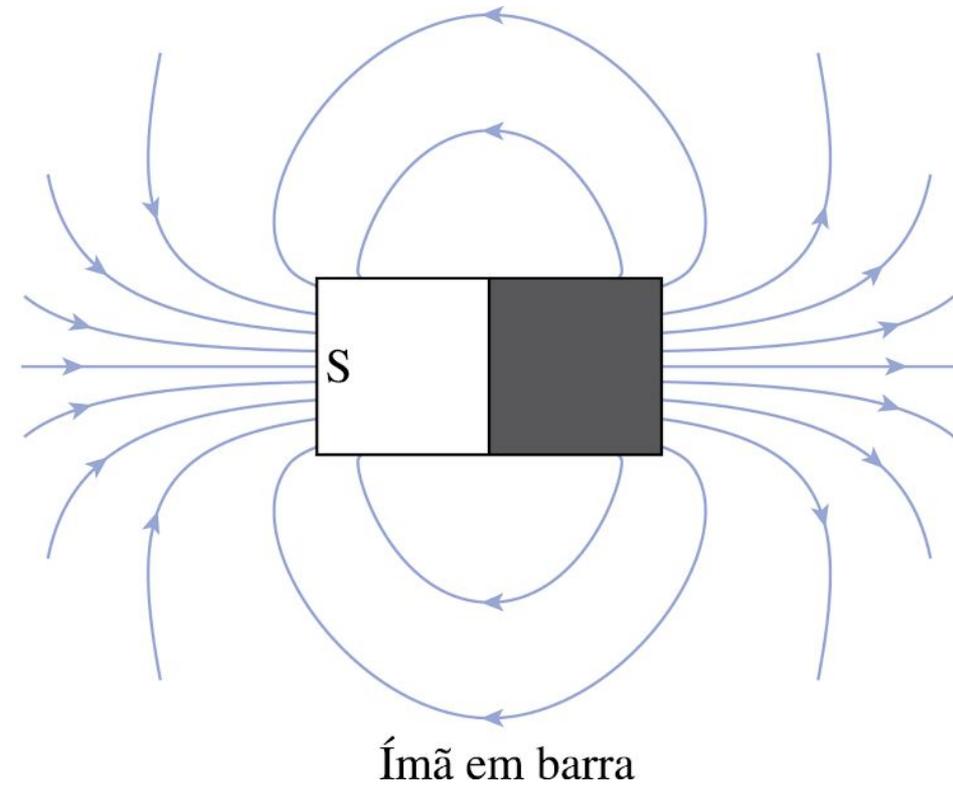
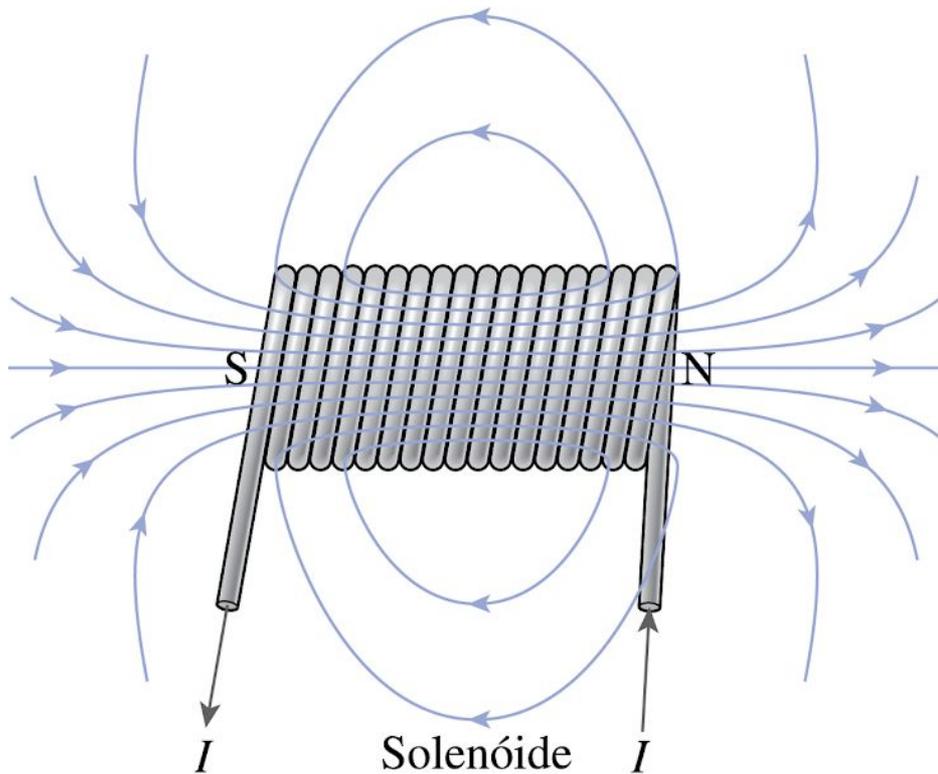


O campo magnético é uniforme dentro desta secção de um solenóide ideal infinitamente longo.
O campo magnético fora do solenóide é nulo.

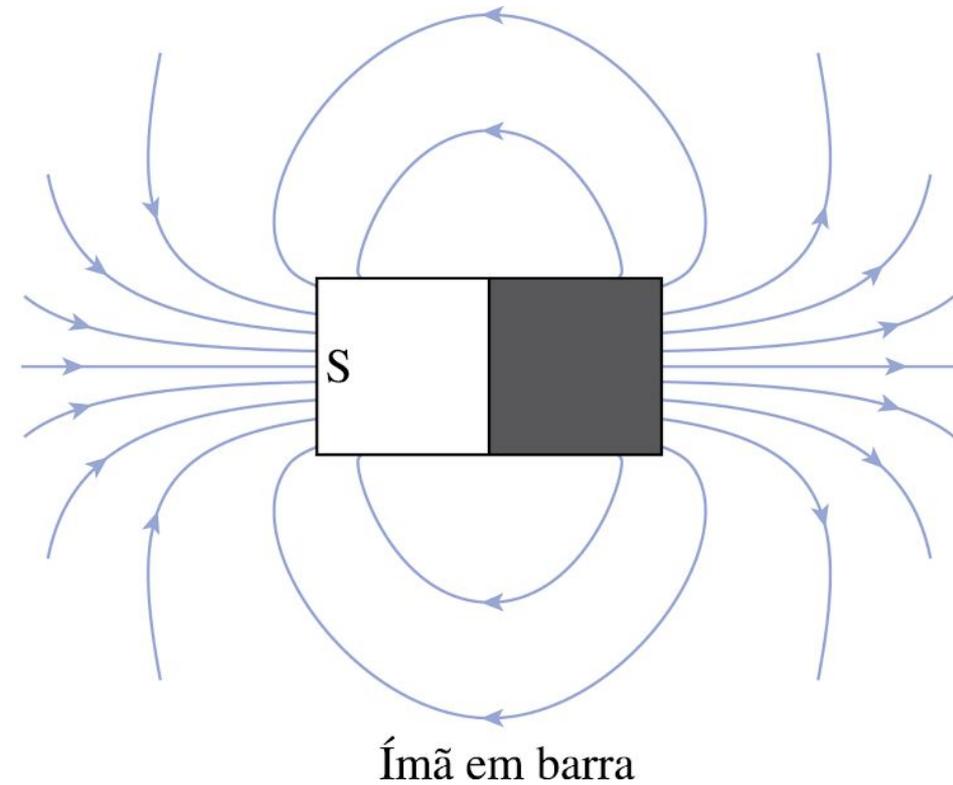
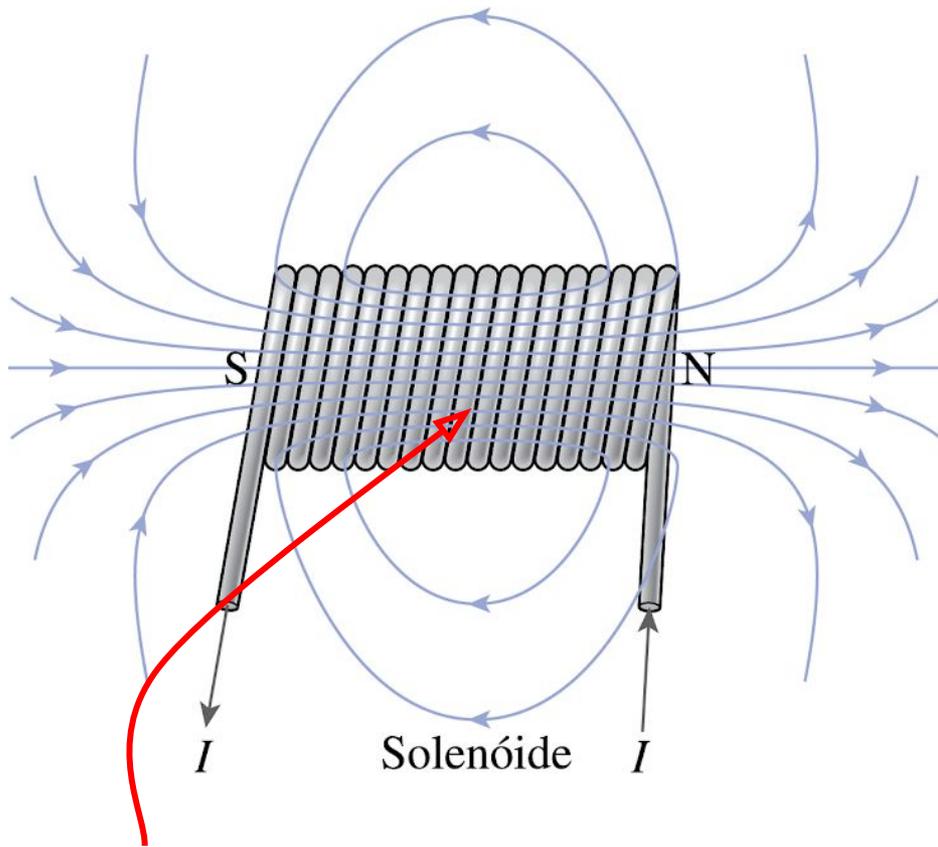
$$\vec{B}_{\text{solenóide}} = \frac{\mu_0 N I}{l} = \mu_0 n I$$



● O campo criado por um solenóide **Real**



● O campo criado por um solenóide **Real**



Nas proximidades do centro do solenóide o campo magnético é \sim cte.



● Força magnética sobre uma partícula em movimento

Historicamente: dois fatos

1º) Oersted descobriu que:

I -> torque em uma bússola.

2º) Ampère conjectura

***"Um fio conduzindo corrente
exerce força um sobre o outro"***



● Força magnética sobre uma partícula em movimento

Historicamente: dois fatos

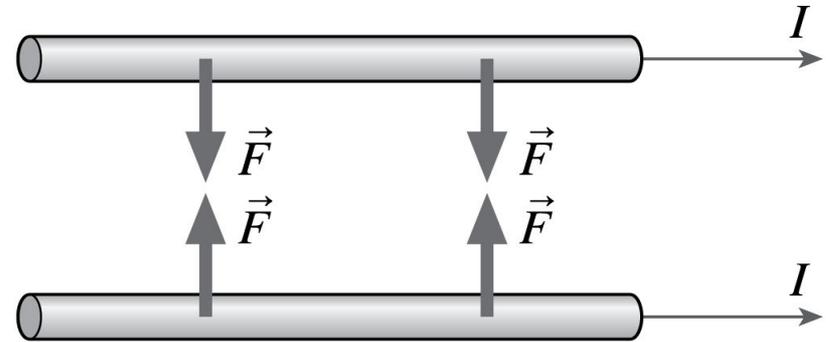
1º) Oersted descobriu que:

I -> torque em uma bússola.

2º) Ampère conjectura

"Um fio conduzindo corrente exerce força um sobre o outro"

Ampère realiza a experiência e verifica...



Correntes de mesmo sentido se atraem



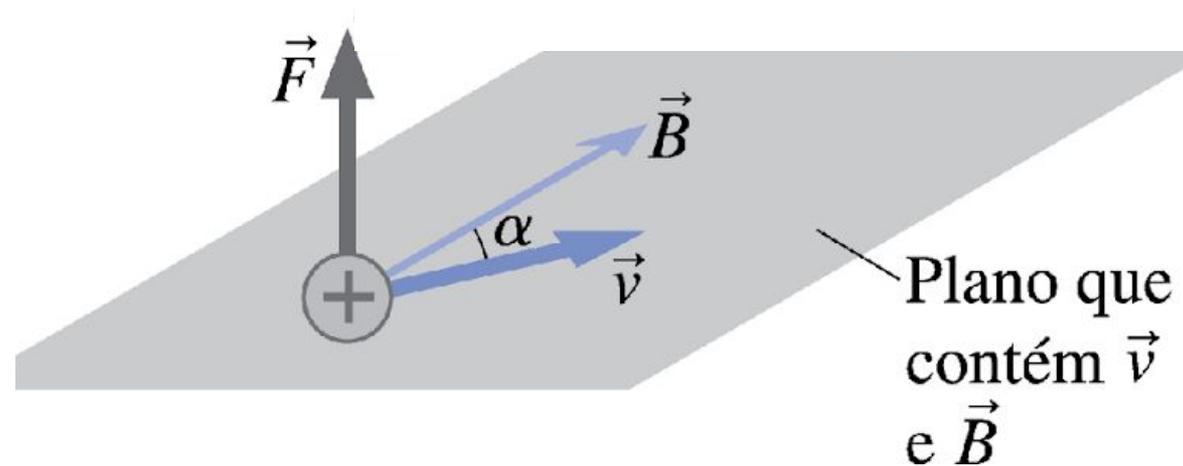
Correntes de sentidos opostos se repelem

● Força magnética sobre uma partícula em movimento

Historicamente:

A fórmula exata da força magnética só apareceu no fim do séc. XIX

$$\vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

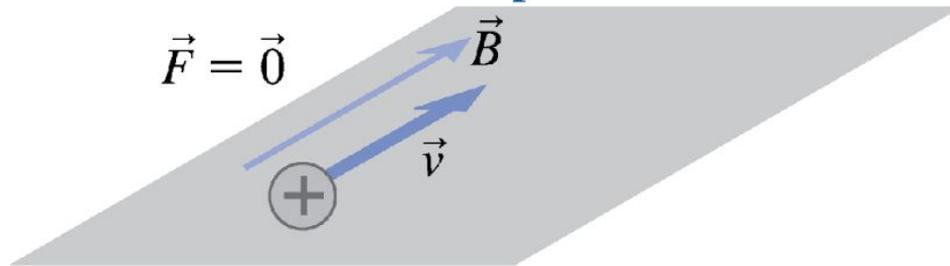




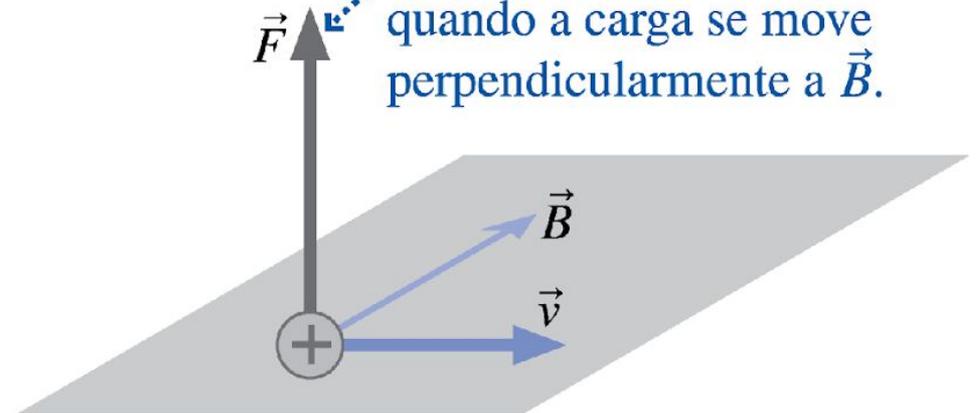
● Força magnética sobre uma partícula em movimento

Casos particulares:

Não há força sobre uma carga que se move paralelamente a \vec{B} .



A força magnética é máxima quando a carga se move perpendicularmente a \vec{B} .

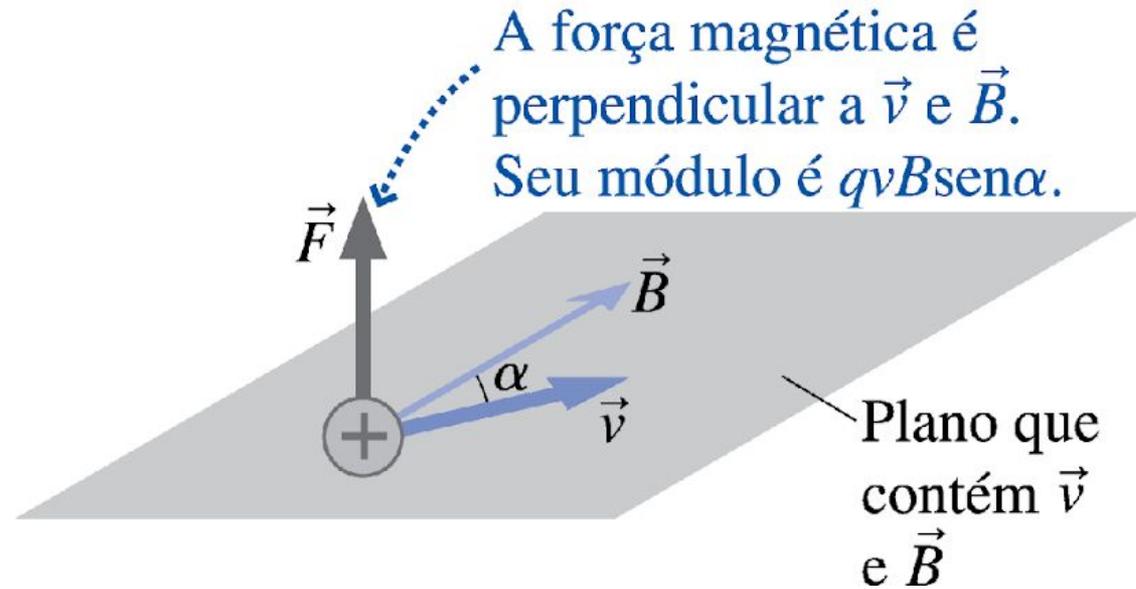


$$\vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



● Força magnética sobre uma partícula em movimento

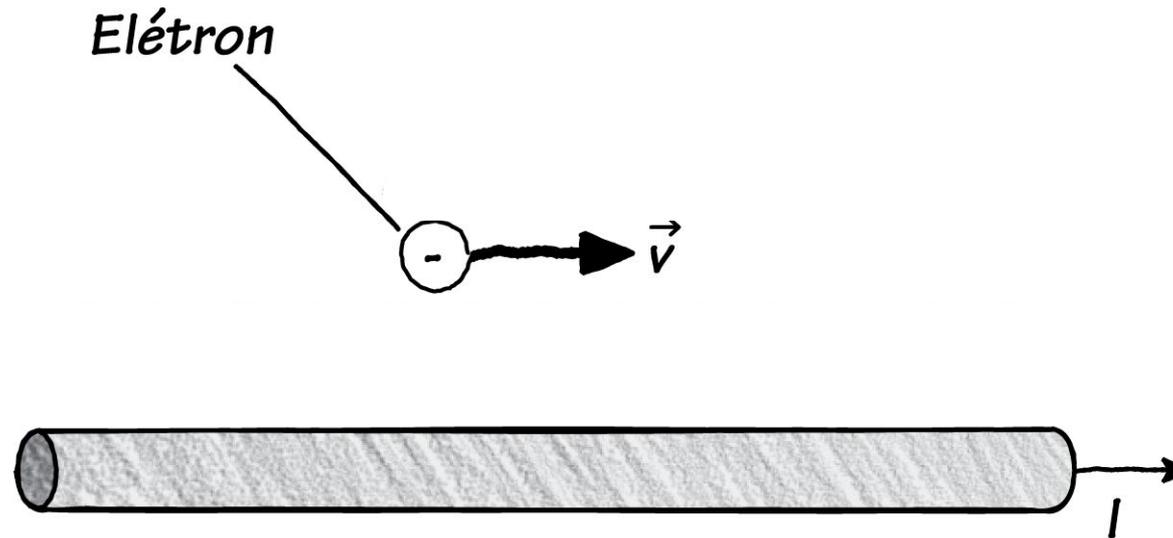
Casos particulares:



$$\vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



Um fio conduz uma corrente elétrica I . Para onde aponta força magnética?



A) \rightarrow

B) \leftarrow

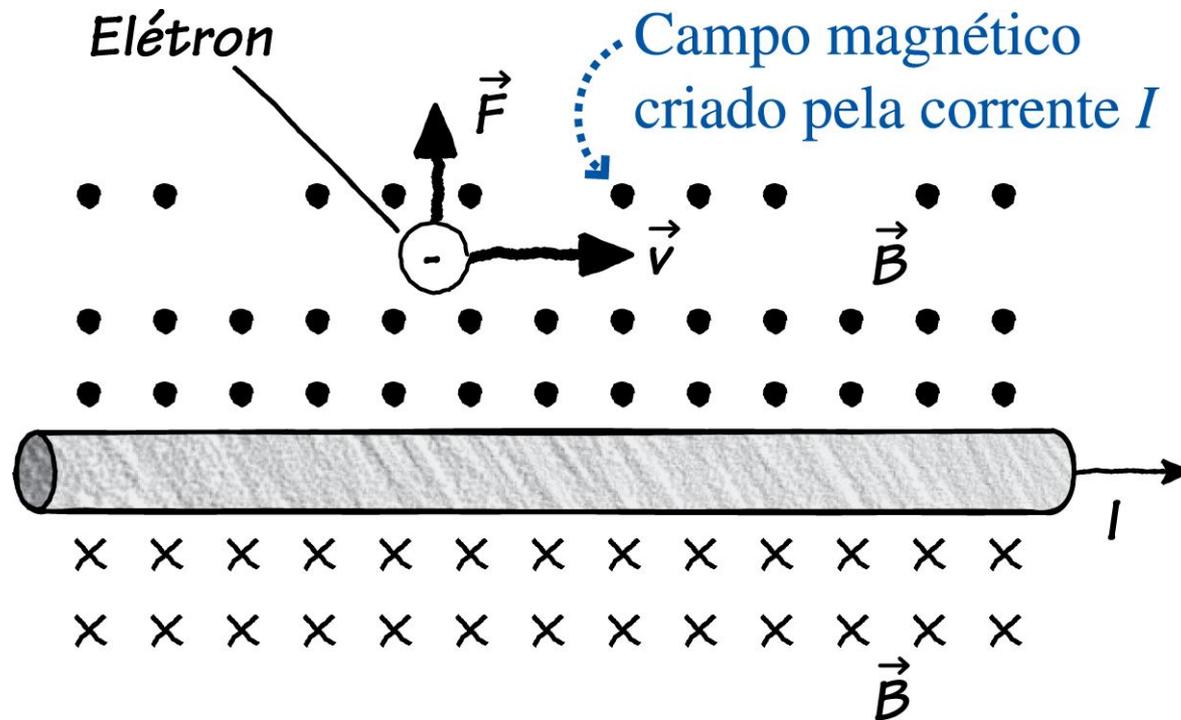
C) \uparrow

D) \downarrow

E) \odot

F) \otimes

Um fio conduz uma corrente elétrica I . Pra onde aponta força magnética?

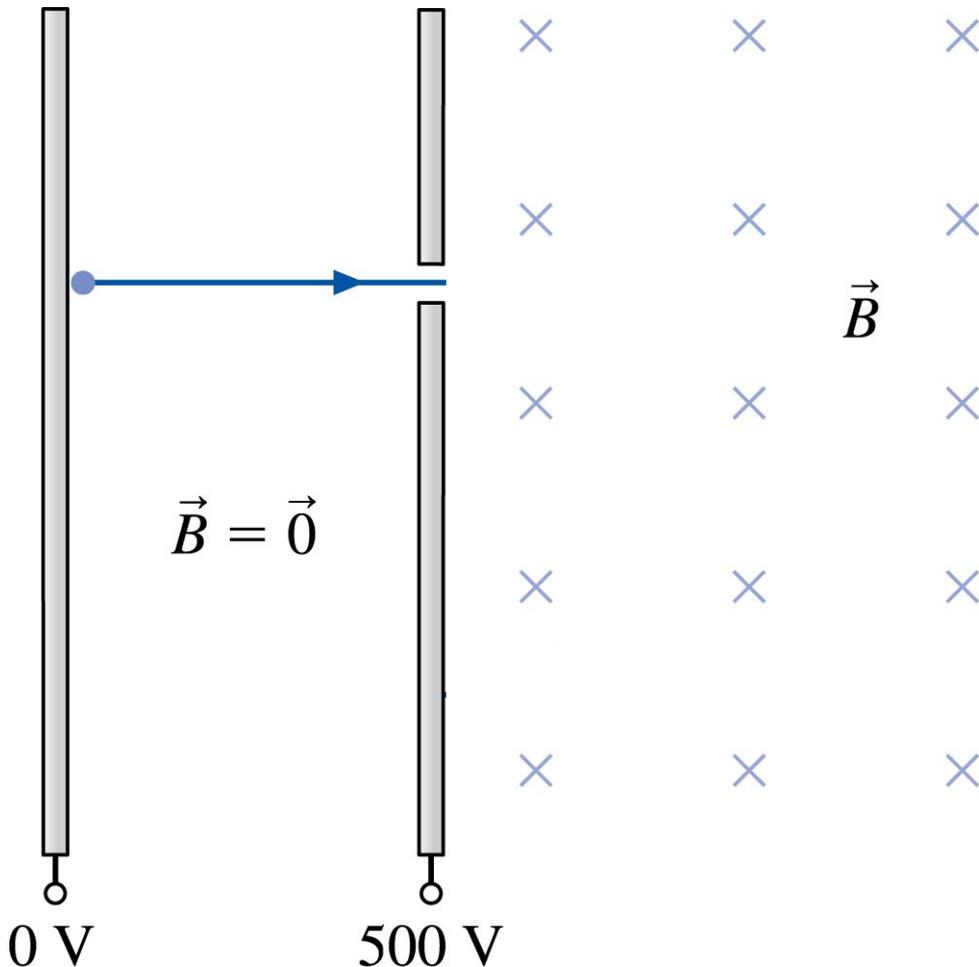


- A) \rightarrow B) \leftarrow C) \uparrow D) \downarrow E) \odot F) \otimes



● O espectrômetro de massa

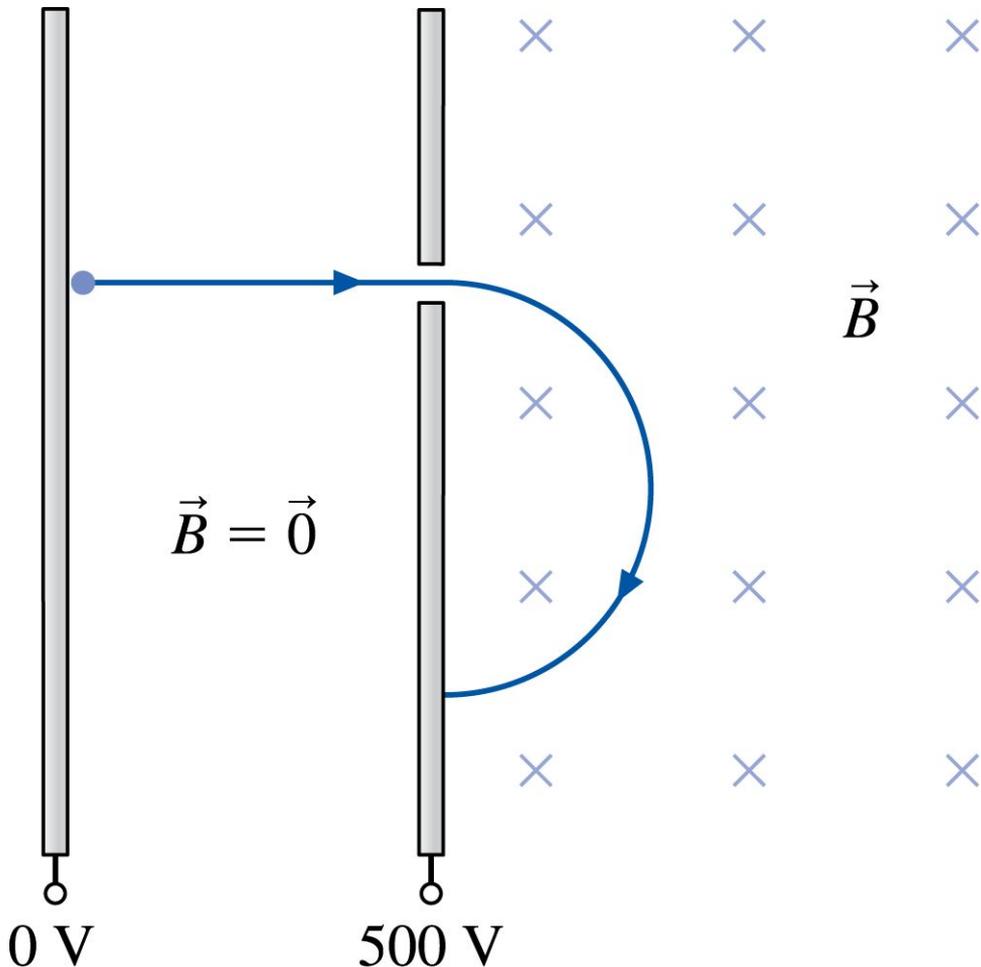
Antes de vermos o que é o espectrômetro de massa, responda o que acontece com a partícula (positiva) em questão depois que ela escapa do capacitor.





● O espectrômetro de massa

Antes de vermos o que é o espectrômetro de massa, responda o que acontece com a partícula (positiva) em questão depois que ela escapa do capacitor.



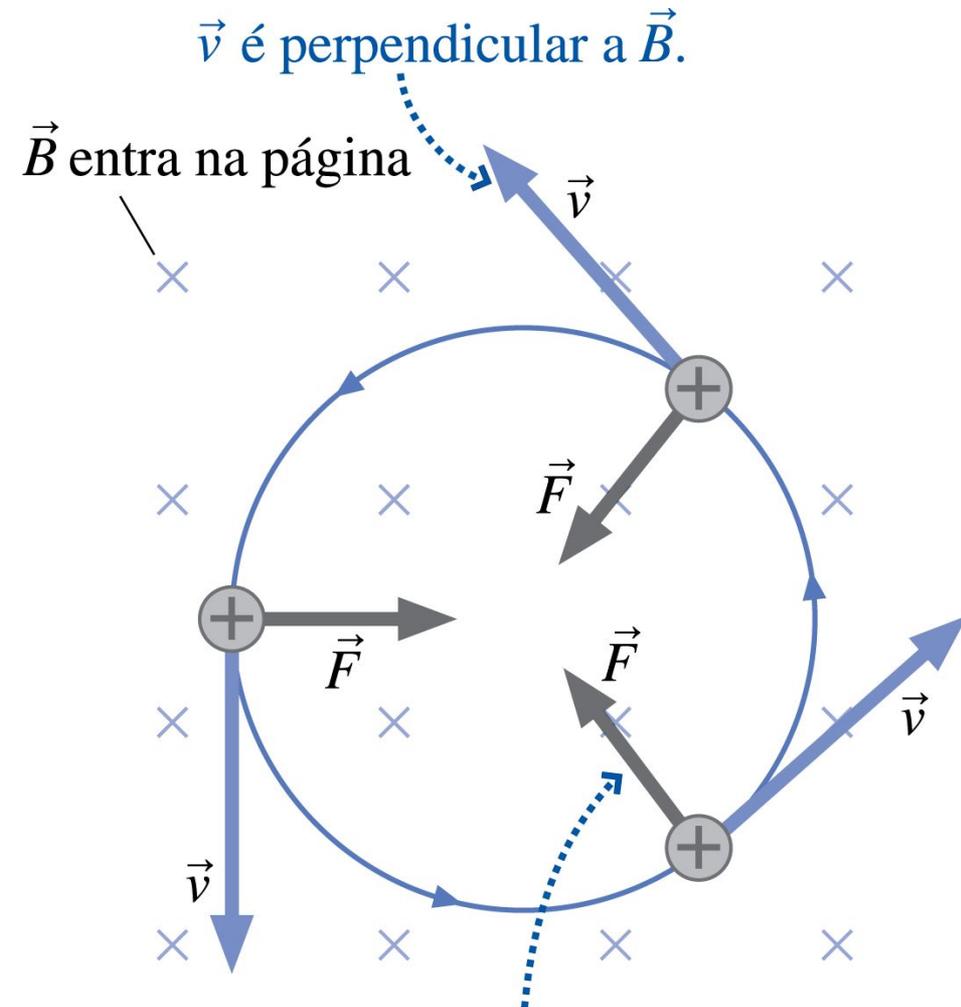


● O espectrômetro de massa Movimento ciclotron

$$\rightarrow r_{ciclo} = \frac{mv}{qB}$$

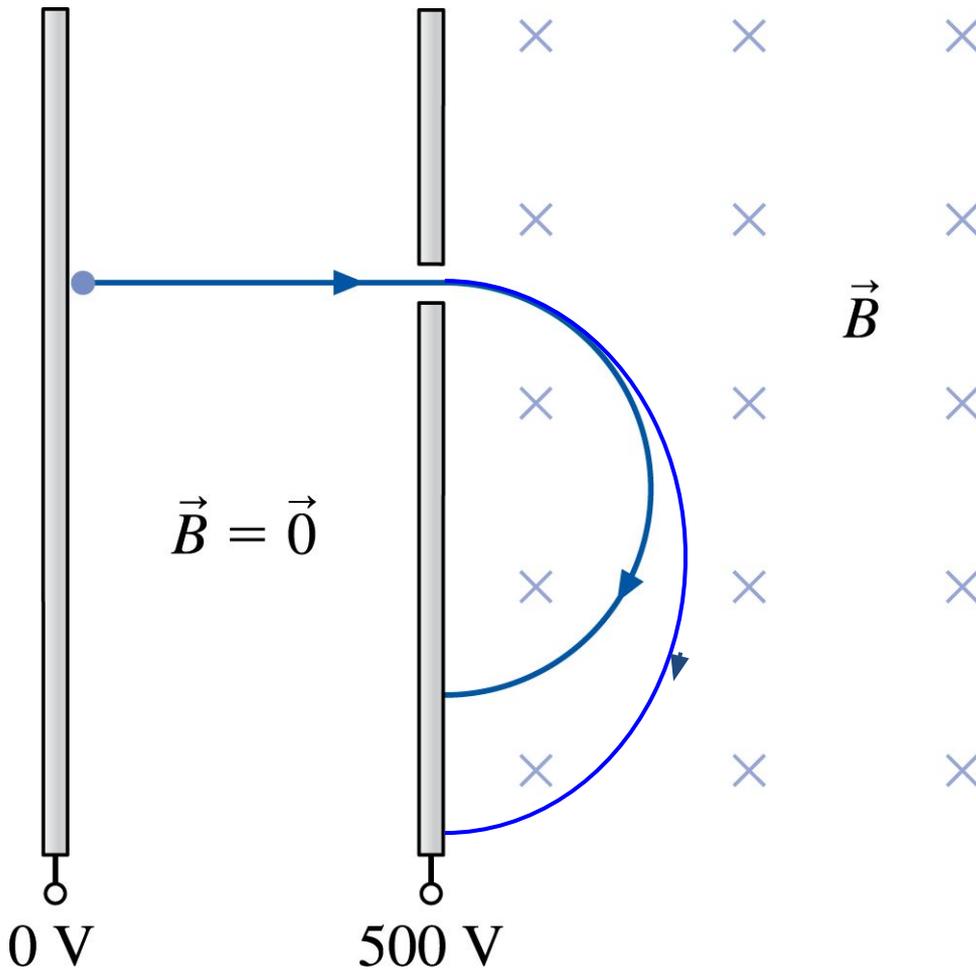
$$\rightarrow f_{ciclo} = \frac{q}{m} \frac{B}{2\pi}$$

(Não depende da velocidade!!)



A força magnética é sempre perpendicular a \vec{v} , fazendo com que a partícula se mova em um círculo.

● O espectrômetro de massa



Análise de isóbaros e isótopos

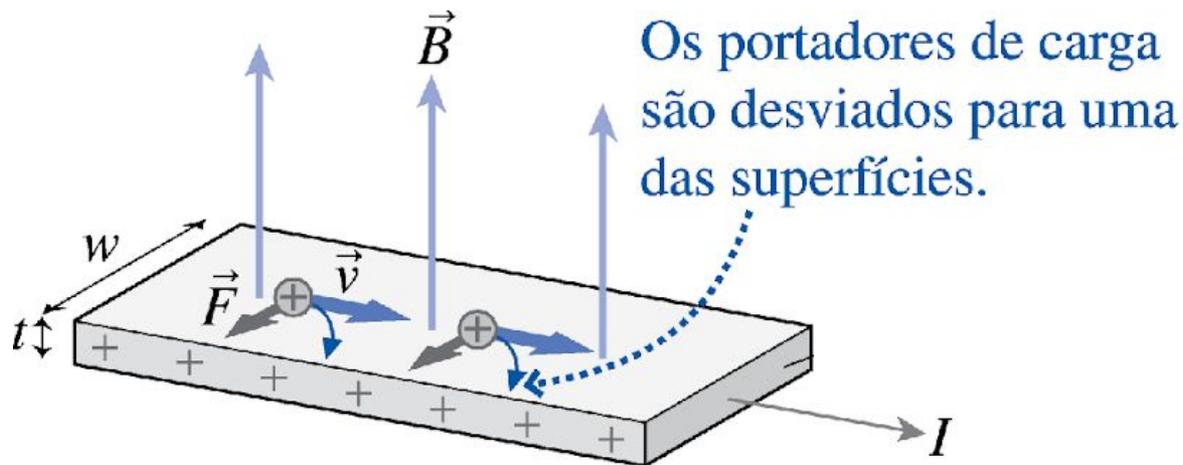
$$r_{\text{ciclo}} = \frac{m_x}{q_x} \frac{v}{B}$$



● O Efeito Hall

Cargas de um condutor que conduz corrente elétrica também são defletidas lateralmente por um campo B .

Considerando os portadores de carga (partículas móveis) como sendo partículas positivas



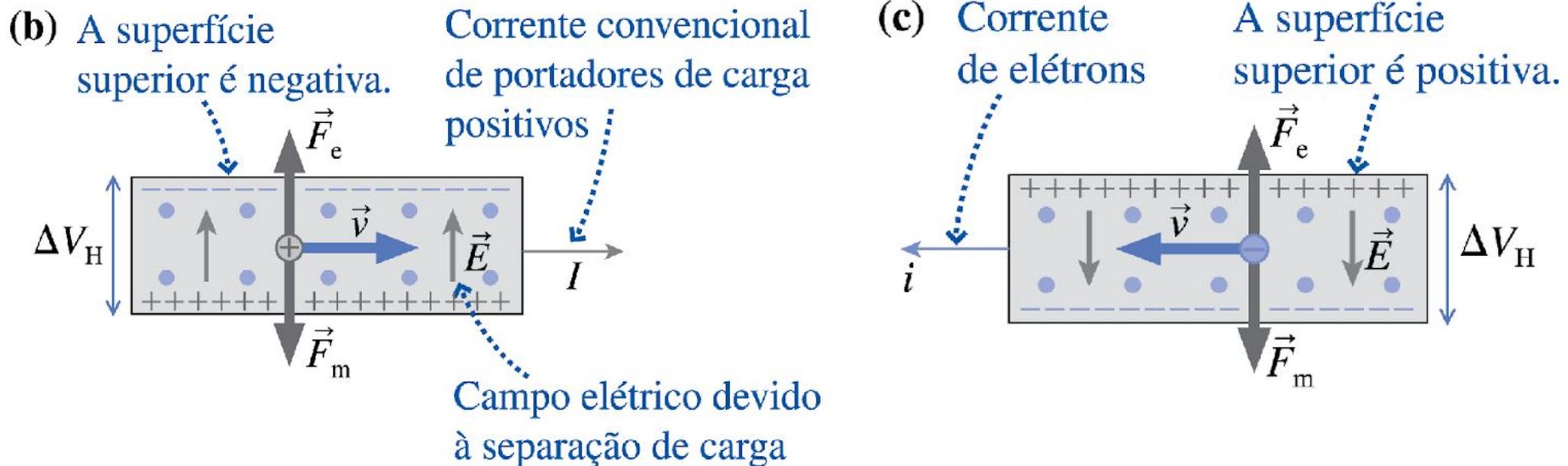


● O Efeito Hall

Cargas de um condutor que conduz corrente elétrica também são defletidas lateralmente por um campo B .

Em (b) os portadores da carga são positivos.

Em (c) os portadores da carga são negativos (Elétrons).

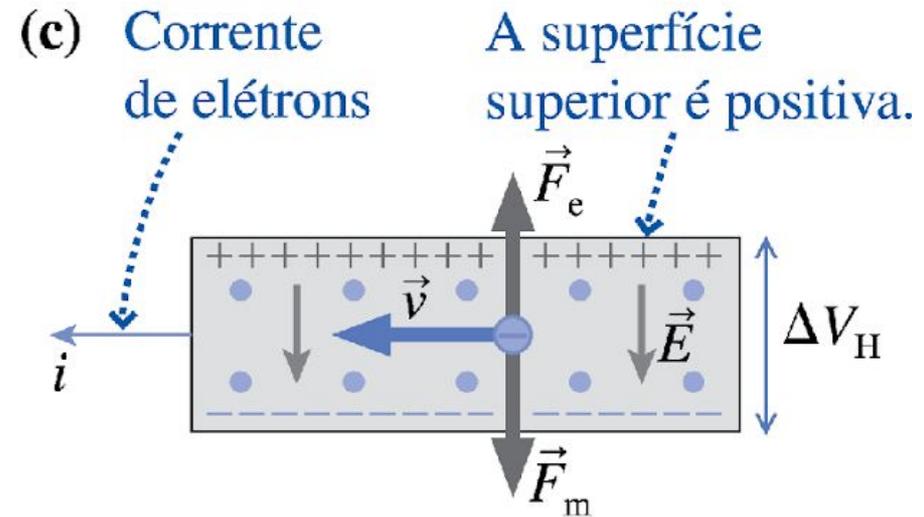
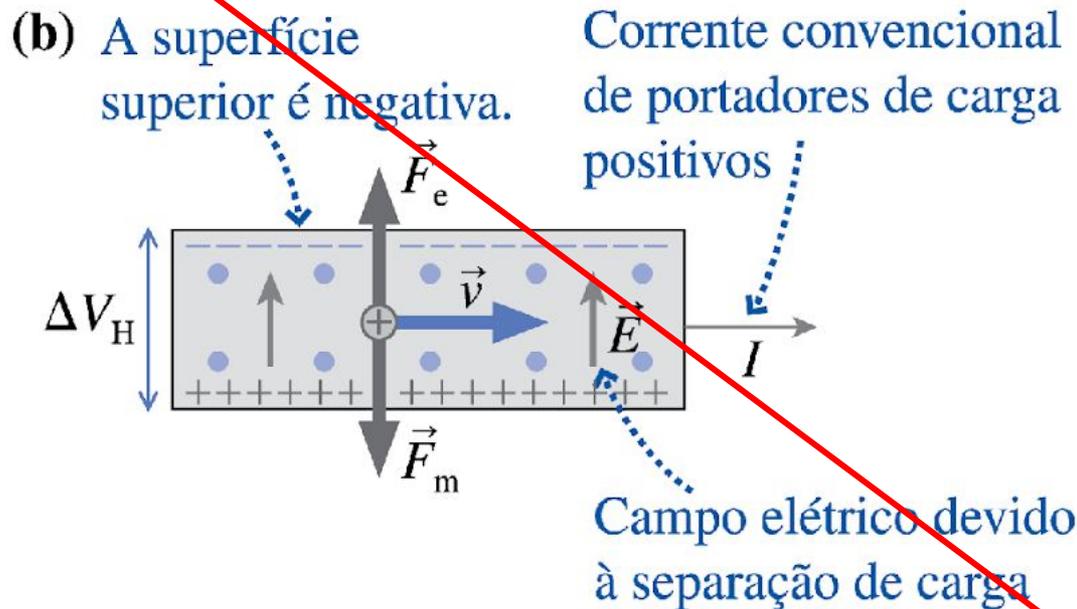




● O Efeito Hall

Cargas de um condutor que conduz corrente elétrica também são defletidas lateralmente por um campo B.

Experimentalmente se constata que $\Delta V_{\text{Hall}} = V_{\text{acima}} - V_{\text{abaixo}} > 0$.

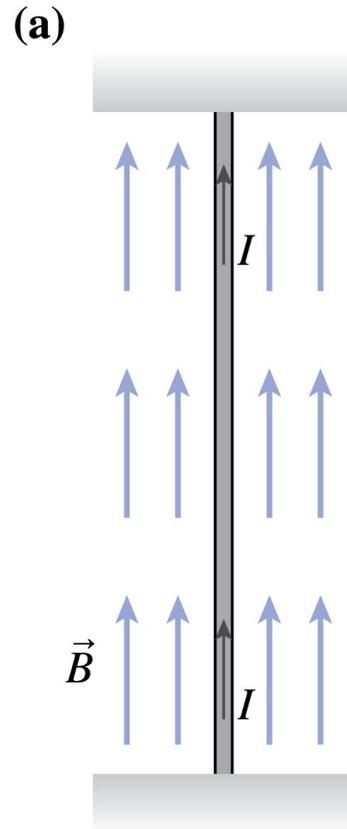


$$\Delta H_H = \frac{IB}{ntq}$$

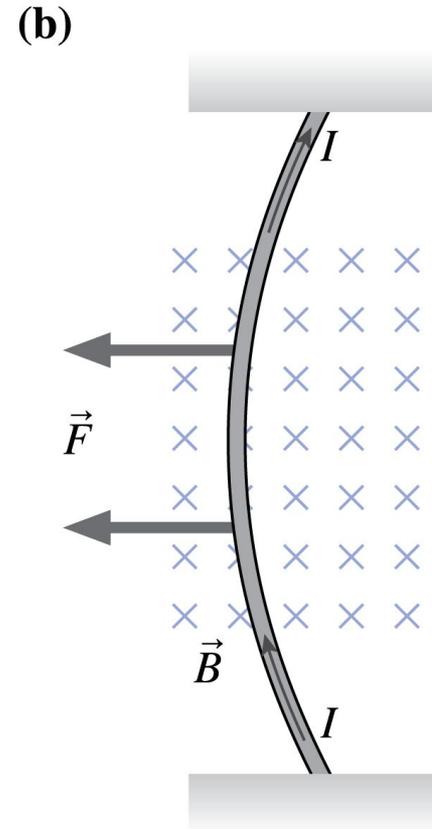


● Forças magnéticas sobre fios condutores

Do experimento de Ampère:



Não existe força sobre uma corrente paralela ao campo magnético.

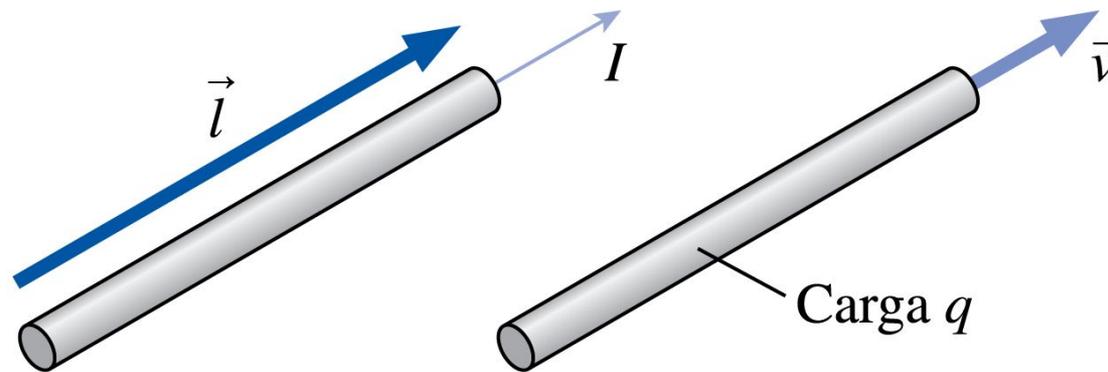


Uma corrente perpendicular ao campo experimenta uma força com a orientação dada pela regra da mão direita.



● Forças magnéticas sobre fios condutores

Para entendermos como a força atua em um fio que transporta corrente elétrica, considere a relação entre I e q ...



Uma corrente é formada por portadores de carga q que se movem com velocidade \vec{v} .

$$I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{q}{\frac{l}{v_d}} \Rightarrow Il = qv_d$$

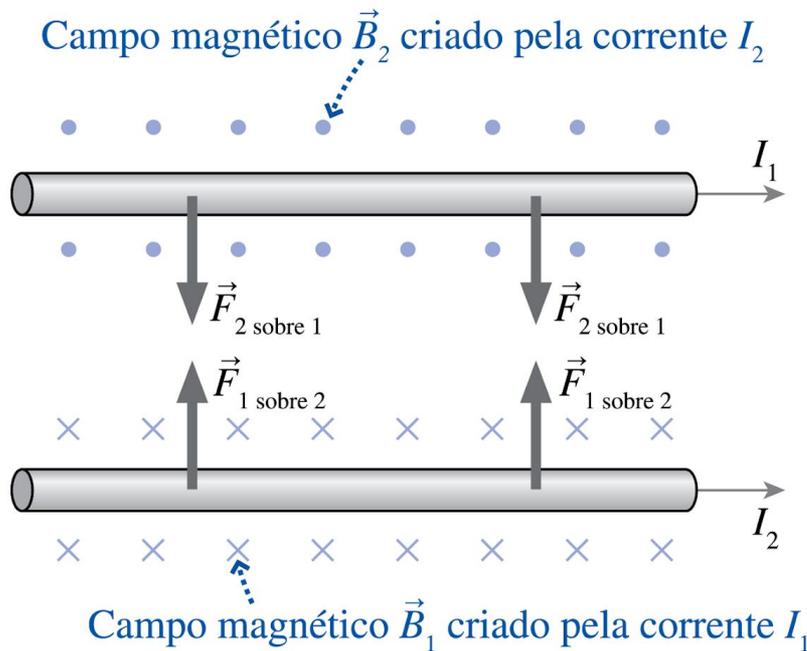
$$\Rightarrow \vec{F}_{mag} = q\vec{v}_d \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F}_{mag} = I\vec{l} \times \vec{B}$$



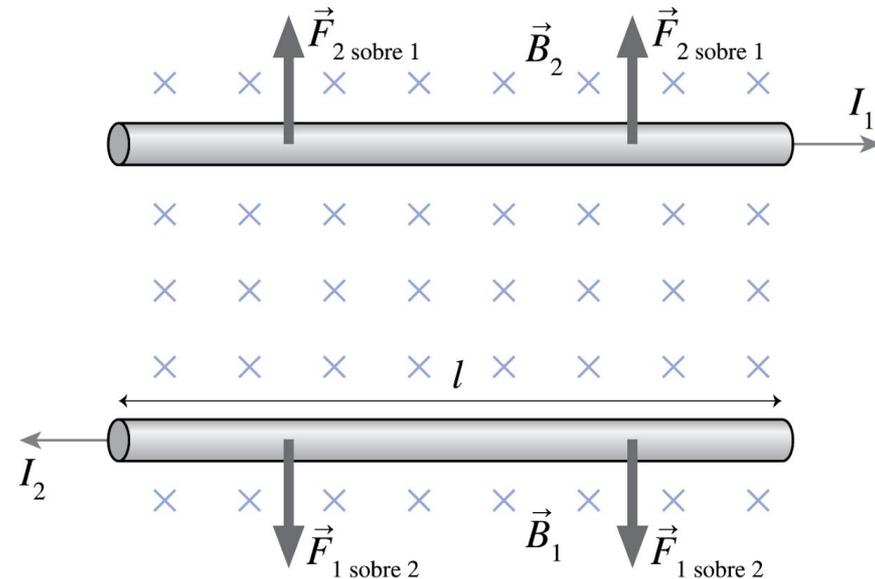
● Forças magnéticas sobre fios condutores

Assim, descrevemos o experimento de Ampère

(a) Correntes no mesmo sentido



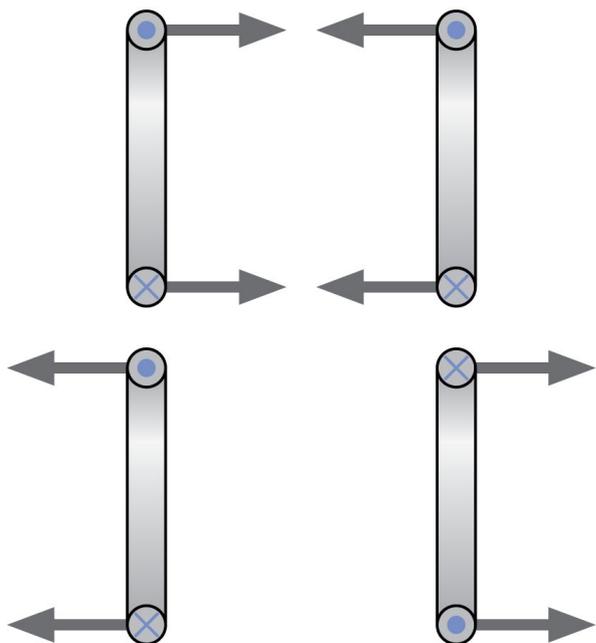
(b) Correntes em sentidos opostos



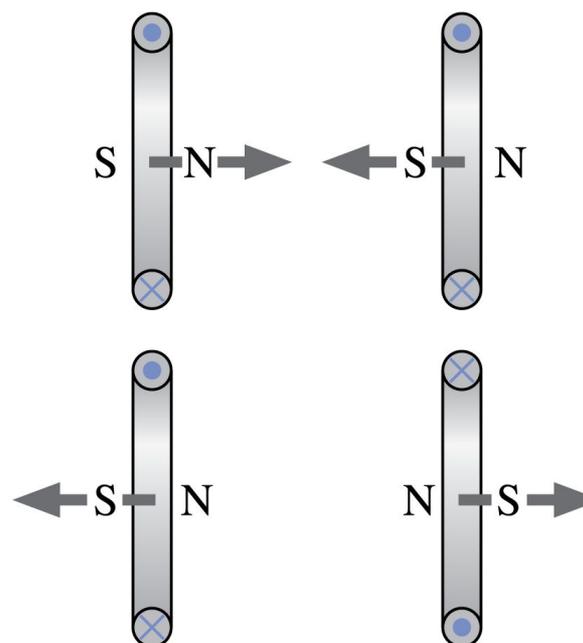
$$\alpha_{\text{entre } \vec{l} \text{ e } \vec{B}} = 90^\circ \Rightarrow F_{\text{mag}} = I_1 l B_2 = I_1 l \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} = \frac{\mu_0 l I_1 I_2}{2\pi d}$$

● Forças magnéticas e torques sobre espiras Seguindo a analogia entre espiras e ímãs...

(a) Correntes paralelas se atraem,
correntes antiparalelas se repelem.



(b) Pólos opostos se atraem,
pólos iguais se repelem.

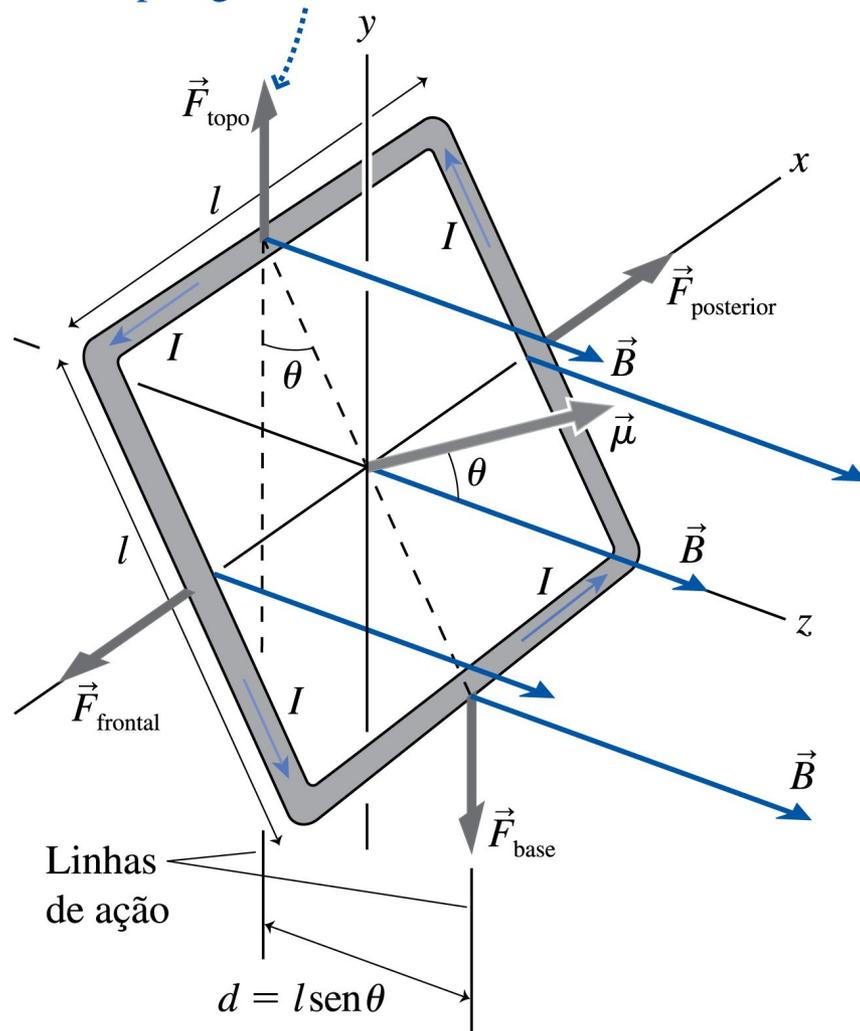


Os pólos magnéticos se atraem ou se repelem devido ao movimento de cargas em correntes, que exercem forças magnéticas atrativas e repulsivas sobre as cargas em movimento de outra corrente.



● Forças magnéticas e torques sobre espiras

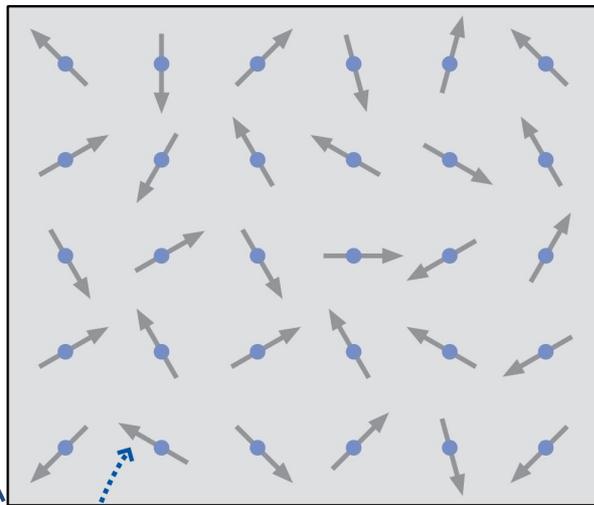
\vec{F}_{topo} e \vec{F}_{base} exercem um torque que faz a espira girar em torno do eixo x .



$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

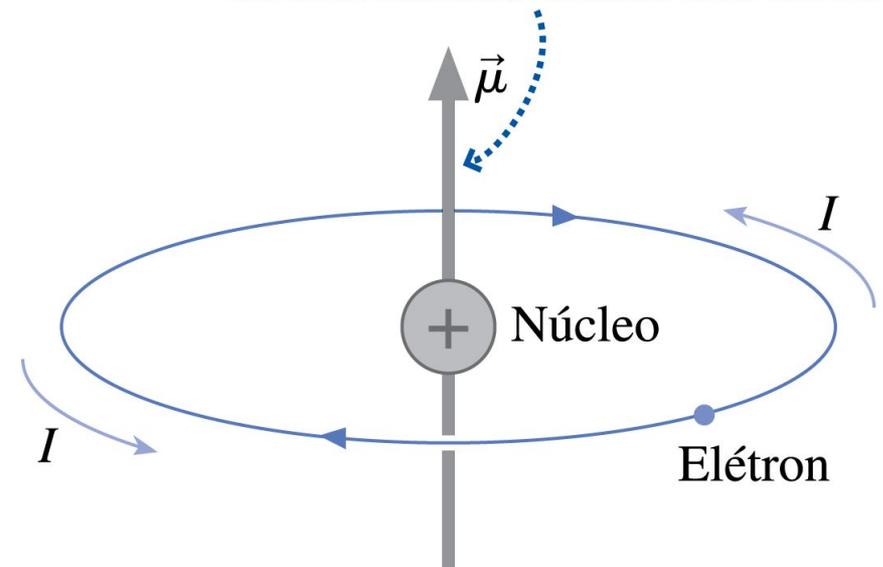
O torque é nulo qdo o momento de dipolo magnético é paralelo (antiparalelo) ao campo magnético.

● Propriedades magnéticas da matéria



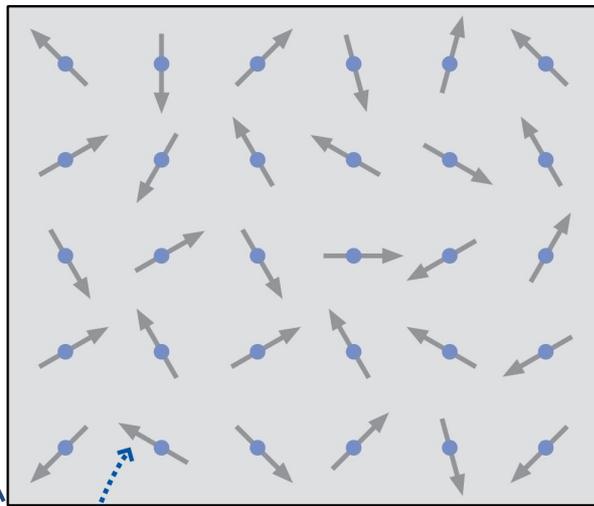
A amostra não possui momento magnético resultante.

O momento magnético deve-se ao movimento orbital dos elétrons



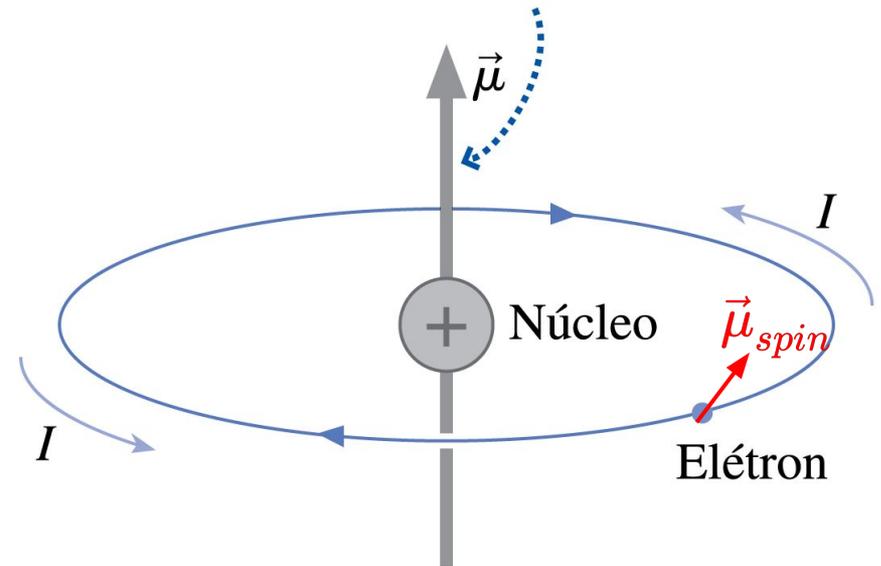


● Propriedades magnéticas da matéria



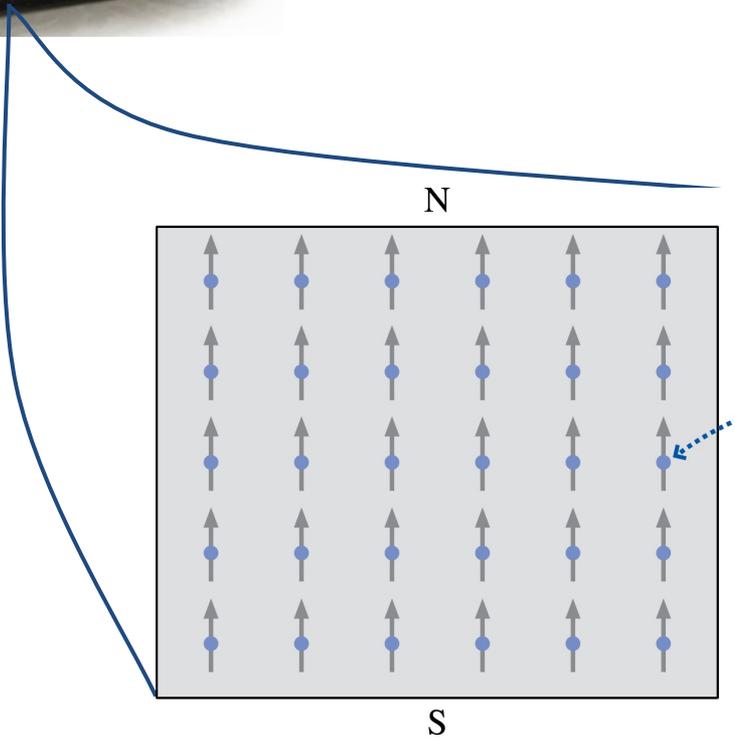
A amostra não possui momento magnético resultante.

O momento magnético deve-se ao movimento orbital dos elétrons



Além disso, os elétrons possuem **momento magnético de spin**, que também participa da magnetização da substância.

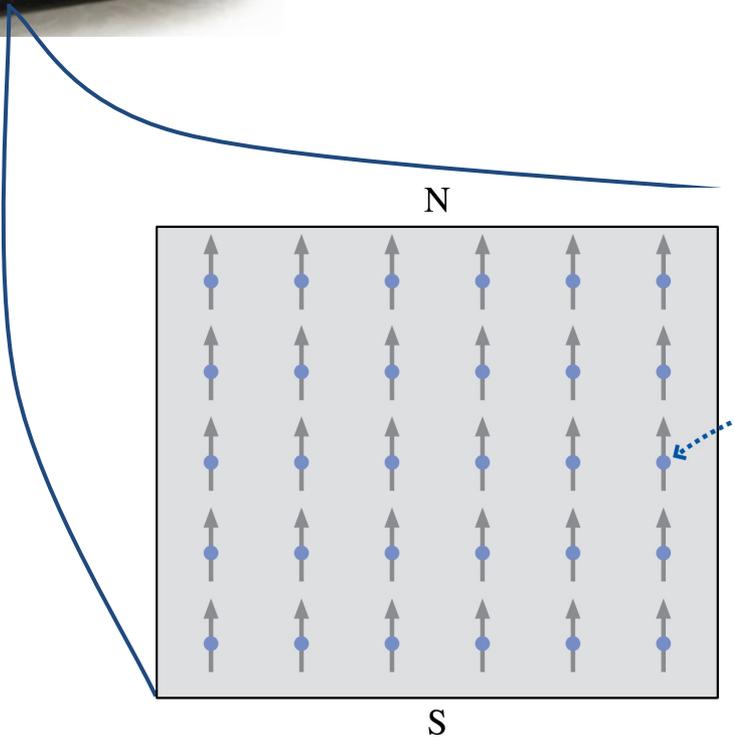
● Propriedades magnéticas da matéria Ferromagnetismo



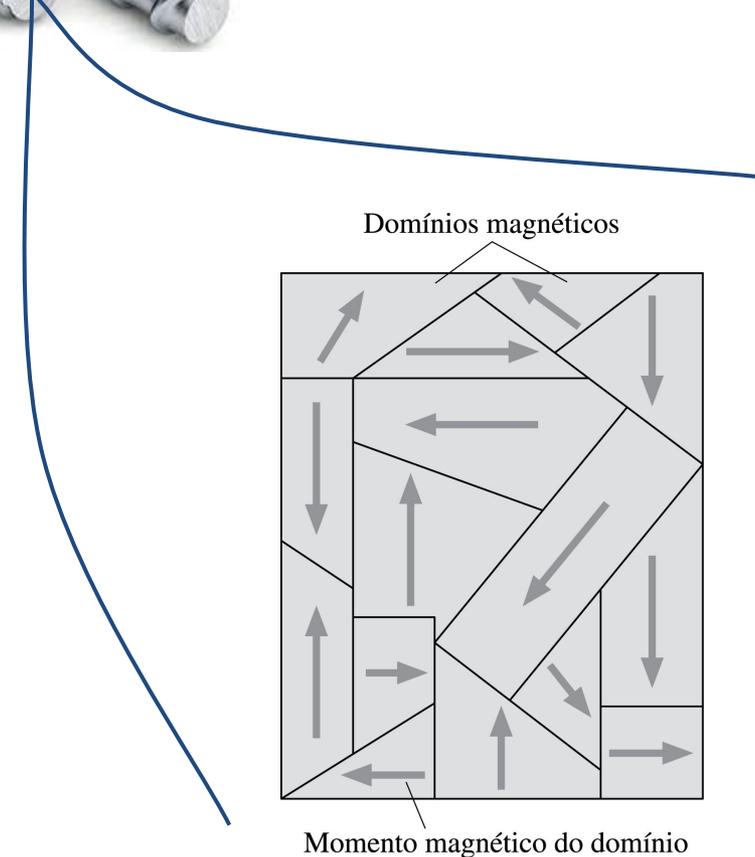
A amostra possui momento magnético resultante e, conseqüentemente, pólos Norte e Sul.

● Propriedades magnéticas da matéria

Ferromagnetismo



A amostra possui momento magnético resultante e, conseqüentemente, pólos Norte e Sul.

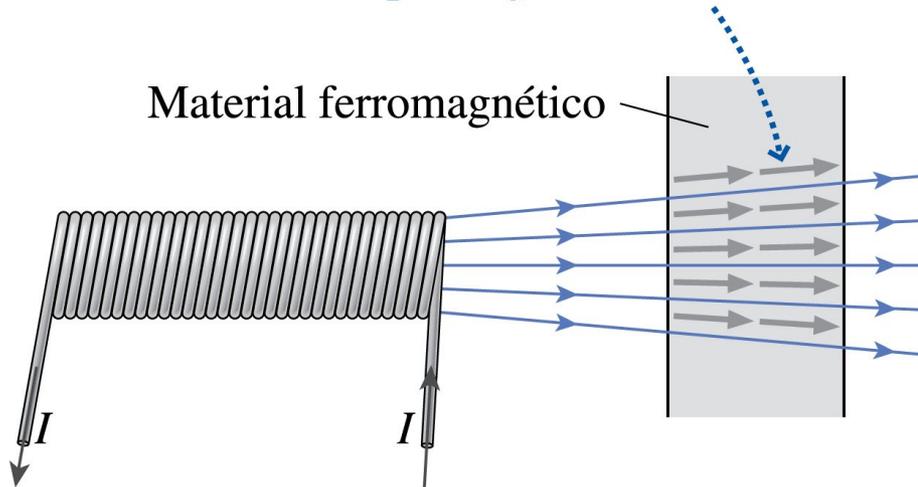




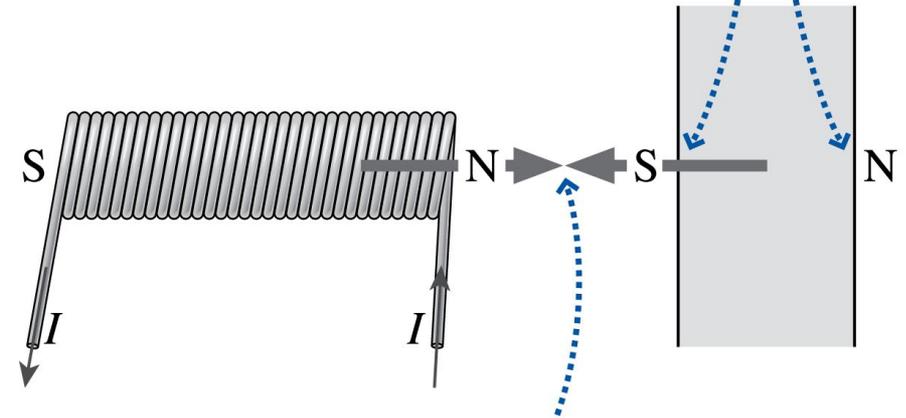
● Propriedades magnéticas da matéria

Dipolos magnéticos induzidos

Os domínios magnéticos se alinham com o campo magnético do solenóide.



O dipolo magnético induzido tem um pólo norte e um pólo sul magnéticos.



A força atrativa entre os pólos opostos atrai o material ferromagnético em direção ao solenóide.

Por que ímãs atraem objetos ferromagnéticos?

● Propriedades magnéticas da matéria

Por que ímãs atraem objetos ferromagnéticos?

- elétrons do material têm spin: momento de dipolo magnético
- um material ferromagnético (com spins alinhados) está estruturado em domínios magnéticos
- Os domínios individuais se alinham com o campo magnético externo o que produz um dipolo magnético induzido na substância.

