

Campo Magnético

Propriedades magnéticas da matéria – Ímãs

Desde a antiguidade, muitos fenômenos magnéticos já eram conhecidos. Algumas pedras de magnetita (Fe_3O_4) podiam atrair outras amostras ferromagnéticas, como pequenos pedaços de ferro. (O nome deriva de uma região da Ásia Menor, em que tais pedras foram encontradas, Magnésia).

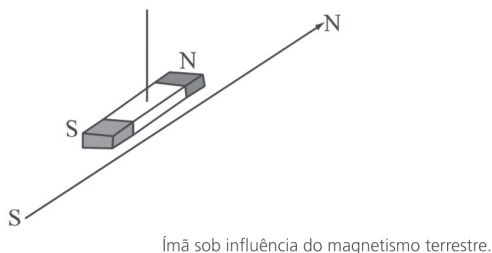
Também se verificou que, através destas pedras, que passaram a ser chamadas de ímãs, era possível magnetizar (imantar) certos materiais, como o próprio ferro, que também passavam a funcionar como ímãs.

Hoje as propriedades dos ímãs são bem conhecidas e descritas com base numa teoria microscópica bem sucedida, que apresentaremos posteriormente.

Os polos de um ímã

Em um ímã podemos distinguir duas regiões onde o magnetismo é mais pronunciado. Estas regiões denominam-se polos do ímã.

O nome dado aos polos do ímã decorre das propriedades magnéticas da Terra, pois ao suspendermos um ímã, um de seus polos sempre tende a se alinhar com o norte geográfico da Terra. Este polo é o norte magnético do ímã. O outro polo é o sul magnético do ímã.



Princípio de atração e repulsão

Análogo ao princípio de atração e repulsão da eletrostática, no magnetismo podemos afirmar que: "Polos diferentes se atraem e polos iguais se repelem."

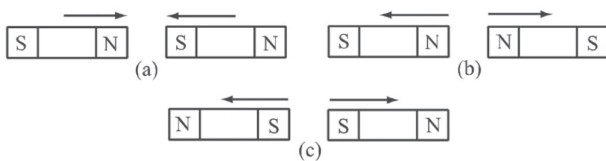


Fig. 1: Representação do Princípio de Atração para polos diferentes (a) e para polos iguais (b) e (c).

Inseparabilidade dos Polos Magnéticos

Diferente da eletricidade em que os "polos" (cargas positivas e negativas) podem ser encontradas isoladamente, no magnetismo não é possível separar os polos norte e sul, ou seja, não há monopólio magnético na natureza. Por isso, se dividirmos um ímã, não separaremos seus polos e obteremos novos ímãs completos.



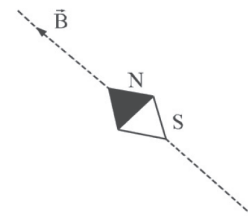
Fig. 2: Um ímã, ao ser dividido (a), gera dois novos ímãs (b).

Campo magnético de um ímã

Podemos definir campo magnético como a região do espaço em torno de um ímã (ou de um condutor percorrido por corrente elétrica, como veremos posteriormente) onde são exercidas forças de origem magnética.

A cada ponto do campo magnético, associaremos um vetor $\vec{B}$ chamado vetor indução magnética.

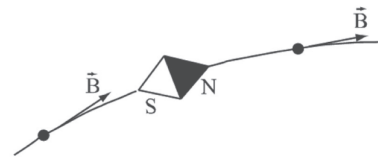
Uma agulha magnética, colocada em um ponto do campo magnético, orienta-se na direção do vetor $\vec{B}$ com o polo norte da agulha apontando no sentido de $\vec{B}$; logo, a agulha magnética serve como elemento de prova da existência de campo magnético num ponto. Como na eletrostática, o elemento de prova (lá uma carga, aqui um ímã) deve ter propriedades (elétricas ou magnéticas) débeis o suficiente para não modificar o campo antes existente.



• Agulha magnética (ímã de prova) indicando a direção e o sentido de $\vec{B}$ (o norte da bússola é normalmente pintado).

Tal e qual o campo elétrico, que apresentava as chamadas linhas de força, o campo magnético também pode ser representado por linhas de indução magnética.

Linha de indução é a linha que, em cada ponto, é tangente à direção do campo e orientada no seu sentido.



• Agulha magnética alinhando-se às linhas de indução magnética.

Se a linha de indução (linha de força do campo magnético) dá a direção da indução magnética naquele ponto $\vec{B}$ **uma agulha magnética** orienta-se sempre segundo as linhas de indução do campo.

Experimentalmente, podemos determinar o campo magnético de ímãs com o auxílio de bússolas, alfinetes, ou limalha de ferro.

Colocando-se um ímã de barra, por exemplo, coberto com uma folha de papel e, em seguida, espalhando-se limalha de ferro sobre o papel, veremos que a limalha se coloca segundo as linhas de força do ímã como mostra a figura 3.

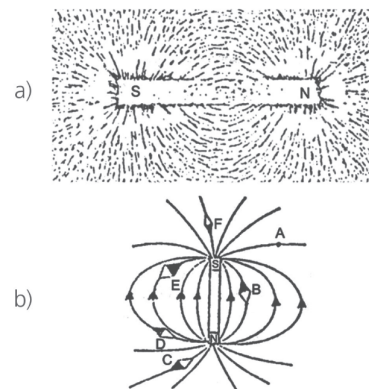
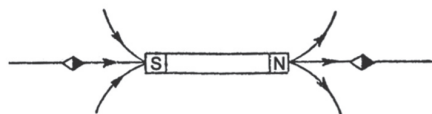


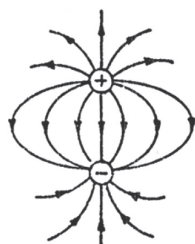
Fig. 3: Fotografia (a) e representação esquemática (b) do formato das linhas de indução de um ímã em barra, obtida com limalha de ferro.

Observe que, como polos diferentes se atraem, podemos deduzir facilmente que as linhas de indução magnética saem do ímã pelo polo norte e entram no ímã pelo polo sul.



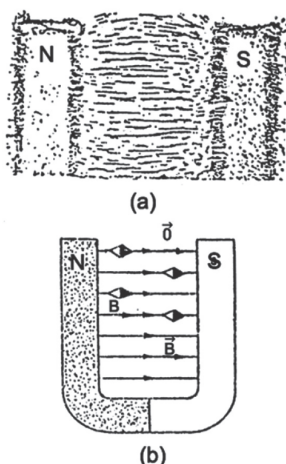
- Orientação das linhas de indução de um ímã em barra.

Compare a forma das linhas de indução magnética do ímã em barra (figura 3b) com as linhas de força do campo elétrico de um dipolo elétrico (abaixo).



- Linhas de força de um dipolo elétrico.

Ímãs com outros formatos produzem campos magnéticos com aspectos diferentes, por exemplo, como o ímã em ferradura, representado abaixo:



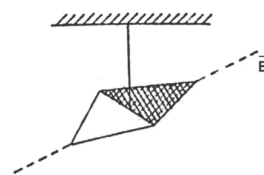
- Fig. 4: Fotografia (a) e representação esquemática (b) do formato das linhas de indução de um ímã em ferradura obtida com limalha de ferro.

De acordo com a fotografia, verificamos que as linhas de indução do campo produzido entre as faces de um ímã em forma de **U**, são linhas praticamente paralelas. Neste caso, temos um campo de muita importância no nosso estudo, chamado **campo magnético uniforme**, ou seja, em todos os pontos o vetor $\vec{B}$ é o mesmo, isto é, tem mesma direção, mesma intensidade e mesmo sentido.

O campo magnético da Terra

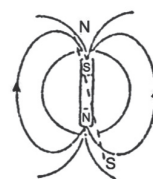
A experiência que relatamos anteriormente, em que suspendemos uma agulha magnética, de maneira que ela se movesse livremente em torno do seu eixo, fez com que ela se orientasse em direção perfeitamente determinada, o que nos leva

a admitir a existência do campo magnético terrestre. Como polos iguais se repelem e polos diferentes se atraem, o norte geográfico da Terra é o seu polo sul magnético e vice-versa.



- Agulha imantada sob influência do campo magnético terrestre.

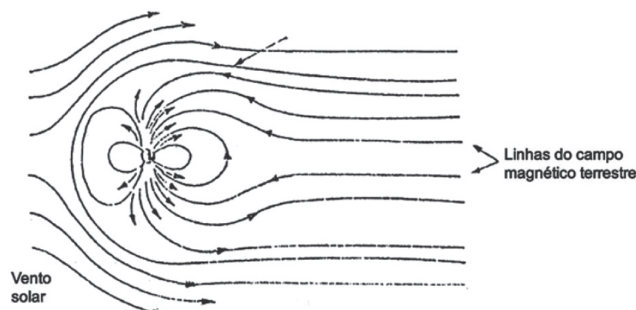
O magnetismo da Terra é atribuído a movimentos da parte líquida no núcleo, movimentos esses causados por diferença de temperatura no centro da Terra. O movimento de rotação orientaria essas correntes, produzindo movimentos de elétrons, e seus efeitos magnéticos somados criariam como resultante o magnetismo da Terra. Se fizéssemos um grande número de observações sobre o campo magnético terrestre, com o auxílio de uma agulha magnética, poderíamos fazer o desenho a seguir.



- Fig. 5: A Terra se comporta como um gigantesco ímã, com o polo sul magnético junto ao norte geográfico, e o norte magnético junto ao sul geográfico.

Na realidade, o campo magnético se deforma em virtude do "vento solar" (partículas ionizadas e radiação eletromagnética provenientes do Sol).

Linhas de indução magnéticas provenientes do Sol – Magnetopausa

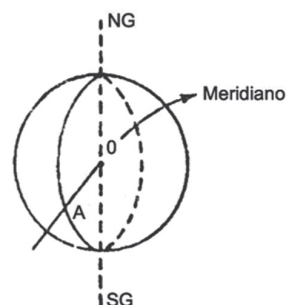


- Campo magnético terrestre modificado pelo vento solar.

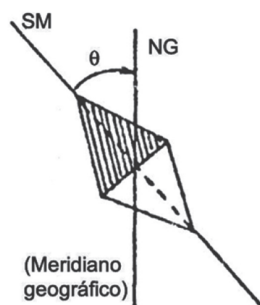
Elementos do campo magnético terrestre

Consideremos um ponto **A** qualquer da cidade de São Paulo. Por este ponto, passa um Meridiano Geográfico, ou seja, um plano que corta a Terra, seguindo um círculo que contém o ponto **A**, a direção da vertical em **A** e os polos geográficos.

Se colocarmos, porém, uma agulha magnética suspensa pelo seu centro de gravidade no ponto **A**, veremos que a vertical do lugar e o eixo da agulha determinam um plano chamado **meridiano magnético**.



O ângulo formado pelo meridiano magnético (orientação da Bússola) com o meridiano geográfico tem o nome de **declinação magnética**.



A declinação é chamada Oeste (WEST, W) quando o ângulo (θ) está para esquerda do meridiano geográfico, e, Leste (EAST, E) quando está à direita do meridiano geográfico.

A declinação do ponto **A** em São Paulo é aproximadamente 14°W .

Os pontos, cuja declinação magnética é igual a zero, constituem uma linha **agônica**, e o conjunto de pontos de mesma declinação magnética constituem uma linha **isogônia**.

Unidades de campo magnético

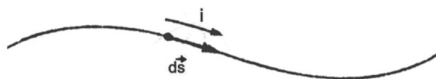
No SI, a unidade de indução magnética (B) é o Tesla (T) e, no CGS, é o Gauss. A relação entre eles é: $1\text{T} = 10^4\text{ gauss}$.

A dimensão de **B** é dada por: $[B] = \text{MQ}^{-1}\text{T}^{-1}$ como poderemos mostrar posteriormente.

Campo magnético gerado por correntes elétricas (Leis de Biot-Savart e Ampère)

Durante muito tempo, os cientistas acreditaram que os efeitos magnéticos e elétricos eram independentes. Mas a descoberta de que existe uma força entre uma carga em movimento e um ímã abriu caminho para o desenvolvimento da teoria **eletromagnética moderna**. Conta a história que tal descoberta foi acidental. Um professor de física dinamarquês, de nome Hans Christian Oersted, tentava demonstrar a ausência de relação entre eletricidade e magnetismo. Ao ligar uma corrente nas vizinhanças de uma agulha magnetizada, Oersted ficou absolutamente perplexo, ao ver que uma força bastante intensa havia surgido, fazendo a agulha oscilar fortemente.

Procuraremos estabelecer uma expressão para a indução magnética produzida por um elemento de corrente. Um **elemento de corrente** é definido da seguinte forma: seja um longo condutor percorrido por uma corrente **i**. Neste condutor, tomamos um elemento de comprimento **ds**, orientado no sentido da corrente. O elemento de corrente correspondente será o produto **ids**.



• Elemento de corrente = ids .

Atenção!

Um elemento de corrente é um vetor que têm módulo igual a **ids** e direção e sentido determinados pela corrente que percorre o condutor.

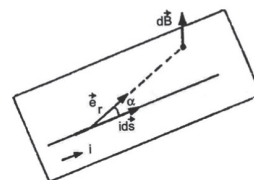
A primeira lei que nos dá o campo magnético gerado por uma corrente elétrica é a **lei de Biot-Savart**, que é uma lei empírica.

Segundo esta lei, um elemento de corrente produz, num ponto **P** do espaço, um campo magnético elementar, denominado indução magnética ($d\vec{B}$), tal que:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{d\vec{s} \cdot \vec{e}_r}{r^2}$$

Em que $\vec{e}_r$ é o versor na direção da reta que une o elemento de corrente ao ponto **P** e μ_0 é chamada de permeabilidade do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$).

A figura abaixo mostra a relação entre os vetores $d\vec{B}$, $d\vec{s}$ e $\vec{e}_r$:



• Fig. 6: Indução magnética gerada por um elemento de corrente.

Como a indução magnética é definida como um produto vetorial, o campo elementar $d\vec{B}$ no ponto **P** tem as seguintes características:

• Módulo:

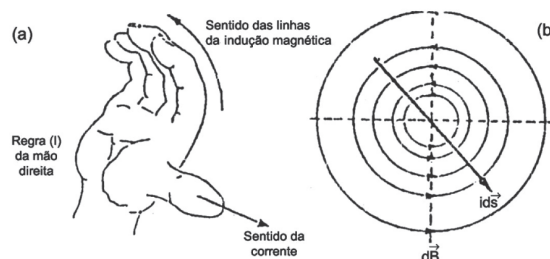
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{ds \cdot \sin\alpha}{r^2}$$

• Direção:

Perpendicular ao plano contendo o ponto **P** e o elemento de corrente ids .

• Sentido:

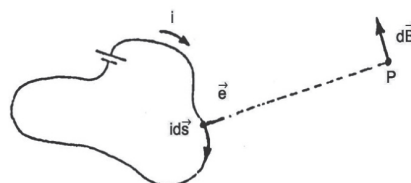
Dado pela “regra (I) da mão direita”, isto é, “se tentarmos segurar com a mão direita um condutor através do qual passa uma corrente elétrica, dispondo o polegar no sentido positivo da corrente, os outros dedos nos darão o sentido das linhas de indução”.



• Fig. 7: Ilustração de regra (I) da mão direita (a) que dá a relação entre a direção e o sentido da corrente e direção e sentido da indução magnética.

Se quisermos conhecer a indução magnética total, basta integrarmos a expressão de $d\vec{B}$, ao longo de todo o circuito:

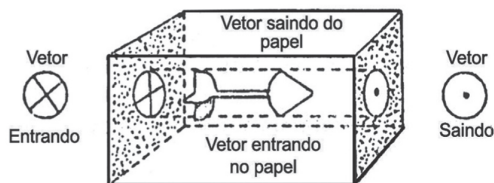
$$B = \int d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \int \frac{d\vec{s} \cdot \vec{e}_r}{r^2} \rightarrow \int \frac{d\vec{s} \cdot \vec{e}_r}{r^2} = \frac{4\pi}{\mu_{0i}} \vec{B}$$



• Fig. 8: Integração dos campos magnéticos elementares em um circuito elétrico qualquer.

Observe que o vetor $d\vec{B}$ perpendicular ao plano que contém $id\vec{s}$ e $\vec{e}_r$, não pode ser representado adequadamente da forma que temos adotado até aqui.

Como no eletromagnetismo, trabalhamos sempre com sistemas tri-ortogonais, convencionamos:



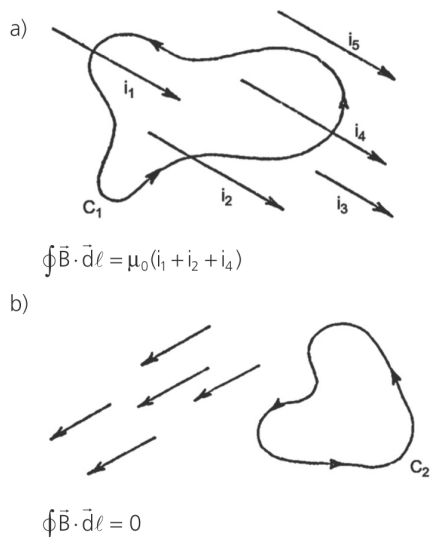
- Representação vetorial adotada no eletromagnetismo.

A outra lei que pode descrever o campo magnético, gerado por uma corrente elétrica é a **lei circuital de Ampère**. Esta lei é dedutível, mas o formalismo matemático é muito complicado. Na seção seguinte, encontraremos o vetor indução magnética gerado por um circuito particular (condutor retilíneo infinitamente longo) usando tanto a lei de Biot e Savart como a lei de Ampère, verificando a equivalência de resultados.

A **lei circuital de Ampère** pode ser enunciada deste modo: "a integral de circuitação da indução magnética ao longo de uma curva C é proporcional à corrente enlaçada por esta curva, tendo a permeabilidade magnética como constante de proporcionalidade". Este resultado é absolutamente geral e, do ponto de vista matemático, representa-se como segue:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 i$$

A seguir, exemplificamos o uso da **lei de Ampère**:



- Fig. 9: Exemplo de aplicação de lei circuital de Ampère.

Observe que, na figura (9a), as correntes i_1 , i_2 e i_4 são envolvidas pela curva C_1 , o que não acontece com as correntes i_3 e i_5 . Já na figura (9b), como nenhuma corrente é enlaçada pela curva C_2 , a integral de circuitação de $\vec{B}$ torna-se nula.

No caso particular em que, ao longo da curva C , o vetor indução magnética é constante e na mesma direção do C ($\vec{B} \parallel d\vec{\ell}$) temos:

$$B \cdot d\ell = B \quad d\ell = B\ell = \mu_0 i \rightarrow B = \frac{\mu_0 i}{\ell}$$

Cálculos de indução magnética – aplicações das leis de Biot-Savart e Ampère

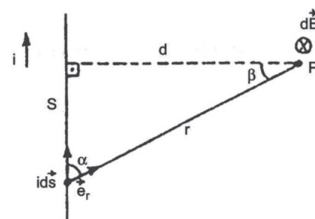
A partir da definição da indução magnética elementar, de acordo com a lei de Biot e Savart, calcularemos a indução magnética total em alguns casos particulares.

Condutor retilíneo muito longo

Sabemos que a indução magnética elementar em P , devido ao elemento de correntes $id\vec{s}$ é simplesmente:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{d\vec{s} \times \vec{e}_r}{r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{ds \cdot \sin\alpha}{r^2}$$



- Fig. 10: Campo magnético gerado por um condutor retilíneo.

Como todos os elementos de corrente produzirão campos elementares em P de mesma direção e sentido, a soma destes campos elementares, que é uma integral, pode ser feita como se somássemos escalares.

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int \frac{ds \sin\alpha}{r^2}$$

$$\text{Mas, } \tan\beta = \frac{s}{d}. \text{ Daí: } \sec^2\beta = \frac{ds}{d \cdot d\beta} \rightarrow ds = \frac{d \cdot d\beta}{\cos^2\beta}$$

$$\text{Além disso, } \sin\alpha = \cos\beta \text{ e } r = \frac{d}{\cos\beta}, \text{ portanto:}$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{4} \int \frac{\cos\beta}{d^2} \cdot \frac{d \cdot d\beta}{\cos^2\beta} = \frac{\mu_0 i}{4\pi d} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\beta d\beta$$

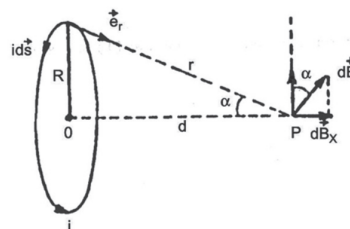
Finalmente, resolvendo a integral, temos:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi d} \text{ é a indução magnética devido a um condutor retilíneo muito longo.}$$

As linhas de indução têm o aspecto representado pela figura 7b.

Espira circular

Calculamos o campo magnético em um ponto P no eixo de uma espira circular.



- Fig. 11: Campo magnético gerado por um condutor retilíneo.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{d\vec{s} \times \vec{e}_r}{r^2} \rightarrow dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi r^2} ds$$

Por uma razão de simetria, os componentes $d\vec{B}_y$ se cancelam e a indução magnética total resultará exclusivamente da soma (integral) dos componentes $d\vec{B}_x$:

$$B = \int dB_x = \int dB \sin\alpha$$

Como r e $\sin\alpha$, são constantes, podemos pô-los para fora da integral, e o problema se reduz a:

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi r^2} \sin\alpha \int ds$$

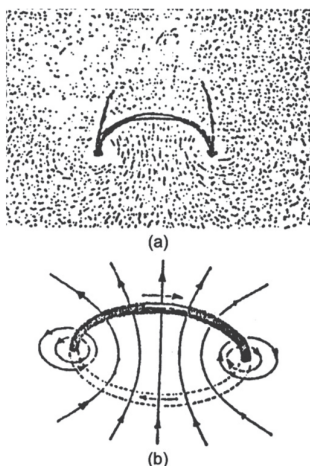
Mas $\sin\alpha = \frac{R}{r}$ e, $r^2 = R^2 + d^2$ e $\int ds = 2\pi R$:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2} \frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{3/2}}$$
 é a indução magnética num ponto qualquer do eixo de uma espira circular.

No centro da espira, $d = 0$ e o campo magnético é: $B = \frac{\mu_0 i}{2R}$.

Para pontos muito afastados, $d \gg R$ e, neste caso, temos: $B = \frac{\mu_0 i}{2} \frac{R^2}{d^3}$.

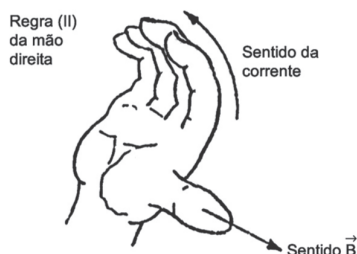
Como é o aspecto das linhas de indução?



• Fig. 12: Fotografia (a) e representação esquemática (b) das linhas de indução magnética de uma espira condutora percorrida por uma corrente.

Ao observarmos a foto com limalha de ferro, verificamos que no centro da espira, as linhas de indução tendem a se transformar em retas paralelas entre si, sendo que exatamente no centro a linha de indução é uma reta perpendicular ao plano da espira.

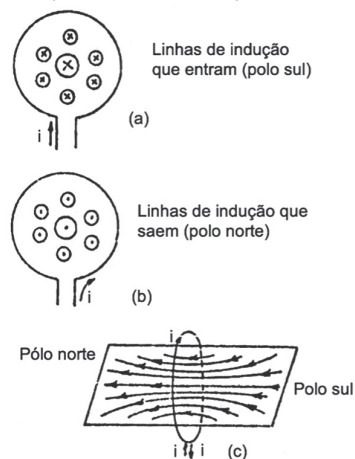
Podemos encontrar o sentido do campo gerado por uma espira usando a regra (I) ou a regra (II) da mão direita, representada abaixo:



• Ilustração da regra (II) da mão direita.

Pela figura 12, percebemos que o campo gerado por uma espira tem o aspecto de um campo de dipolo, como o do ímã em barra.

Assim sendo, podemos atribuir a uma espira circular um polo norte e um polo sul, como em um ímã, conforme a figura abaixo:



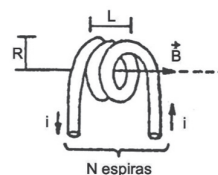
• Fig. 13: Analogia entre uma espira e um ímã. As linhas de força entram no polo sul (a) e saem do polo norte (b) produzindo um campo similar ao do ímã em barra.

Bobina chata

Uma bobina é obtida pela justaposição de N espiras circulares iguais. Para uma bobina chata, ou seja, de comprimento $L \ll R$, o campo sobre o centro da bobina será N vezes o campo de uma única espira.

Daí:

$$B = N \frac{\mu_0 i}{2R}$$



• Fig. 14: Bobina chata ($L \ll R$).

Importante:

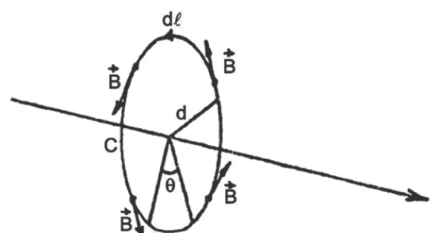
Todas as considerações que fizemos para a espira circular, acerca do formato das linhas de indução magnética e da analogia com um ímã também valem para a bobina chata.

Agora passaremos, em condições particulares de alta simetria, a usar a lei de Ampère, verificando sua simplicidade nestes casos.

Condutor retilíneo muito longo

É fácil verificar que, no caso de um condutor retilíneo infinito, existe uma simetria cilíndrica perfeita.

Escolheremos como "caminho", para efetuar a integral de linha, uma circunferência de raio d contida num plano perpendicular ao condutor e atravessada por este no seu centro:



• Fig. 15: Aplicação da lei circuital de Ampère ao cálculo do campo gerado por um condutor retilíneo infinito.

Segundo a lei de Ampère, temos $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 i$ ao longo da curva **C**, dita curva **amperiana**.

Podemos resolver facilmente esta integral, pois $\vec{B}$ e $d\vec{\ell}$ estão sempre na mesma direção e sentido, e $\vec{B}$ tem módulo constante ao longo da curva **C**.

$$\text{Daí: } \oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \oint B d\ell = B \oint d\ell = B\ell = \mu_0 i$$

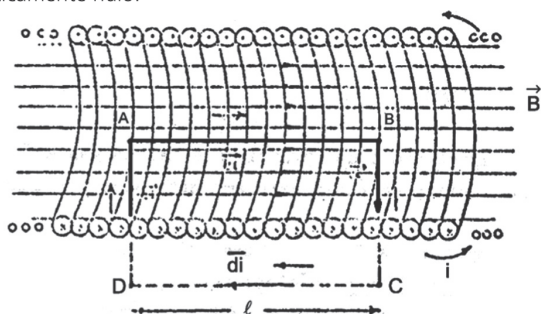
Mas $\ell = 2\pi d$ é o comprimento da circunferência. Daí, concluímos que:

$$B \cdot 2\pi d = \mu_0 i \rightarrow B = \frac{\mu_0 i}{2\pi d}$$

O que concorda perfeitamente com o resultado obtido pela lei de Biot-Savart, através de um caminho mais simples.

Campo gerado por um solenoide

Um **solenóide** ou **bobina longa** é um condutor enrolado em espiras iguais, uma ao lado da outra e igualmente espaçadas. Quando uma corrente **i** circula no solenoide, cria-se no interior do mesmo um campo praticamente uniforme e, no exterior, um campo praticamente nulo:



- Corte longitudinal de um solenoide.

O solenoide, que aparece cortado, gera um campo no seu interior que pode ser calculado facilmente pela lei circuital de Ampère.

Escolheremos o caminho mostrado na figura acima.

- Entre **A** e **B**, $\vec{B}$ e $d\vec{\ell}$ têm a mesma direção e sentido, logo, $\vec{B} \cdot d\vec{\ell} = B d\ell$.
- Entre **A** e **B**, $\vec{B}$ e $d\vec{\ell}$ são perpendiculares, e $\vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 0$.
- Entre **C** e **D**, o campo $\vec{B}$ se anula e $\vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 0$.
- Entre **D** e **A**, $\vec{B}$ e $d\vec{\ell}$ são novamente perpendiculares, e $\vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 0$.

$$\text{Daí: } \oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \int \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \int B d\ell = B \int d\ell = B\ell = \mu_0 n i$$

onde ℓ é o comprimento do segmento **AB** e **n** é o número de espiras contido neste comprimento, finalmente, temos:

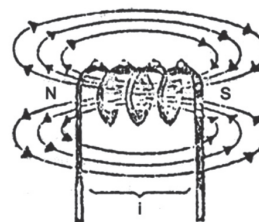
$$B = \mu_0 \left(\frac{n}{\ell} \right) i \text{ é o campo uniforme no interior do solenoide.}$$

Veja que se de fato as espiras forem igualmente espaçadas, a grandeza $\frac{n}{\ell}$ é uma constante, e, neste caso, $\frac{n}{\ell} = \frac{N}{L}$, onde **N** é o **número total de espiras** e **L** é o **comprimento do solenoide**.

Portanto:

$$B = \mu_0 \left(\frac{N}{L} \right) i$$

O cálculo que fizemos vale, de fato, para um solenoide ideal (infinito), mas é uma boa aproximação para a indução magnética próxima ao centro de um solenoide real, como o que mostramos em seguida.



- Linhas de indução geradas por um solenoide real. (Observe que as linhas de indução estão mais próximas no interior do solenoide, o que sugere um campo magnético mais intenso).

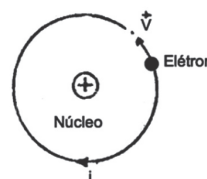
Teoria microscópica do magnetismo

Como sabemos hoje, o magnetismo é uma propriedade das cargas elétricas em movimento (corrente elétrica). Também sabemos que, no interior do átomo, existem partículas carregadas que realizam vários tipos de movimentos.

Identificaremos três importantes fontes de magnetismo no interior do átomo.

Movimento dos elétrons ao redor do núcleo

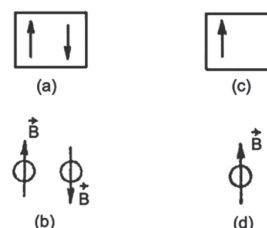
Corresponde a uma "espira" de corrente (admitindo-se as órbitas eletrônicas como quase circulares). Normalmente, fenômenos magnéticos associados a esse movimento só aparecem quando é aplicado um campo magnético externo à matéria.



- Movimento do elétron em torno do núcleo.

Spin do elétron

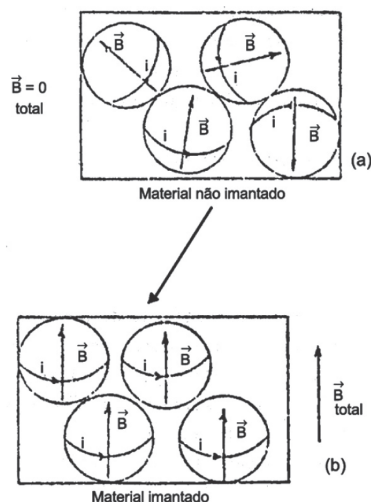
Pode ser comparado a uma rotação do elétron em torno de si mesmo, o que faz com que cada elétron atue como um pequeno ímã. Em geral, é a principal causa dos fenômenos magnéticos verificados macroscopicamente, o que acontece quando há elétrons desemparelhados na estrutura atômica.



- Fig. 16: Elétrons emparelhados (a) giram em sentidos contrários e produzem campos magnéticos que se anulam (b). Elétrons desemparelhados (c) produzem campos magnéticos que podem gerar efeitos verificados macroscopicamente.

Vimos até o momento que os fenômenos magnéticos são causados por cargas elétricas em movimento, ou seja, por correntes elétricas. Entretanto, o primeiro contato do homem com o magnetismo não se deu por campos magnéticos gerados por correntes, mas campos gerados por materiais na natureza, os quais foram denominados ímãs. Será que, no fundo, os fenômenos não seriam um só?

Ampère foi o primeiro que sugeriu que estes materiais tinham propriedades magnéticas por serem dotados de um número muito grande de minúsculas correntes elétricas (correntes amperianas). Em grande parte, a teoria de Ampère é verdadeira e o fenômeno conhecido por **imantação** nada mais é do que o alinhamento dessas correntes, fazendo com que os campos magnéticos por elas produzidos se somem. Nos materiais não imantados, as correntes estão ao acaso e o campo total é nulo. As correntes amperianas correspondem aos movimentos dos elétrons, que vimos anteriormente.



• Fig. 17: Correntes amperianas dispostas aleatoriamente num objeto não imantado (a) e ordenadamente num objeto imantado (b).

Estes movimentos, quer sejam de revolução em torno do núcleo, quer sejam em torno de si mesmos (spin do elétron), geram correntes que subsistem indefinidamente, não havendo produção de calor por não haver resistência.

Na natureza, como vimos, não há nem fontes nem sumidouros de campo magnético, portanto não há “monopolo magnético”. Sempre encontramos os polos magnéticos norte e sul formado um dipolo magnético, como nas minúsculas “espiras” de corrente amperiana.

Mas uma pergunta ainda permanece: por que certos materiais possuem um magnetismo tão pronunciado?

Tomemos, por exemplo, o ferro.

O ferro tem um subnível 3d com vários elétrons desemparelhados:



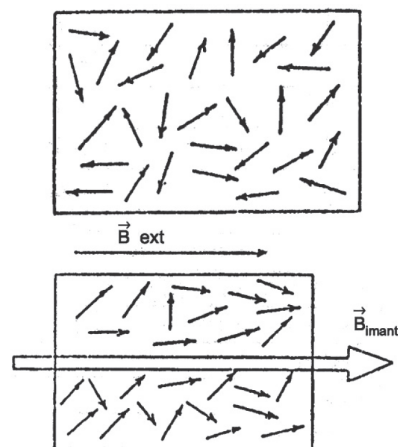
• Disposição dos elétrons do subnível 3d⁶ do ferro, segundo a “regra de Hund”.

Isto corresponde ao fato de que cada átomo de ferro é um dipolo magnético permanente, ou seja, um pequeno ímã.

Quando um material apresenta dipolos magnéticos permanentes, como é o caso do ferro, a ação de um campo externo faz com que os dipolos, antes distribuídos ao acaso, se alinhem, produzindo a imantação. Os dipolos, uma vez alinhados, podem permanecer nessa situação mesmo quando o campo externo é retirado. Este fenômeno é dito ferromagnetismo e, além do ferro, também caracteriza materiais como o cobalto e o níquel.

$\vec{B}_{\text{ext}}$ – campo externo

$\vec{B}_{\text{int}}$ – campo de imantação



• Um material ferromagnético, sob ação de um campo externo, tem os seus dipolos magnéticos alinhados.

A agitação térmica pode desmagnetizar um corpo anteriormente imantado, tornando a distribuição dos dipolos magnéticos aleatória novamente.

Vale salientar que não basta existirem dipolos magnéticos permanentes para que exista ferromagnetismo.

São duas as condições necessárias:

- Os átomos têm elétrons desemparelhados, ou seja, em órbitas de rotação em torno de si mesmos cujos efeitos magnéticos não se anulam.
- As forças entre átomos vizinhos são tais que os átomos tendem a se alinharem todos num mesmo sentido, o que só pode ser explicado de maneira completa no terreno da física quântica.

Quando apenas a primeira condição é cumprida, há dipolos magnéticos permanentes que se alinham com o campo externo, mas quando este é retirado, a posição destes dipolos volta a ser aleatória. Materiais com essas características constituem o fenômeno do paramagnetismo. Alguns materiais paramagnéticos são o alumínio, o tungstênio, o oxigênio etc.

Tanto os materiais ferromagnéticos quanto os paramagnéticos produzem campos de magnetização favoráveis ao campo externo. Outros, porém, produzem campos contrários ao campo externo, fenômeno conhecido como diamagnetismo. O cobre, o mercúrio, a prata, o nitrogênio e outros são materiais diamagnéticos.

Permeabilidade magnética

Uma grandeza que serve para identificar as características magnéticas de um material é a sua permeabilidade magnética absoluta (μ).

Como já vimos, para o vácuo a permeabilidade absoluta vale: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.

Podemos, para cada material, comparar a sua permeabilidade absoluta com a do vácuo, definindo a permeabilidade magnética relativa (μ_r), dada por:

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

Para materiais diamagnéticos, $\mu_r < 1$.

Para materiais paramagnéticos, $\mu_r > 1$.

Para materiais ferromagnéticos, $\mu_r \gg 1$.

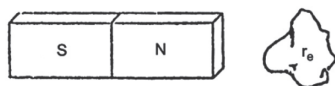
A seguir apresentamos uma tabela que compara diversos valores de permeabilidade magnética relativa.

	MATERIAIS	PERMEABILIDADE RELATIVA
FERROMAGNÉTICOS	Ferro (recozido)	$5,5 \times 10^3$
	Ferro (–96%) – Silício (3%)	$8,0 \times 10^3$
	Permalloy – Fe (55%) – Ni (45%)	$5,0 \times 10^4$
	Mumetal – Ni (77%) – Fe (16%)	$1,5 \times 10^5$
	Cu (5%) – Cr (2%)	$1,5 \times 10^5$
	Permendur – Co (50%) – Fe (50%)	$6,0 \times 10^3$
PARAMAGNÉTICOS	Alumínio	1,000021
	Magnésio	1,000012
	Tungstênio	1,000076
	Titânio	1,000180
	Oxigênio (1atm)	1,0000019
DIAMAGNÉTICOS	Cobre	0,999990
	Diamante	0,999978
	Ouro	0,999965
	Cloreto de Gadolínio ($GdCl_3$)	0,99397



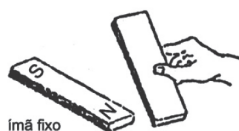
Exercícios de Fixação

01. (ITA) Um pedaço de ferro é posto nas proximidades de um ímã, conforme mostra a figura abaixo.



Qual das afirmativas abaixo é correta?

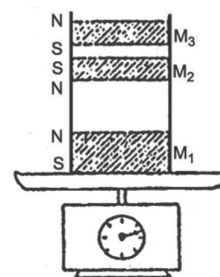
- A) É o ímã que atrai o ferro.
 B) É o ferro que atrai o ímã.
 C) A atração do ferro pelo ímã é maior que a atração do ímã pelo ferro.
 D) A atração do ímã pelo ferro é maior que a atração do ferro pelo ímã.
 E) A atração do ferro pelo ímã é igual à atração do ímã pelo ferro.
02. (Fuvest) Considere um ímã em forma de barra e fixo. Você segura entre os dedos outro ímã em forma de barra, pelo seu centro, e investiga as forças magnéticas que agem sobre ele, nas proximidades do ímã fixo.



Você conclui que o ímã entre seus dedos:

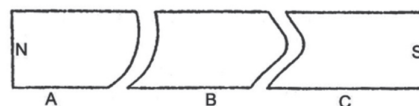
- A) será sempre atraído pelo ímã fixo.
 B) será sempre repellido pelo ímã fixo.
 C) tenderá sempre a girar.
 D) não será nem atraído nem repellido.
 E) poderá ser atraído ou repellido.

03. (Fuvest/91) Um tubo de vidro de massa $m = 30g$ está sobre uma balança. Na parte inferior do vidro está um ímã cilíndrico de massa $M_1 = 90g$. Dois outros pequenos ímãs de massas $M_2 = M_3 = 30g$ são colocados no tubo e ficam suspensos devido às forças magnéticas e aos seus pesos.



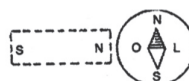
- A) Qual a direção e o módulo (em Newton) da resultante das forças magnéticas que agem sobre o ímã 2?
 B) Qual a indicação da balança (em gramas)?

04. (Univ. Cat. Salvador) Um ímã em forma de barra foi quebrado em três pedaços, como mostra a figura. Verificando as propriedades magnéticas de cada uma dessas partes, acharemos que:



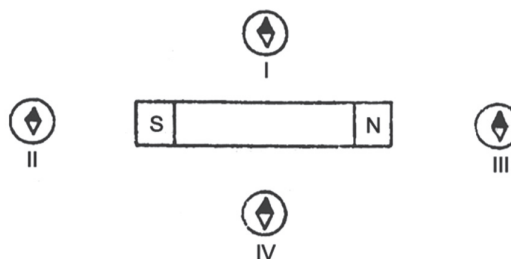
- A) as três partes são ímãs completos.
 B) a parte A possui somente o polo norte.
 C) a parte B não possui nenhum polo magnético.
 D) a parte C apresenta somente o polo sul.
 E) nenhuma das partes se comporta como um ímã completo.

05. (Cesgranrio) A bússola representada na figura repousa sobre a sua mesa de trabalho. O retângulo tracejado representa a posição em que você vai colocar um ímã com os polos respectivos nas posições indicadas. Em presença do ímã, a agulha da bússola permanecerá como em:

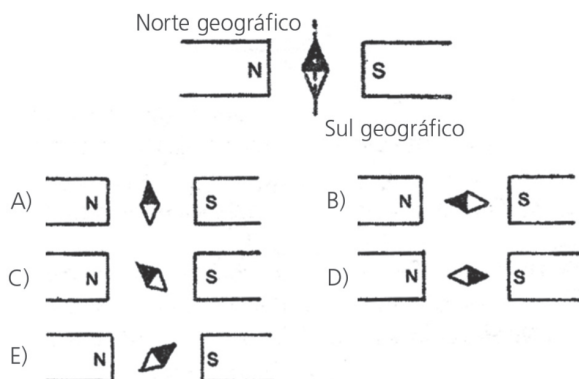


- A) B)
 C) D)
 E)

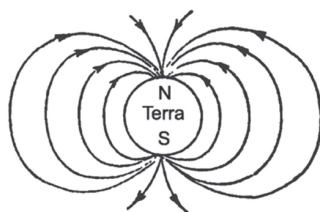
06. Na figura abaixo, esquematize a posição de equilíbrio de cada uma das bússolas. Despreze outras influências magnéticas.



07. (UFS) Uma pequena agulha magnética orientada inicialmente na direção norte-sul é colocada entre os polos de um ímã como mostra a figura. Se o campo magnético do ímã é da mesma ordem de grandeza do campo magnético terrestre, o gráfico que melhor representa a orientação final é:



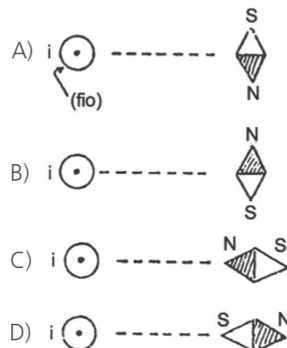
08. (EN) Na figura abaixo, **N** e **S** demarcam, aproximadamente, os polos geográficos da Terra. São mostrados apenas em duas dimensões, as linhas do campo magnético terrestre.



Observando o comportamento de uma agulha magnética (ou bússola) colocada nesse campo, concluímos que:

- A) o polo por onde saem as linhas de campo magnético da agulha aponta para o norte geográfico.
 B) o polo por onde entram as linhas de campo magnético da agulha aponta para o norte geográfico.
 C) o polo norte da agulha aponta para o sul geográfico.
 D) o polo sul da agulha aponta para o norte geográfico.
 E) a agulha apenas se alinha no campo, sem, no entanto, distinguir entre o norte geográfico e o sul geográfico.
09. (ITA) Sejam $\vec{E}$ um campo elétrico e $\vec{B}$ um campo de indução magnética. A unidade de $\frac{|\vec{E}|}{|\vec{B}|}$ no Sistema Internacional de Unidades é:
 A) $\text{NC}^{-1}\text{Wb}^{-1}$
 B) $\text{Vm}^{-1}\text{Wb}^{-1}$
 C) Vm Wb C^{-1}
 D) ms^{-1}
 E) nenhuma é adimensional.
10. Marque a alternativa, que **não** representa unidade de medida de indução magnética.
 A) Tesla.
 B) Gauss.
 C) $(\text{Newton} \cdot \text{segundo}) / (\text{Coulomb} \cdot \text{metro})$.
 D) $\text{Newton} / \text{Ampère}$.
 E) $(\text{Volt} \cdot \text{segundo}) / \text{metro}^2$.

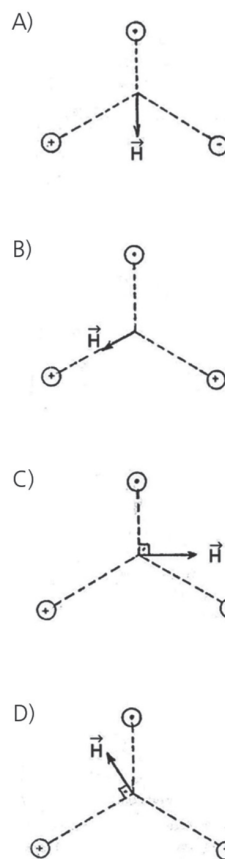
11. (ITA/86) Coloca-se uma bússola nas proximidades de um fio retilíneo, vertical, muito longo, percorrido por uma corrente elétrica, contínua **i**. A bússola é disposta horizontalmente e assim a agulha imantada pode girar livremente em torno de seu eixo. Nas figuras abaixo, o fio é perpendicular ao plano do papel, com a corrente no sentido indicado (saído). Assinale a posição de equilíbrio estável, da agulha imantada, desprezando o campo magnético terrestre (explique).



E) Nenhuma das situações anteriores.

12. Calcule a indução magnética a 1 cm de um fio muito longo, percorrido por uma corrente de 2 A.
Dados: Permeabilidade magnética ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$).

13. (ITA) A figura indica três condutores elétricos perpendiculares ao papel, formando um triângulo equilátero. Todas as correntes são contínuas e de mesmo valor. $\oplus i$ representa uma corrente elétrica entrante e $\ominus i$ uma corrente saliente do papel. Indique a figura que representa o campo magnético resultante no centro do triângulo.



Gabarito Fixação – Campo Magnético						
01	02	03	04	05	06	07
E	E	–	A	B	–	D
08	09	10	11	12	13	
A	D	D	B	–	A	

EFOMM – ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE - 2011

FARIAS BRITO

O MELHOR DO NORTE E NORDESTE NA MARINHA MERCANTE



1º LUGAR
DO NORTE E NORDESTE
BRÁULIO HENRIQUE



03 ALUNOS ENTRE OS CINCO PRIMEIROS DO NORTE E NORDESTE



1º LUGAR
BRÁULIO HENRIQUE



3º LUGAR
DANILO CARVALHO



5º LUGAR
JOSÉ DE OLIVEIRA

TESTE DE SELEÇÃO: 8 DE OUTUBRO

QUANDO VOCÊ ESCOLHE UMA
ESCOLA DE EXCELÊNCIA,
O MUNDO ESCOLHE VOCÊ.

A Melhor Escola do Ceará
1º NO ENEM

UNESCO
Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

ESCOLAS ASSOCIADAS DA UNESCO

ORGANIZAÇÃO EDUCACIONAL FARIAS BRITO
Lições para toda a vida.

www.fariasbrito.com.br