



Campo Magnético

Introdução

Na aula passada, falamos sobre o movimento das cargas elétricas em meios condutores e definimos o conceito de corrente elétrica. Vimos que a passagem de corrente elétrica por um condutor (ou componentes) envolve uma **conversão de energia elétrica em energia térmica**, devido à interação entre elétrons e os átomos dos materiais. Esse efeito, denominado Efeito Joule, é utilizado em diversas aplicações como chuveiro, ferro de passar, lâmpadas de filamento e aquecedores elétricos em geral.

No entanto, outras aplicações como ventiladores, liquidificadores, máquinas de lavar e motores elétricos em geral, dependem de uma **conversão de energia elétrica em movimento (energia mecânica)**. Os conceitos de eletricidade trabalhados até o momento ainda não são suficientes para a compreensão desse processo. Para isso, precisaremos incluir os conceitos do **Magnetismo**.

Os imãs em sua geladeira, o campo magnético da Terra, uma máquina de ressonância magnética, travas magnéticas e o funcionamento de motores elétricos são alguns exemplos relacionados ao magnetismo.

Quando se fala em magnetismo, uma das primeiras coisas que nos vem à cabeça são os imãs. Estes imãs, denominados **imãs permanentes**, são feitos de um material que apresenta uma propriedade magnética, a todo imã é associado um **campo magnético**.

Mas nossos estudos vão além dos ímãs permanentes. Sabe-se que, quando uma corrente elétrica percorre um condutor, surge na região ao redor do condutor um campo magnético. Este campo resultante do movimento de cargas elétricas em um condutor (corrente elétrica) tem grande importância nas aplicações práticas e será o foco dos nossos estudos.

Nesta aula, serão apresentados conceitos fundamentais, como a definição de **Campo Magnético**. Analisaremos as interações entre cargas elétricas e campos magnéticos para compreender a **força magnética sobre partículas carregadas e fios condutores** com corrente elétrica. Utilizaremos esses conceitos para entender o **funcionamento de um motor elétrico de corrente contínua**.

Na sequência, serão introduzidas e discutidas as leis fundamentais do magnetismo como a **Lei de Biot-Savart**. Essas leis fornecem importantes relações sobre o campo magnético e a corrente elétrica em condutores. E por fim, falaremos sobre as **propriedades magnéticas dos materiais**, onde veremos porque determinados materiais “são magnéticos” e outros não.

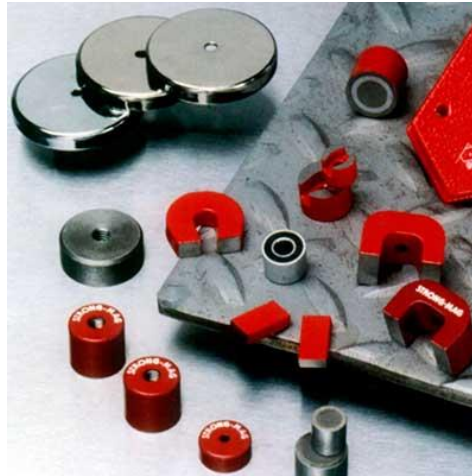
Campo Magnético

Você provavelmente já brincou com ímãs e verificou que eles exercem forças (magnéticas) de atração ou de repulsão, dependendo da posição em que são aproximados. Estas são forças de longo alcance, ou seja, atuam mesmo que os ímãs estejam separados por uma certa distância e estão associadas ao **campo magnético** dos ímãs.

A magnetita (mineral composto de óxido de ferro – veja a imagem ao lado) e algumas ligas metálicas como a *ferrite* e as ligas de *terras-raras*, manifestam suas propriedades magnéticas em seu estado natural e constituem os denominados *ímãs permanentes*.

Estes ímãs têm formatos variados (barras, ferraduras, discos, etc), **mas todos eles possuem duas regiões distintas** denominadas de **polos magnéticos**. Por convenção, definimos um dos polos do ímã como norte e o outro como sul. Assim como as cargas elétricas, **polos de mesmo tipos se repelem e de tipos diferentes se atraem.**

Figura 1 – Ímãs permanentes em diversos formatos



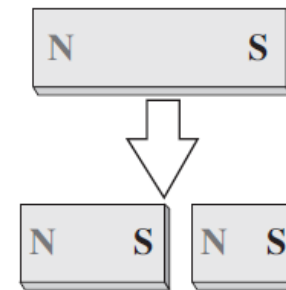
Outro fato já conhecido é que ambos os polos de um ímã exercem **atração** sobre determinados tipos de materiais denominados **ferromagnéticos** (ferro, cobalto, níquel, etc.).

Objetos feitos de materiais **ferromagnéticos** podem se tornar ímãs temporários se forem submetidos a um processo de **imantação**. Por exemplo, a agulha de uma bússola ou a ponta de uma ferramenta como uma chave de fenda.

Uma das principais diferenças do magnetismo em relação a eletricidade é a não existência de um polo magnético isolado. **Um ímã sempre apresenta dois polos diferentes (norte e sul) sendo impossível (até o momento) separá-los.** Nesse caso ao quebrarmos um ímã ao meio temos a formação de dois novos ímãs com seus respectivos polos norte e sul e não dois polos isolados, conforme mostra a animação a seguir:

Figura 2 – Ímãs permanentes em diversos formatos

Quebrar um ímã em duas partes...

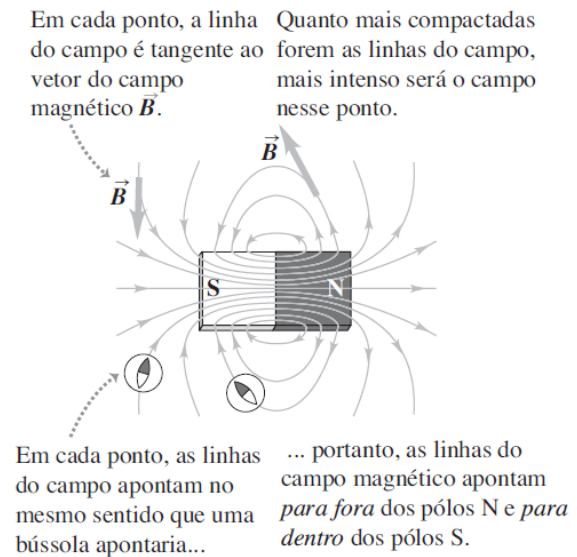


... produz dois ímãs,
não dois pólos isolados.

Fonte: Sears e Zemansky.

Para descrever a perturbação que um ímã causa no espaço ao seu redor, é utilizado o conceito de **campo magnético**. Essa grandeza física também é **vetorial**, assim como o campo elétrico, de modo que cada ponto do espaço está associado a um determinado **vetor campo magnético \vec{B}** . Nesse caso, podemos utilizar as linhas de campo para auxiliar na visualização do campo magnético. O **vetor campo magnético \vec{B} é sempre tangente a cada ponto de uma linha de campo.**

Figura 3 – Representação das linhas de campo magnético em um ímã permanente em forma de barra



Fonte: Sears e Zemansky.

Embora utilizemos o conceito de campo tanto para a eletricidade quanto para o magnetismo, este último apresenta algumas peculiaridades.

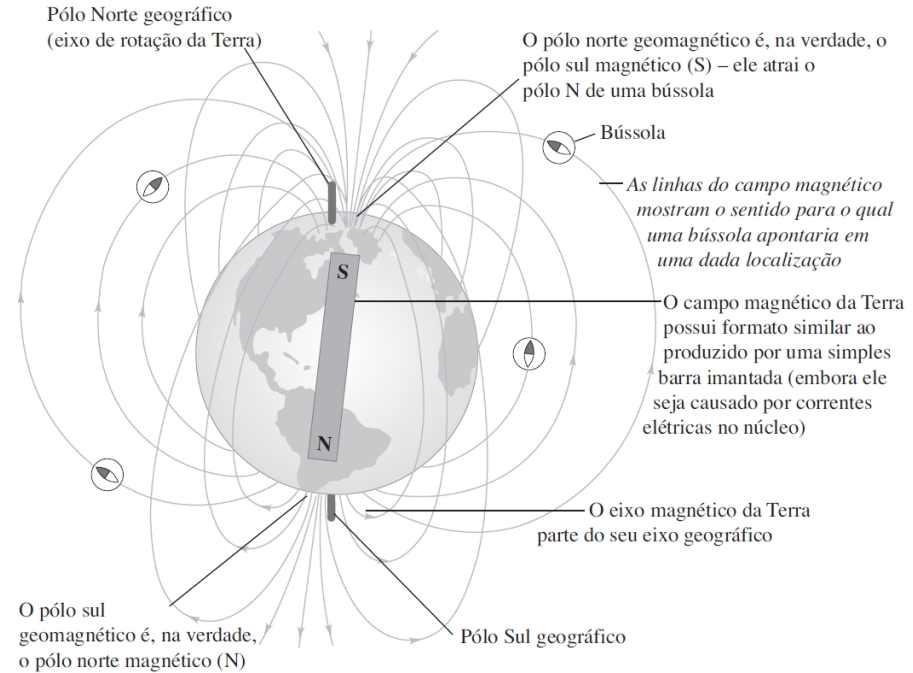
É comum dizer que as linhas de campo magnético **saem do polo norte e entram no polo sul**. Mas a experiência nos mostra que, no caso magnético, essas linhas passam pelo **interior do imã** no sentido **do polo sul para o polo norte**, formando linhas fechadas (contínuas). No interior de um imã, há uma maior densidade de linhas de campo magnético (elas estão mais juntas) indicando que o campo naquela região é mais intenso.

Para detectar a presença de um campo **elétrico** num determinado ponto do espaço gerado por uma determinada carga Q , utilizávamos uma carga de teste q_0 e analisávamos a força de interação entre as cargas.

No caso do campo magnético, não existe um polo de teste, então utiliza-se um ímã de teste. Quando um pequeno **ímã** é colocado sobre a influência de um **campo magnético externo**, atuam sobre ele forças de módulos iguais, mas de sentidos opostos. Todo ímã nessas condições **tende a girar e se alinhar ao campo**. Deste modo, um pequeno ímã colocado em vários pontos ao redor de uma fonte de campo magnético nos fornece a direção e sentido do campo em cada ponto. Conhecendo essas orientações, são traçadas as linhas de campo.

Esse é o princípio de funcionamento de uma bússola. A Terra funciona como um grande ímã, no qual o **polo sul magnético** equivale aproximadamente à posição do **polo norte geográfico**. Uma agulha imantada tenderá sempre a se alinhar com o campo magnético da Terra. Nesse caso, o polo norte da bússola se alinha com o polo sul (magnético) da Terra que é, na verdade, o **polo norte geográfico**.

Figura 4– Campo magnético da Terra



Fonte: Sears e Zemansky.

Acesse a simulação, clicando no *link* a seguir, e analise a configuração do campo magnético gerado por um ímã. Arraste a bússola e observe como ela se comporta. Por fim, clique em mostrar campo magnético da Terra e faça alguns testes.

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/magnet-and-compass

Vamos entender melhor o campo magnético? Então, não deixe de conferir as explicações do professor Fábio, no vídeo que está disponível no material *on-line*.

Força Magnética

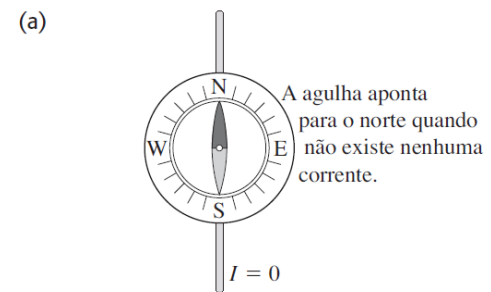
Força magnética sobre cargas elétricas e fios condutores de corrente elétrica

Todas essas informações a respeito do magnetismo durante muito tempo ficaram restritas aos estudos dos ímãs permanentes. No entanto, em 1819, o cientista Hans Christian Oersted percebeu que o magnetismo também estava presente em outras situações.

Ele verificou que a passagem de corrente elétrica por um determinado fio causava alterações em uma bússola próxima ao fio. E, após um estudo mais aprofundado, percebeu que um **campo magnético era gerado a partir do movimento das cargas elétricas.**

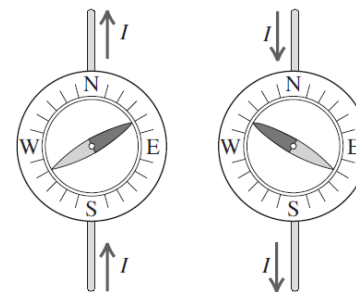
Figura 5 – Experimento de Oersted e a relação entre corrente elétrica e o Campo magnético

Fonte: Sears e Zemansky



(b)

A agulha oscila quando existe uma corrente.
O sentido da oscilação depende do sentido da corrente.



Apesar de parecer uma coisa simples, essa descoberta foi o início de uma grande revolução científica e tecnológica. Ela possibilitou uma compreensão mais aprofundada a respeito do magnetismo e a formulação de importantes relações matemáticas. Essas relações, além de definirem o conceito de campo magnético, mostram a sua relação com os conceitos da eletricidade. Isso resultou na unificação das duas áreas do conhecimento, hoje denominadas **eletromagnetismo**.

Baseando-se nesses estudos, outros cientistas, como Michel Faraday, na Inglaterra, e Joseph Henry, nos Estados Unidos, descobriram que era possível converter energia mecânica (movimento) em energia elétrica, o que culminou no nosso processo atual de "geração" de energia elétrica. Também partindo destes conceitos fundamentais, foram criados os primeiros motores elétricos, dentre outras aplicações.

O estudo do magnetismo e sua relação com as cargas elétricas está baseada nos seguintes princípios:

- **Uma carga móvel ou corrente elétrica cria um campo magnético em suas vizinhanças (além do campo elétrico);**
- **O campo magnético exerce uma força \vec{F} sobre qualquer outra carga ou corrente que se mova no interior do campo magnético.**

Inicialmente, vamos analisar a Força magnética sobre cargas elétricas em movimento. Quando uma partícula se move estando sob a influência de um campo magnético externo, este campo realizará uma força sobre essa carga. Essa força é diretamente proporcional à intensidade do campo magnético \vec{B} , a carga da partícula q em movimento e a velocidade \vec{v} em que a partícula se movimenta em relação a um dado ponto de referência.

Num determinado ponto, o **módulo da força magnética** que atua sobre uma carga em movimento é dado por:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen}\phi \quad (1)$$

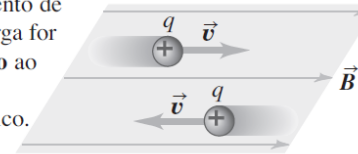
Onde ϕ é ângulo entre a velocidade e o campo magnético. Vale notar que só há força sobre uma carga elétrica nessa situação se ela estiver em movimento ($v \neq 0$). A força magnética é sempre perpendicular ao plano formado entre a velocidade e o campo magnético.

Figura 6 – Força magnética atuando sobre uma partícula com carga elétrica em movimento sob influência de um campo magnético externo

Fonte: Sears e Zemansky

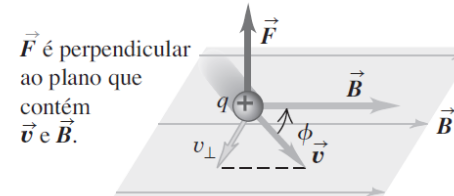
(a)

A força magnética será igual a zero quando o movimento de uma carga for **paralelo** ao campo magnético.



(b)

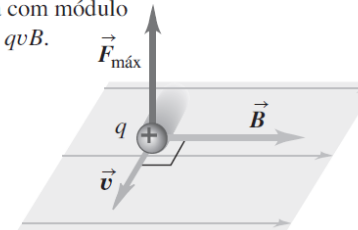
Quando o movimento de uma carga forma um ângulo ϕ com o campo magnético, a carga sofre uma força magnética com módulo $F = |q|v_{\perp}B = |q|vB \sin \phi$.



(c)

Quando o movimento da carga for **perpendicular** ao campo magnético, a carga sofrerá uma força magnética máxima com módulo

$$F_{\text{máx}} = qvB.$$



Quando o ângulo entre a velocidade \vec{v} e o campo magnético \vec{B} for igual a 90° , a intensidade da Força magnética que atuará sobre a partícula carregada F será máxima:

$$F = q.v.B \quad (2)$$

Quando o ângulo entre a velocidade \vec{v} e o campo magnético \vec{B} for igual a 0° (mesma direção), a intensidade da Força magnética que atuará sobre a partícula carregada F será nula.

Isolando B na equação (2), podemos obter a unidade de campo magnético

$$B = \frac{F}{qv}$$

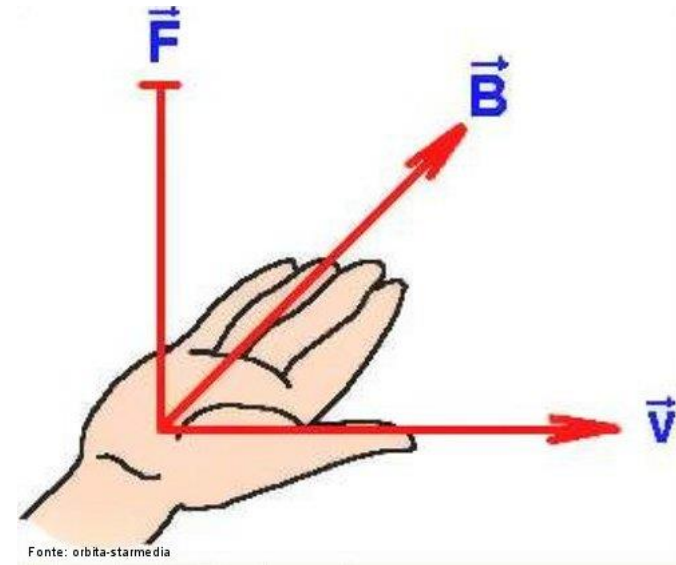
A unidade do campo magnético é N/(C.m/s) onde

$$1 \frac{N}{C \cdot m/s} = 1 T \text{ (Tesla)}$$

Assim a unidade padrão no SI do campo magnético é o **Tesla**.

Para determinar a direção e sentido do **vetor força magnética** podemos utilizar uma regra prática denominada **regra da mão direita**.

Figura 7 – Ilustração da regra prática da mão direita.



Passo 1

Para uma carga positiva:

- Desenhe os vetores \vec{v} e \vec{B} com a origem no mesmo ponto.

Passo 2

- Coloque no polegar da mão direita a direção do vetor velocidade.

Passo 3

- Aponte o dedo indicador na direção do campo magnético.

Passo 4

- A palma da sua mão direita indicará o sentido da força magnética sobre a carga elétrica em movimento.

Passo 5

- Nessa situação, o seu polegar apontará na mesma direção e sentido da força magnética sobre a carga.

Passo 6

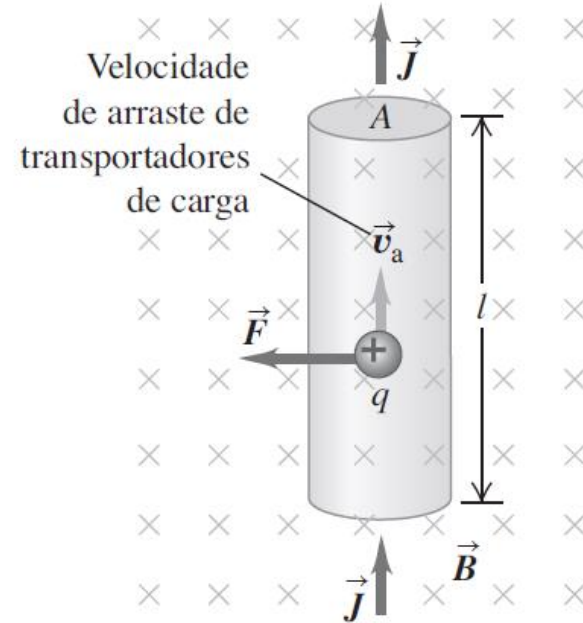
- Para uma carga negativa a direção será a mesma, mas o sentido será invertido.

Os conceitos de força magnética sobre cargas elétricas são utilizados em muitas aplicações. Microscópios eletrônicos, muito importantes na caracterização de materiais, se utilizam desses conceitos para direcionar feixes de elétrons e obter imagens em grandes magnificações. Esses conceitos também foram muito utilizados na formação de imagens nas antigas televisões e monitores de tubo.

Força sobre condutores retilíneos percorridos por correntes elétricas

Uma corrente elétrica está associada ao movimento ordenado de elétrons no interior de um condutor. Se uma carga elétrica em movimento, sob a ação de um campo magnético, estará sujeita a uma força magnética, logo, um fio percorrido por uma corrente elétrica também vai interagir com o campo magnético externo (figura 8).

Figura 8 – Força magnética atuando sobre um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica I sobre influência de um campo magnético externo



Fonte: Sears & Zemansky

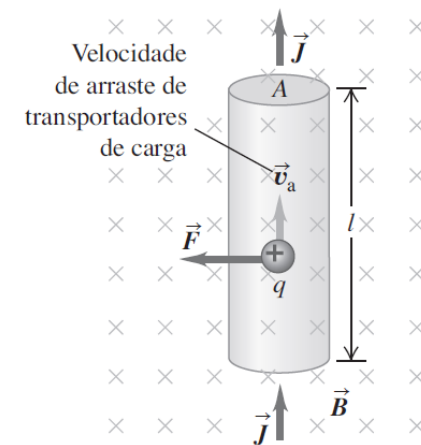
Um fio de comprimento l , percorrido por uma corrente I e submetido a um campo magnético uniforme que forma um determinado ângulo ϕ com o condutor módulo da força magnética, é dado por:

$$F = ilB\text{sen}\phi \quad (4)$$

Analisando a equação (4), vemos que, se um fio retilíneo for posicionado perpendicularmente ao campo magnético ($\phi = 90^\circ$ ou 270°), a força que atuará sobre o condutor será máxima. Caso o fio esteja perpendicular ao campo ($\phi = 0^\circ$ ou 180°), a força que atuará sobre o fio será nula.

Para nos ajudar nas representações do campo magnético, como na figura 8, utilizaremos um ponto (.) para representar um vetor saindo do plano da folha (tela) e um (x) para representar um vetor entrando no plano da folha (tela). A direção e sentido da força magnética nesse caso também são obtidas pela regra da mão direita. A única diferença é que agora o polegar deve apontar no sentido da corrente elétrica.

Figura 8 – Força magnética atuando sobre um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica I sobre influência de um campo magnético externo.



Fonte: Sears & Zemansky

No vídeo que está disponível no material *on-line*, o professor Fábio esclarece alguns pontos sobre o campo magnético gerado a partir dos movimentos das cargas elétricas. Assista e fique por dentro!

Efeito motor

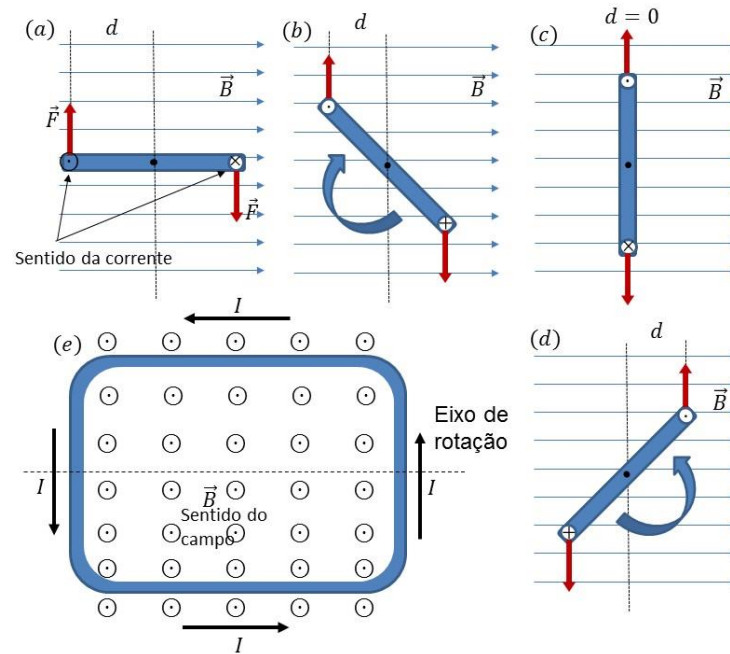
Força magnética sobre espiras condutoras percorridas por corrente elétrica

Já sabemos como uma força atua sobre um fio retilíneo, agora vamos analisar situações onde esses fios têm formas variadas.

Espiras são condutores estruturados de maneira a formar uma estrutura fechada, que pode ser um círculo, quadrado, um retângulo etc.

Essas espiras quando adequadamente posicionadas em relação a um campo magnético são submetidas a forças capazes de fazê-las girar, dando origem ao **efeito motor**. Ou seja, utilizando espiras, podemos **converter energia elétrica em movimento**, o que é a base do funcionamento de diversos equipamentos eletrônicos.

Figura 9 – Efeito motor sobre uma espira condutora, submetida a um campo B e percorrida por uma corrente elétrica I . Os fios que “injetam” a corrente na espira foram omitidos. De (a) a (d) vista lateral da espira, (e) vista frontal.



Vamos considerar uma espira retangular como a ilustrada na figura 9. Quando esta espira está paralela ao campo magnético (figura 9a), dois de seus ramos, os lados menores do retângulo de comprimento **b**, têm a mesma direção das linhas de campo magnético, por isso sobre eles não atuam forças magnéticas. Já nos ramos dos lados maiores, de comprimento **a**, a corrente elétrica é perpendicular ao campo magnético.

No lado direito (figura 9a), a corrente está no sentido de entrar no plano da imagem, logo, pela regra da mão direita, a força que atua nesse ramo será orientada para baixo. No lado esquerdo, a corrente percorre o sentido oposto, logo, a força será orientada para cima.

Essas duas forças são aplicadas a uma distância igual a $\frac{b}{2}$ e geram um torque sobre a bobina em relação ao eixo de rotação.

A força resultante sobre a espira de corrente em um campo uniforme é nula. Entretanto, o torque resultante geralmente não é nulo.

As forças sobre os ramos maiores da espira serão dadas pela equação (4) e será:

$$F = IaB$$

As forças nos ramos laterais se anularão e não geram torque.

O torque resultante será dado por

$$\tau = Fd \operatorname{sen}\phi = 2F \left(\frac{b}{2}\right) \operatorname{sen}\phi = (IBa)(b \operatorname{sen}\phi) \quad (5)$$

Como as dimensões a e b, a corrente I e o campo magnético são constantes, logo o torque depende exclusivamente da força magnética. Nas regiões onde a força é máxima sobre os condutores o torque também será.

Nesse caso a área da espira é **ab** , de forma que podemos escrever o torque como:

$$\tau = IAB\text{sen}\phi \quad (6)$$

O produto IA é denominado **momento de dipolo magnético**, ou **momento magnético** $\vec{\mu}$, e seu módulo é dado por:

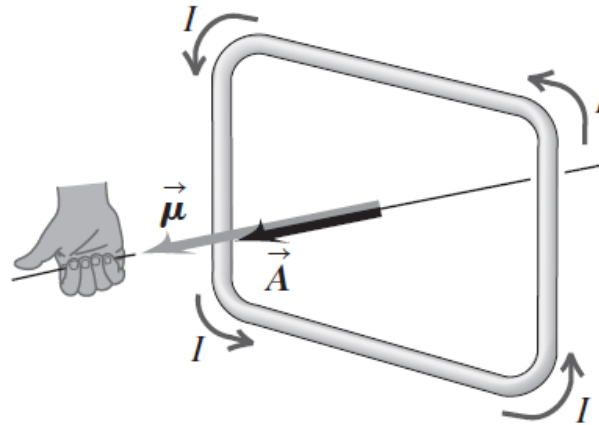
$$\mu = IA \quad (7)$$

Logo o torque pode ser escrito como

$$\tau = \mu B\text{sen}\phi \quad (8)$$

Nesse caso, ϕ compreende ao ângulo formado pela normal ao plano da espira \hat{A} e o campo magnético (figura 10).

Figura 10 – Momento de dipolo magnético gerado por uma espira percorrida por uma corrente elétrica I no sentido anti-horário



Fonte: Sears e Zemansky

Sempre que um corpo tem um momento de dipolo magnético e for submetido a um campo magnético externo, surgirá sobre este corpo um torque. Este torque tende sempre a alinhar o momento de dipolo com o campo magnético externo.

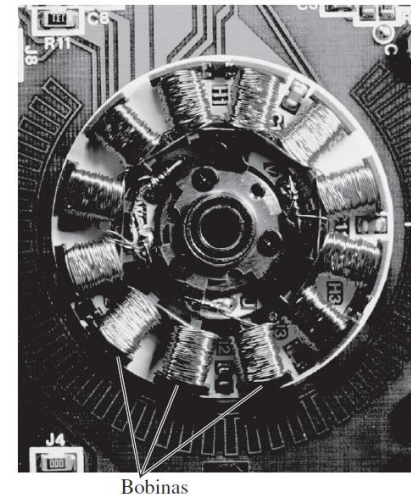
A agulha de uma bússola possui um momento magnético. Como ela está constantemente sob a influência do campo magnético da Terra, atua sobre ela um torque no sentido de alinhá-la às linhas desse campo externo.

Uma espira percorrida por uma corrente elétrica possui um momento de dipolo e também tenderá a se alinhar com um campo magnético externo, quando aplicado. Este é o ponto-chave no funcionamento dos motores elétricos.

O motor elétrico de corrente contínua

A parte móvel de um motor é denominada *rotor*, que é basicamente uma espira com liberdade para rotacionar em torno de um eixo fixo. As extremidades da espira do rotor são abertas e ligadas a dois contatos, que formam um *comutador*. Cada um dos dois segmentos do comutador entram em contato com uma *escova*. A duas escovas por sua vez estão conectadas a um circuito elétrico com uma fonte de *fem*.

Figura 11 – Exemplo de um motor de corrente contínua

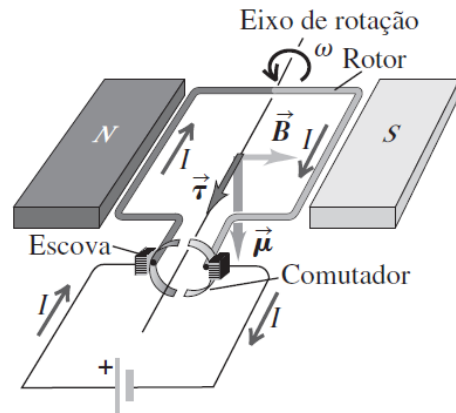


Fonte: Sears e Zemansky

Na configuração ilustrada na figura 11, a corrente elétrica entra pelo lado esquerdo e percorre a espira no sentido horário. Nesse caso, o rotor atua como uma espira de corrente com um momento de dipolo $\vec{\mu}$. O rotor está situado entre dois ímãs que produzem sobre ele um campo magnético \vec{B} , que por sua vez exerce um torque $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ sobre o rotor e o mesmo gira 90° em relação a sua posição inicial.

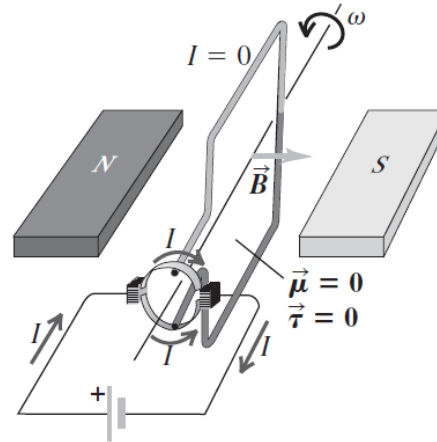
Figura 12 – Ilustração do funcionamento de um motor elétrico de corrente contínua

(a) As escovas são alinhadas sobre os segmentos do comutador.



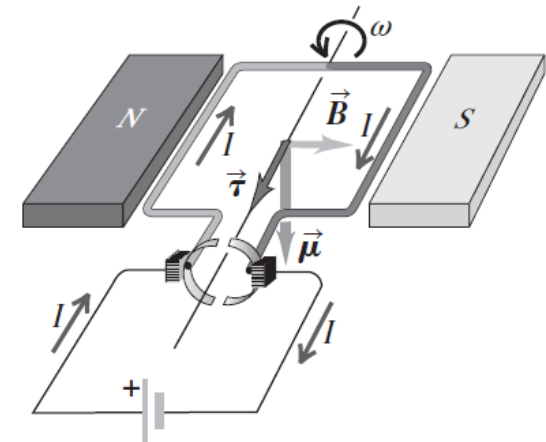
- A corrente entra pelo lado esquerdo do rotor e sai pelo lado direito.
- O torque magnético faz o rotor girar no sentido anti-horário.

(b) O rotor girou 90°.



- Cada escova está em contato com ambos os segmentos do comutador, de modo que a corrente não passa pelo rotor.
- Nenhum torque magnético atua sobre o rotor.

(c) O rotor girou 180°.



- As escovas estão novamente alinhadas aos segmentos do comutador. Dessa vez, a corrente entra pelo lado direito e sai pelo lado esquerdo.
- Logo, o torque magnético volta a atuar sobre o rotor no sentido anti-horário.

Fonte: Sears e Zemansky.

Se a corrente elétrica for mantida constante, o rotor ficaria parado nessa posição, ou no máximo oscilando em torno dessa posição de equilíbrio. Mas, quando o rotor está nessa posição, cada escova está em contato com ambos os segmentos do comutador e assim a corrente elétrica na espira será zero. Como a corrente elétrica é zero o momento de dipolo também será e o torque cessará. No entanto, a espira continua a sua rotação devido a sua inércia.

Ao sair da posição anterior, cada escova volta a ter o contato com apenas um dos comutadores e a corrente elétrica volta a circular pelo rotor e o processo se repetirá.

Esse motor simples possui apenas uma única espira em seu rotor. Em motores convencionais o número de espiras é muito maior de modo que o momento magnético e o torque também o sejam.

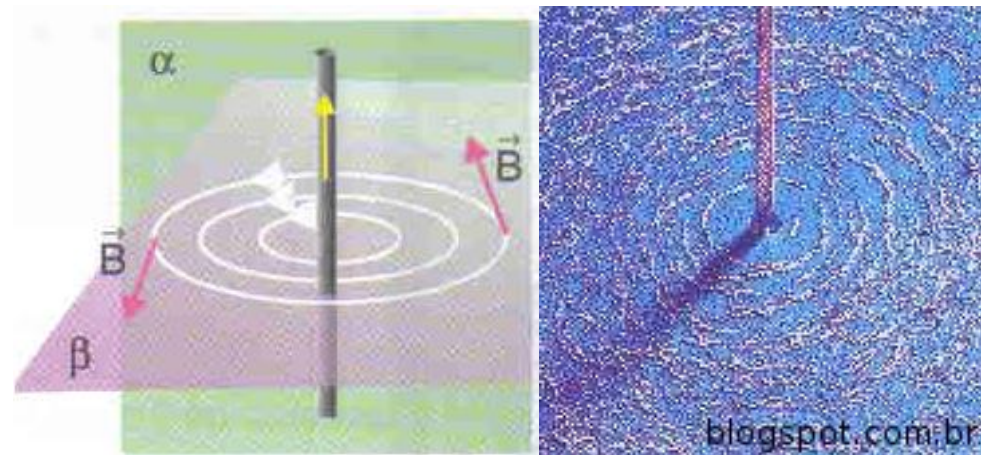
Vamos saber mais sobre a força magnética sobre espiras? Então, acesse o material *on-line* e não perca o vídeo que o professor Fábio preparou! Tire as dúvidas que possam ter ficado pendentes.

Fontes de campo Magnético

Sabemos que a passagem de corrente elétrica em um determinado condutor gera um campo magnético. Agora falaremos sobre as características dos campos magnéticos gerados pelo movimento das cargas. Através de experiências, como a relatada por Oersted, onde uma corrente elétrica percorre um fio condutor, foi possível verificar algumas características a respeito do campo magnético gerado nessa situação.

Uma delas é que as linhas de campo magnético geradas ao redor de um condutor retilíneo são circulares, concêntricas e estão situadas em planos perpendiculares ao comprimento do condutor.

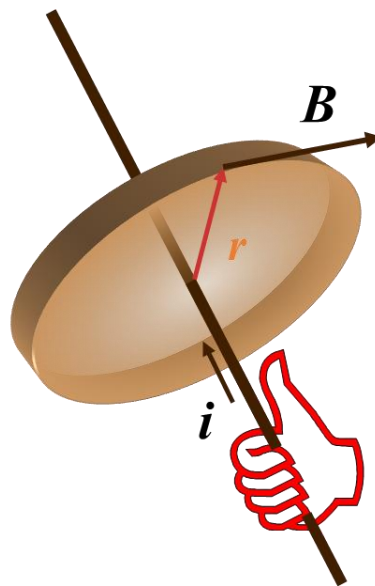
Figura 13 – Linhas de campo magnético geradas em torno de um fio condutor percorrido por uma corrente elétrica.



O sentido das linhas de campo pode ser obtido utilizando a regra da mão direita. Nesse caso, posicione seu dedo polegar na direção e sentido da corrente elétrica. Feche a mão com se estivesse segurando o

fi. O sentido das linhas de campo magnético será o mesmo sentido das pontas dos outros dedos ao fechar a mão.

Figura 14 – Regra da mão direita para determinar o sentido das linhas de campo magnético geradas no entorno de um fio condutor percorrido por uma corrente elétrica.



A determinação da intensidade do campo magnético em um dado ponto ao redor do fio já não pode ser feita utilizando regras práticas. Nesse caso, nos baseamos em alguns conceitos como a Lei de Biot-Savart.

A **Lei de Biot-Savart** fornece uma relação para o campo magnético $d\vec{B}$, criado por uma pequena parte $d\vec{l}$ de um condutor que transporta uma corrente I , em um determinado ponto P do espaço, definido pelo vetor posição \vec{r} . Esse campo $d\vec{B}$ é perpendicular tanto à $d\vec{l}$ quanto à \vec{r} e obtido pela relação:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (9)$$

Ou

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin\phi}{r^2} \quad (10)$$

Para os campos magnéticos, também é válido o princípio da superposição, no qual o campo magnético total em um determinado ponto do espaço é dado pela soma vetorial de todos os campos magnéticos que atuam naquele ponto.

Cada um dos elementos $d\vec{l}$ ("pedacinhos") contribui com um valor de $d\vec{B}$ e o campo magnético total \vec{B} , em um determinado ponto, será dado pela soma das contribuições de todas as partes do fio.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (11)$$

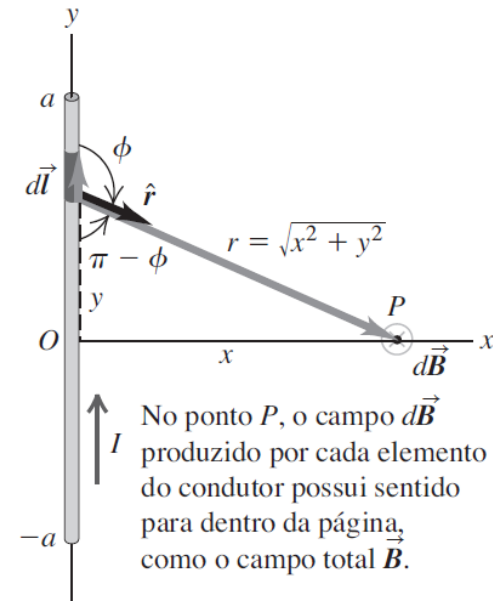
A constante μ_0 é denominada **permeabilidade magnética do vácuo**. Essa constante está associada à propriedade magnética do meio onde o campo magnético está, neste caso o vácuo.

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

Aplicando a lei de Biot-Savart para um fio condutor, com um comprimento igual a $2a$, podemos obter a equação para o módulo do campo magnético em um ponto P , a uma distância x do fio:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi x} \frac{2a}{\sqrt{x^2 + a^2}} \quad (12)$$

Figura 15 – Aplicação da Lei de Biot-Savart a um condutor retilíneo de comprimento igual a $2a$ (Sears e Zemansky).



Na equação anterior, se $a \gg x$, ou seja, se o comprimento do fio é muito maior que a distância até o ponto considerado (x), ou se o ponto considerado está muito próximo ao fio, a equação pode ser reescrita como:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad (13)$$

Ou

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (14)$$

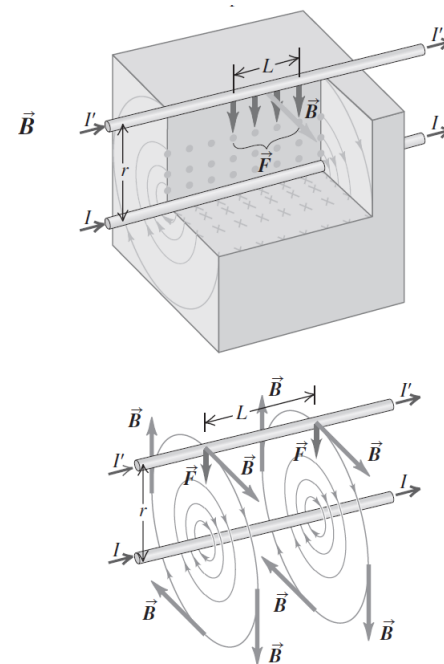
Logo, a equação acima descreve o campo magnético \vec{B} a uma distância r de um condutor cilíndrico longo que transporta uma corrente elétrica I . E, como já sabemos, as linhas de campo magnético são circunferências coaxiais com o fio, e o sentido é dado pela regra da mão direita.

Se colocarmos dois fios condutores um próximo ao outro (paralelos) e ambos estiverem conduzindo corrente elétrica, haverá uma interação magnética entre eles (atração ou repulsão)? Pode parecer estranho, mas a resposta é sim!

Vimos que um condutor percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético ao seu redor. E, também, que se um condutor retilíneo que conduz corrente é submetido a um campo magnético externo, atua sobre ele uma força magnética.

Sendo assim, como temos dois fios retilíneos e conduzindo corrente, ambos os fios geram campo magnético. O campo magnético de um fio causará uma força magnética no outro e vice-versa.

Figura 16 – Interação entre campos magnéticos gerados entre fios retilíneos



Fonte: Sears & Zemansky

Dois condutores cilíndricos, longos e paralelos, que transportam corrente elétrica, se atraem quando as correntes elétricas são no mesmo sentido e se repelem quando as correntes estão em sentidos opostos.

Em ambos os casos, a intensidade da força entre os fios (condutores retilíneos) é dada por:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi d} \quad (15)$$

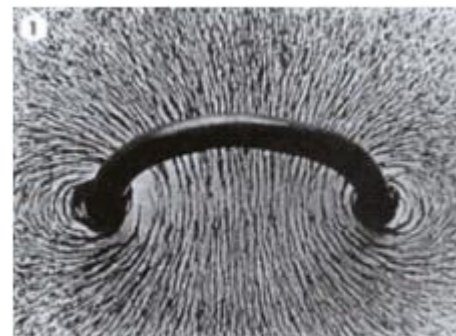
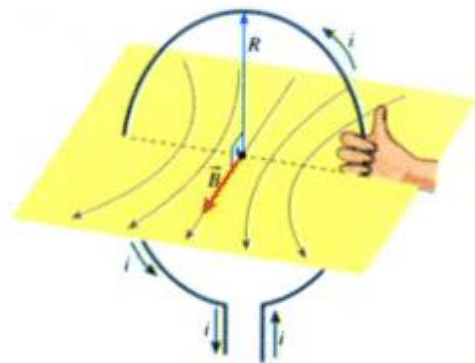
Onde **d** é a distância entre os dois fios e **L** é o comprimento dos fios. Essa equação é utilizada para definir a unidade de corrente elétrica: o Ampère.

Assista ao vídeo que está disponível no material *on-line*, no qual o professor Fábio fala um pouco mais sobre as fontes de campo magnético. Não perca!

Campo Magnético em espiras e solenoides

Agora, vamos supor que o fio condutor em questão não seja mais retilíneo e sim encurvado formando uma espira circular. Nesse caso, a configuração das linhas de campo magnético irá mudar.

Figura 17 – Campos magnéticos gerados por espiras condutoras percorridas por correntes elétricas



Fonte:

<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br>

Cada trecho (elemento infinitesimal) da espira contribui com um campo magnético circular em torno do fio. Uma característica dessa configuração é que dentro da espira há uma sobreposição (soma) dos campos magnéticos gerados por cada um dos elementos. Ou seja, o fato de um fio estar enrolado no formato de uma espira faz com que o campo magnético no interior da espira seja mais intenso (as linhas de campo estão mais concentradas).

Da mesma maneira que foi feito para um fio retilíneo, podemos utilizar a lei de Biot-Savart para determinar o campo magnético produzido por uma espira circular. Para uma espira de raio r , que conduz uma corrente elétrica \mathbf{I} , o campo magnético no centro da espira é dado por:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} \quad (16)$$

No intuito de conseguir um campo magnético mais intenso do que em uma única espira, para uma mesma corrente, podemos enrolar um fio condutor formando várias espiras circulares em sequência. Esta configuração recebe o nome de **solenóide**.

Em uma certa aproximação, podemos considerar que o campo magnético no interior de um solenóide é dado pela soma dos campos gerados por cada uma das N espiras que o compõe.

Assim, o campo no eixo de simetria de um solenoide com N espiras é dado por:

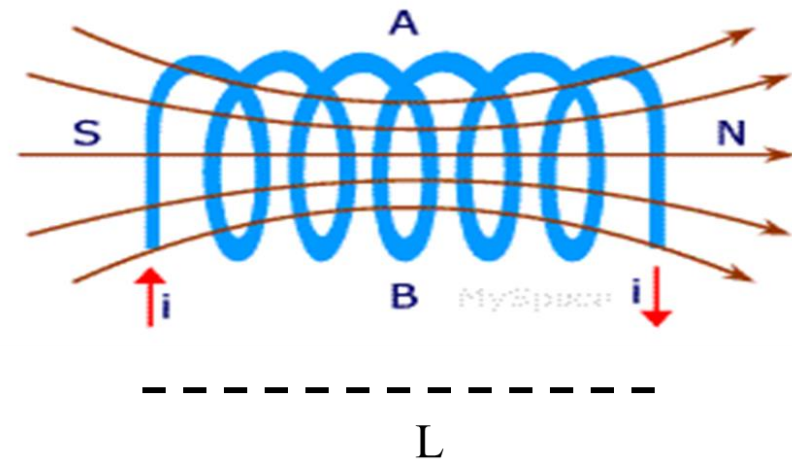
$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad (17)$$

No qual **L** é o comprimento do solenoide. Ou, ainda, podemos escrever este campo como:

$$B = \mu_0 nI \quad (18)$$

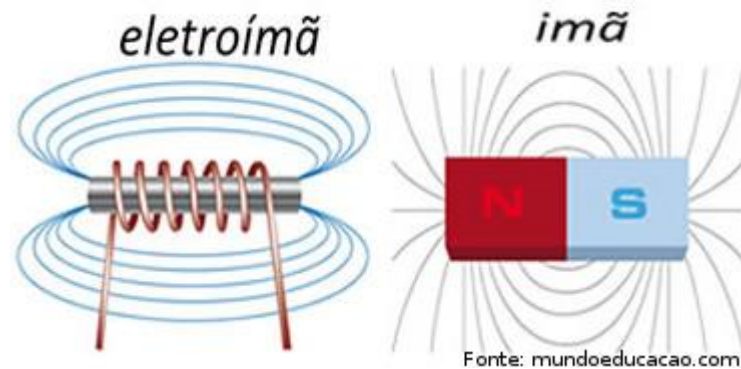
No qual **n** é a densidade de espiras, ou seja, $n=N/L$.

Figura 18 – Campos magnéticos gerado por solenoide



O campo magnético gerado no interior de um solenoide percorrido por uma corrente elétrica é muito semelhante ao campo magnético gerado por um ímã permanente em forma de barra (figura 19). Sendo assim, esse solenoide funciona exatamente como um ímã, atraindo objetos ferromagnéticos ou se alinhando a um campo magnético externo. Nesse caso, ele é denominado um **eletroímã**.

Figura 19 – Comparação entre o campo magnético gerado por solenoide e por um ímã permanente em forma de barra.



A principal vantagem de um eletroímã é que ele pode ser ligado e desligado. Quando há corrente elétrica passando pelas espiras ele funciona como um ímã, caso contrário, não. Em geral, adiciona-se um núcleo de material ferromagnético para aumentar o campo magnético gerado pelo eletroímã.

Uma das aplicações dos eletroímãs são em guindastes magnéticos, que são utilizados para elevar grandes cargas metálicas (figura 20).

Figura 20 – Aplicações de eletroímãs em guindastes magnéticos (Fonte: SEED-PR).



Eletroímãs também são frequentemente utilizados em travas eletromagnéticas (figura 21).

Figura 21 – Aplicações de eletroímãs em travas eletromagnéticas



Fonte: fxbiometria.com.br

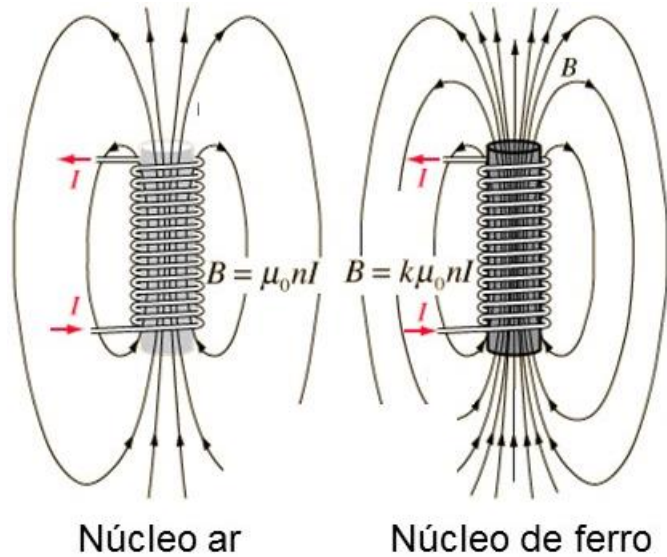
No vídeo disponível no material *on-line*, o professor Fábio disserta sobre o campo magnético em espiras e solenoides. Não deixe de assistir!

Propriedades magnéticas dos materiais

Na prática, um núcleo de ferro, por exemplo, é adicionado no interior de um solenoide para que o campo magnético gerado por um eletroímã seja intensificado. Nesse caso, o campo magnético no interior do solenoide é multiplicado por uma constante **k** (ou K_m), em relação ao valor obtido com núcleo de ar (figura 22).

Figura 22 – Comparação entre o campo magnético gerado por um solenoide com ar

em seu



interior e o mesmo solenoide preenchido com um núcleo de ferro

Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>

A constante K_m é chamada de **permeabilidade relativa** do material. Essa constante está relacionada à forma como um dado material reage a um campo magnético externo.

A **permeabilidade** dos materiais é dada por:

$$\mu = K_m \mu_0 \quad (19)$$

A equação 19 nos permite determinar o campo magnético em um determinado ponto, levando em consideração as propriedades magnéticas dos materiais. Por exemplo, no caso do solenoide com um núcleo de ferro, a equação passa a ser:

$$B = K_m \mu_0 n I = \mu n I \quad (20)$$

Os materiais magnéticos, em geral, são classificados com base nos seus respectivos valores assumidos de **permeabilidade relativa** em:

- **Diamagnéticos:** K_m é **ligeiramente menor** que 1 e, conseqüentemente, μ é ligeiramente menor que μ_0 ;
- **Paramagnéticos:** K_m é **ligeiramente maior** que 1 e, conseqüentemente, μ é ligeiramente maior que μ_0 ;
- **Ferromagnéticos:** K_m é **muito maior** que 1 e, conseqüentemente, μ é muito maior que μ_0 .

Uma constante equivalente à permeabilidade magnética e que, por ser mais prática, frequentemente aparece em tabelas é a **susceptibilidade magnética** χ_m

$$\chi_m = K_m - 1 \quad (21)$$

Quando a susceptibilidade magnética é próxima de zero, ou seja, μ é muito próximo que μ_0 , o material responde muito pouco ao campo magnético externo. A susceptibilidade magnética da maioria dos sólidos e líquidos à temperatura ambiente é praticamente nula (incluindo o corpo humano). Por esse motivo, observamos mais os efeitos magnéticos em materiais ferromagnéticos.

Tabela 1 - Valores de suscetibilidade magnética para alguns materiais

Material	$\chi_m = K_m - 1 (\times 10^{-5})$
Paramagnético	
Alúmen de ferro e amônio	66
Urânio	40
Platina	26
Alumínio	2,2
Sódio	0,72
Gás oxigênio	0,19
Diamagnético	
Bismuto	-16,6
Mercúrio	-2,9
Prata	-2,6
Carbono (diamante)	-2,1
Chumbo	-1,8
Cloreto de sódio	-1,4
Cobre	-1,0

Fonte: Sears e Zemansky

Relações entre os aspectos microscópicos e as propriedades magnéticas dos materiais

Todo elétron possui um momento de dipolo magnético, ou seja, se comportam como minúsculos imãs. Para alguns átomos, os momentos de dipolo dos elétrons são somados, dando origem a um **momento de dipolo atômico**.

No entanto, nem todos os átomos possuem um momento magnético, isso depende das interações entre os elétrons e como estão organizados em cada átomo. Essa propriedade da matéria torna viável uma explicação a respeito do magnetismo natural associado a determinados materiais. Quando um determinado material é submetido a um campo magnético externo, os átomos que o compõem podem reagir de formas diferentes originando efeitos diferentes.

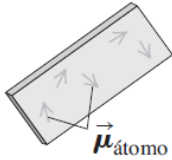
Como vimos a pouco, basicamente, podemos classificar magneticamente os materiais em três grupos principais. São denominados materiais **diamagnéticos** aqueles que não apresentam naturalmente

propriedades magnéticas (momento magnético atômico nulo) na ausência de um campo magnético externo. Nesse tipo de material, quando um campo magnético externo é aplicado, o material tende a criar um campo magnético no sentido inverso, **diminuindo assim o campo magnético total** no ponto onde este material está inserido.

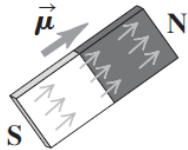
Nos materiais denominados **paramagnéticos** os momentos magnéticos atômicos não são nulos, mas encontram-se naturalmente desalinhados, e as propriedades magnéticas não se manifestam nessa condição. Entretanto, na presença de um campo magnético externo, ocorre um alinhamento nos momentos de dipolo e o material passa a atuar como um ímã. Em geral, os materiais paramagnéticos quando submetidos a um campo externo tendem a contribuir para um **aumento no campo magnético total**.

Figura 23 – Momento magnético nos materiais

(a) Ferro não-ímantado: os momentos magnéticos se orientam ao acaso.



(b) Em uma barra de ferro ímantada, os momentos magnéticos se alinham.



Fonte: Sears e Zemansky.

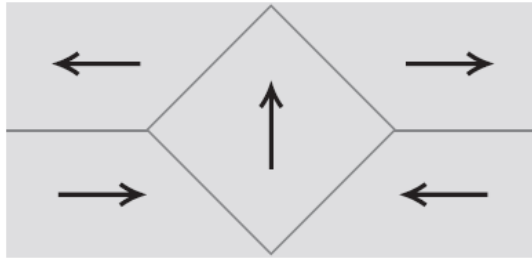
No terceiro caso, temos os materiais **ferromagnéticos**. Nesse tipo de material, o momento magnético atômico é muito intenso e no seu interior formam-se regiões, denominadas **domínios magnéticos**, onde naturalmente os momentos magnéticos dos átomos estão alinhados. Geralmente tem-se diversos domínios magnéticos com direções diferentes (veja as figuras).

Imãs permanentes possuem grande parte dos domínios magnéticos com a mesma orientação, gerando um campo magnético naturalmente. Os materiais ferromagnéticos, quando submetidos a um campo externo, tendem a contribuir para um **aumento ainda maior no campo magnético total**.

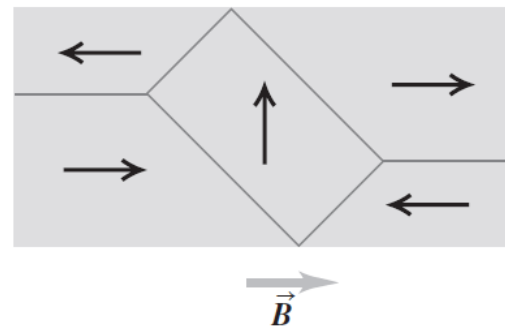
No início, assumimos, com base na prática, que a inclusão de um núcleo de ferro no interior de um solenoide serve para intensificar o campo gerado pelo mesmo. Agora, já sabemos que o núcleo não pode ser composto de qualquer material e sim de materiais ferromagnéticos. No entanto, temos que tomar um certo cuidado.

Figura 24 –As setas indicam os sentidos da magnetização de cada domínio magnético no interior de um material ferromagnético

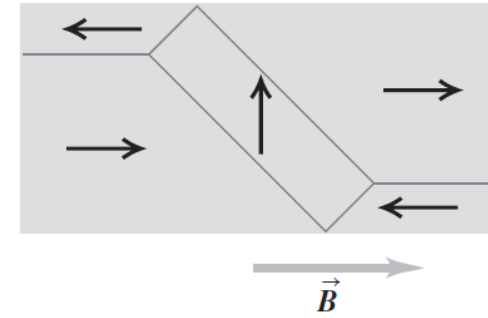
(a) Sem campo



(b) Campo fraco



(c) Campo mais forte



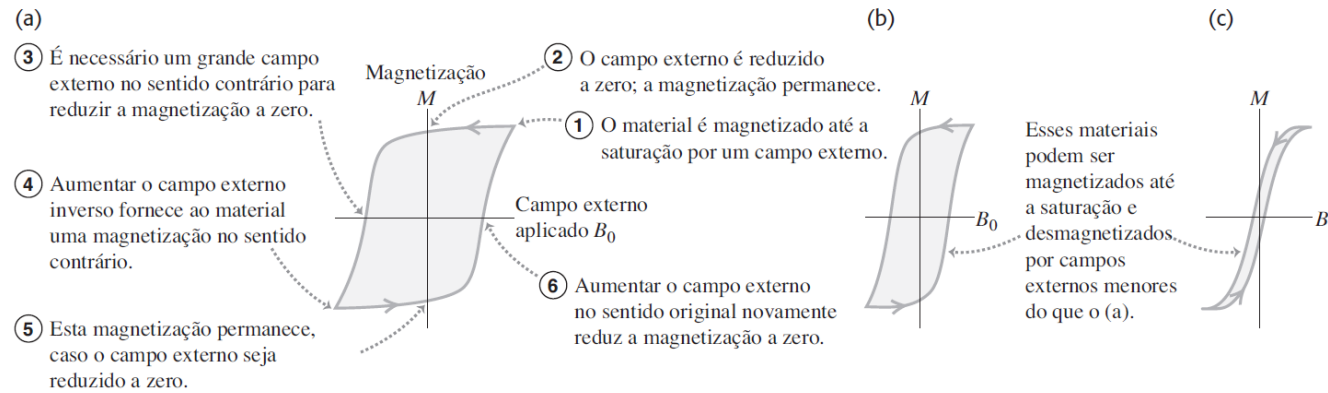
Fonte: Sears e Zemansky.

Um material ferromagnético, como o ferro por exemplo, sendo utilizado como núcleo, aumentará bastante o campo magnético gerado pelo eletroímã. No entanto, quando desligamos o eletroímã (cortamos a corrente elétrica), o núcleo pode permanecer **magnetizado**. Nesse caso, para que o ferro fique desmagnetizado, é necessária a aplicação de um campo magnético no sentido contrário o que fará o núcleo perder sua magnetização.

Nesse contexto, é interessante definir mais duas propriedades dos materiais ferromagnéticos: a **Remanência**, relacionada à magnetização residual de um material quando o campo externo aplicado volta a ser zero; e a **Coercividade** que é o valor do campo reverso que deve ser aplicado para que a **magnetização** caia a zero.

Como base no que foi exposto acima, o campo magnético utilizado para magnetizar um material nunca será igual ao campo utilizado para desmagnetizá-lo. Essas características são resumidas nas curvas de **histerese** de cada material (figura 25).

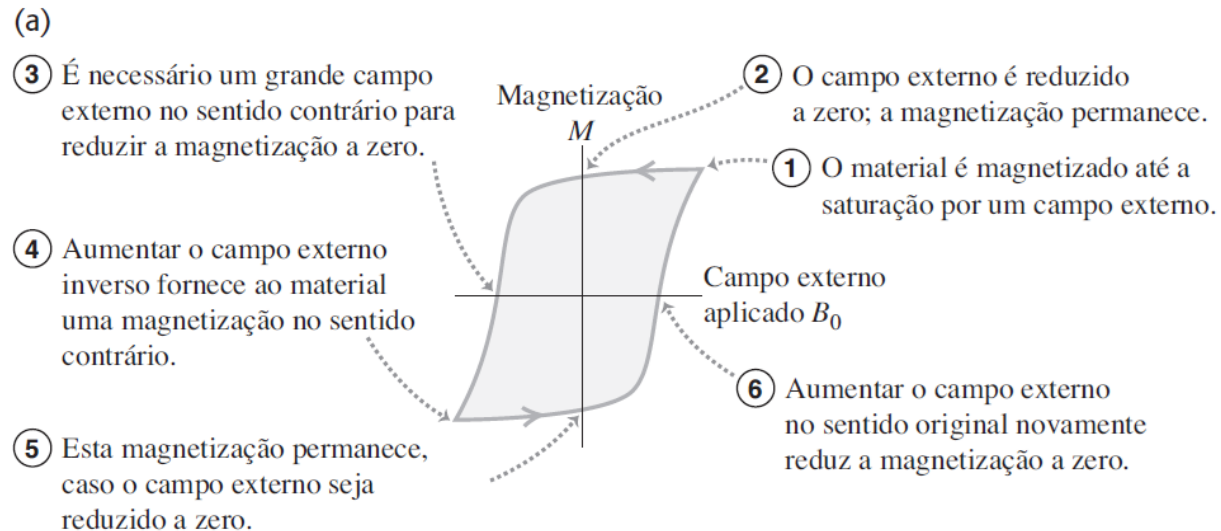
Figura 25 – Curvas de histerese para três materiais com remanências e corecividades diferentes



Fonte: Sears e Zemansky

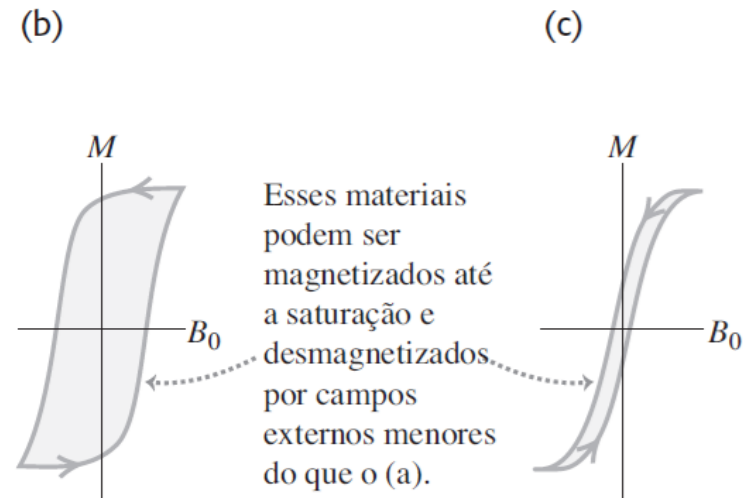
Vamos ver por partes:

Conhecer as propriedades magnéticas dos materiais é um fator muito importante na hora de selecioná-los para determinadas aplicações. O material cuja curva de histerese está representada na figura 25a, apresenta um alto valor de remanência e alto valor de coercividade, sendo mais adequado utilizá-lo em ímãs permanentes.



Já na figura 25b, este outro material possui uma remanência alta, mas uma coersividade baixa, ou seja, é mais fácil desmagnetizá-lo do que o material anterior. Devido a essas características, esses materiais são mais adequados para gravações de dados, como em um HD de computador.

Por fim, o material, cuja a histerese é apresentada pela figura 25c, tem baixa remanência e baixa coersividade. Essa combinação é interessante em aplicações onde a histerese ideal seria zero, como no caso de transformadores ou aplicações que envolvam corrente alternada.



Chegamos ao final de mais uma aula! Para entender mais sobre a propriedade magnética dos materiais, acompanhe as explicações do professor Fábio no vídeo que está disponível no material *on-line*!