

## Magnetismo e Eletromagnetismo

### 1.1. Magnetismo

Há muitos séculos, como conta a história, um homem passeava pelas terras de uma região chamada Magnésia, Ásia Menor, onde hoje se localiza a Turquia, quando algo grudou no metal de sua sandália. Fora descoberto, ainda na Antiguidade, um tesouro tão precioso ou mais que o próprio ouro, ou que o próprio diamante. Afinal de contas, nós podemos viver sem ouro, mas certamente não teríamos chegado onde estamos sem a descoberta do minério denominado magnetita. Esse material foi utilizado pelos chineses como bússola por volta do século X.

Recebe o nome de magnetismo a propriedade que um material possui de atrair metais ferrosos. No início esses materiais provinham única e exclusivamente da magnetita. Atualmente, com todas as descobertas na área, temos materiais artificiais com maior eficiência magnética construídos em laboratório. A atração magnética que esses materiais exercem sobre materiais ferrosos é devido ao campo magnético invisível que existe ao redor deles.

São infinitas as aplicações dos materiais magnéticos e suas propriedades. Eles estão presentes desde a bússola até o mais avançado computador pessoal e é dever de todos os estudantes de máquinas elétricas ter conhecimentos mínimos sobre o assunto.

### 1.2. Ímã

Dá-se o nome de ímã aos materiais industrializados ou não, a partir da magnetita ou não, que possuem propriedades magnéticas. Mas de onde vem essa propriedade magnética? Como ela surge em um material?

Essa força magnética ou propriedade magnética vem da estrutura molecular do material, Figura 1.1. Quando as moléculas do material estão alinhadas, formando um só domínio, esse material possui propriedades magnéticas.

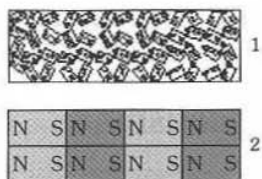


Figura 1.1

*No material não magnético<sup>1</sup> as moléculas estão desalinhadas, desorganizadas, enquanto no material magnético<sup>2</sup> elas estão perfeitamente organizadas.*

As características comportamentais de um ímã são conhecidas mundialmente, por uma infinidade de pessoas, mesmo sendo parte de um ramo da física. Vamos organizar esse conhecimento de modo a aproveitá-lo eficientemente mais adiante.

Um ímã possui dois polos, sendo o norte e o sul. Não importa em quantas partes esse material seja dividido. Até a última molécula desse domínio um pequeno pedaço continuará com dois polos, Figura 1.2. A nomenclatura dos polos foi estipulada considerando que um dos lados do ímã sempre aponta para o Polo Norte terrestre.



Figura 1.2

*O norte do ímã sempre indica a direção do norte geográfico da Terra.*

Este fato levou o cientista/médico inglês Willian Gilbert a publicar seus primeiros trabalhos, por volta de 1600 d.C., afirmando que a Terra comportava-se como um gigantesco ímã.

Um ímã, na presença de outro, pode comportar-se de duas maneiras: exercendo uma força de atração ou uma força de repulsão. Se os polos norte dos dois ímãs são aproximados, haverá uma força de repulsão. De igual modo, se os polos sul são aproximados, também haverá uma força de repulsão, Figura 1.3. Quando polos opostos dos dois ímãs são aproximados, ocorre uma força de atração.

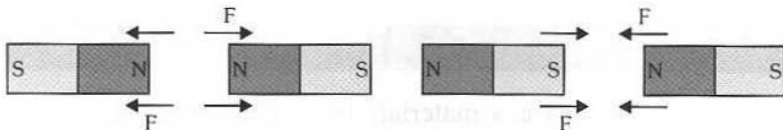


Figura 1.3

Como ocorre essa força de atração ou repulsão? Se observarmos as linhas em dois polos norte de dois ímãs, por exemplo, veremos que elas saem dos ímãs e em contraposição, se aproximarmos os dois ímãs, haverá repulsão.

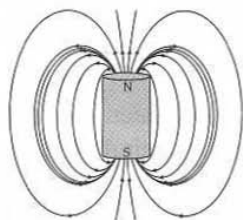


Figura 1.4

*As linhas de força ao redor de todo o corpo do ímã vão do polo norte para o sul. Note o aspecto tridimensional do campo.*

As linhas de força são invisíveis, mas um pequeno ensaio pode possibilitar a visualização do seu percurso. Com uma folha de papel, um ímã e um pouco de limalha de ferro é possível observar a presença das linhas de força em torno do ímã. Mantenha o ímã embaixo da folha com os polos na horizontal, espalhe uma pequena quantidade de limalha sobre a folha ao redor do ímã a partir das suas extremidades. A limalha deve se alinhar sob orientação das linhas de força do campo magnético do ímã, Figura 1.5.

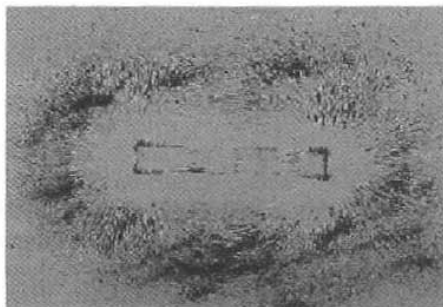


Figura 1.5

**Debate:** O ímã tem dois polos, norte e sul. O polo norte aponta na direção do norte geográfico da Terra, mas segundo os experimentos, isso seria impossível, já que polos iguais se repelem. Este questionamento é válido se pararmos a leitura, mas as linhas seguintes trazem outra possível resposta.

### 1.3. Magnetismo terrestre

Quando o cientista Gilbert iniciou seus estudos, ele deve ter se deparado com esta questão, ou o próprio questionamento em si deu início aos estudos.

Isso pode ser esclarecido com uma pesquisa profunda da vida e do trabalho de Gilbert, mas sem a pesquisa podemos deduzir que, séculos antes dos resultados dos trabalhos de Gilbert, a magnetita era utilizada pelos chineses como bússola, pois um dos lados sempre apontava na mesma direção, o norte. Por que não nomear o lado da magnetita que aponta para o Norte como Norte e o outro lado como Sul?

Após 1600 d.C., com novos fundamentos do magnetismo em mãos, a Terra passa a ser vista como um gigantesco ímã, mas seguindo os mesmos fundamentos, descobre-se que o norte geográfico está próximo do sul magnético desse ímã e o sul geográfico do norte magnético, Figura 1.6, o que justifica o comportamento da bússola. O que você acha?

Lembre-se também de que o norte e o sul geográficos são os dois extremos do eixo sob o qual a Terra realiza seu movimento de rotação.

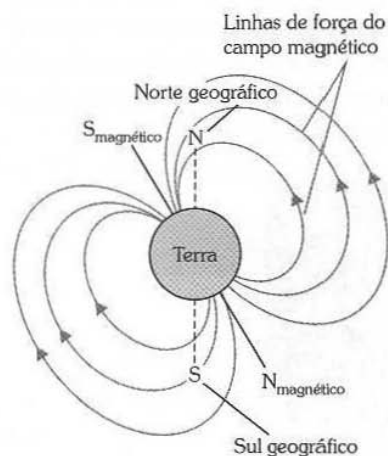


Figura 1.6

Observe a distância entre o norte geográfico e o sul magnético. É correto apontar a imprecisão da bússola, observando que há uma diferença de aproximadamente 30° no papel. Na realidade, a diferença entre o norte apontado pela bússola e o norte geográfico depende da sua posição na superfície da Terra, sendo a distância entre os dois cerca de 1.600 Km. Outro fato a considerar é sua inclinação na superfície terrestre. Exemplo: em Eureka, no Canadá, a inclinação atinge 98°. Para uma trilha na mata uma bússola é muito útil, mas para outras atividades, como navegação, a leitura da bússola comum deve ser acompanhada da leitura de uma **bússola de inclinação**, que mede a inclinação de sua posição na superfície. Colombo costumava ler "as estrelas" em conjunto com a bússola para navegar. Atualmente, o sistema GPS faz muito mais que isso.

Por que não é aconselhável realizar a leitura de uma bússola na vertical? Você já fez esta pergunta? Além da inclinação magnética, os futuros aventureiros devem estudar também a respeito da declinação magnética, que depende de fatores geológicos.

## 1.4. Associação paralela de ímãs

Se ímãs exatamente iguais forem postos lado a lado, temos duas situações possíveis:

- 1) **Paralelo:** os dois nortes se encontram e temos uma soma dos efeitos produzidos individualmente.
- 2) **Antiparalelo:** o norte de um dos ímãs coincide como o sul do outro. Neste caso um ímã anula o efeito do outro e vice-versa.

## 1.5. Magnetização

O ímã natural mais conhecido é a magnetita, mas por volta de 1820, o físico Francês Arago descobriu que o ferro também podia ser magnetizado. De fato, alguns profissionais da área de eletricidade e eletrônica podem testemunhar este fato. Hastes de chaves de fenda expostas durante algumas horas a um forte campo magnético adquirem a capacidade de atrair pequenos metais, como parafusos e prendedores de papel.

Isso ocorre porque as moléculas do material exposto são forçadas a se orientar segundo as linhas de força do campo magnético, permanecendo assim mesmo após cessada a força orientadora. A haste da chave de fenda agora tem um grande grupo de moléculas orientadas e adquire propriedades magnéticas como um ímã. Daremos nome a esse efeito mais à frente.

## 1.6. Desmagnetização

Para desmagnetizar um material, é preciso devolver a desordem às moléculas desse material. Duas maneiras rústicas conhecidas, para agitar as moléculas, podem ser utilizadas: aquecer o material a uma determinada temperatura até atingir a chamada **temperatura de Curie** ou bater no material, seguidas vezes, com uma marreta, provocando desestruturação e aquecimento.

Se preferir um jeito clássico, é preciso gerar uma força magnética de polaridade inversa à magnetizadora para produzir a desmagnetização. Claro que isso não será tão simples na prática como na teoria, mas pode ser feito.

Material	Ponto Curie
Ferro	770°C
Cobalto	1.140°C
Níquel	358°C
Magnetita	585°C

## 1.7. O gigantesco ímã e o calor em seu centro

Séculos atrás, a teoria de que a Terra comportava-se como um grande ímã foi introduzida no coração da humanidade. Juntando esta teoria às outras respostas experimentais alcançadas, chegamos a um grande impasse: o calor é um meio eficiente de desestruturar as moléculas em um material. Como, então, a Terra pode manter-se como um gigantesco ímã, tendo seu centro extremamente quente?

A resposta a esta pergunta foi dada por outras teorias, que não desmentiram Gilbert. A Terra de fato comporta-se como um ímã, mas um físico alemão, Karl Friedrich Gauss, por volta de 1850, mostrou que o campo magnético da Terra poderia originar-se de seu centro. Walter M. Elsasser, físico americano, em 1939, sugeriu que o campo magnético da Terra seria resultado das correntes geradas pelo movimento do núcleo líquido de ferro e níquel no seu interior.

## 1.8. Tipos de material

Com relação a propriedades magnéticas, na natureza podemos encontrar três tipos de material: ferromagnético, paramagnético e diamagnético. Os materiais ferromagnéticos são fortemente atraídos por ímãs. Dentre eles podemos citar ferro, aço, cobalto, níquel. Atualmente, devido ao interesse dos físicos por esses materiais ao longo dos anos, podemos encontrar ímãs artificiais, desenvolvidos com material ferromagnético, como os ímãs de alnico (liga de Al, Ni e Co), com esplêndida força magnética.

Os materiais paramagnéticos são fracamente atraídos por ímãs de grande poder magnético. Podemos citar como exemplos a madeira, o alumínio e a platina.

Os materiais diamagnéticos são aqueles ligeiramente repelidos por ímãs, por exemplo: ouro, cloreto de sódio, zinco, mercúrio.

## 1.9. Grandezas magnéticas e unidades de medida

Este tópico é extremamente importante, pois traz aos conhecimentos adquiridos anteriormente dimensão, isto é, trataremos das propriedades físicas dos ímãs, suas grandezas e unidades de medida. Encontramos unidades nos sistemas SI, CGS e MKS em manuais de fabricantes e livros didáticos.

Anteriormente nos referimos ao campo magnético do ímã, mas se tivéssemos de defini-lo, diríamos que é o espaço em que a força magnética atua. A forma desse campo é representada por linhas de campo que, conforme vimos em figuras anteriores, dirigem-se do polo norte para o polo sul do ímã. O

número total de linhas do ímã denomina-se "**fluxo de indução magnética**",  $\Phi$ , e sua unidade no Sistema Internacional é o weber (Wb). No CGS a unidade é o maxwell ( $1\text{Mx} = 10^{-8} \text{Wb}$ ).

As linhas ao redor do ímã, cortando o ar, encontram "resistência/oposição". Existem materiais com uma boa "condutividade" magnética, baixa "resistência" às linhas, e outros com uma péssima "condutividade" magnética, que oferecem "resistência".

A essa "condutividade" dá-se o nome de **permeabilidade magnética**,  $\mu$ . Essa unidade indica o grau de magnetização do material. No vácuo, a permeabilidade magnética vale:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} / \text{A} = 12,566 \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} / \text{A} \quad (\mu_r \approx \mu_0).$$

Pode-se deduzir que, se um material é ferromagnético, ele tem excelente permeabilidade magnética. A tabela a seguir traz a permeabilidade relativa de alguns materiais. Multiplicando esse valor pela permeabilidade no vácuo, obtém-se o valor de  $\mu$ .

Material	$\mu_r$
<i>Diamagnéticos</i>	
Ouro	$1 - 35 \cdot 10^{-6}$
Mercúrio	$1 - 12 \cdot 10^{-6}$
Prata	$1 - 20 \cdot 10^{-6}$
Água	$1 - 175 \cdot 10^{-6}$
Zinco	$1 - 10 \cdot 10^{-6}$
<i>Paramagnéticos</i>	
Alumínio	$1 + 22 \cdot 10^{-6}$
Paládio	$1 + 690 \cdot 10^{-6}$
Platina	$1 + 330 \cdot 10^{-6}$
Oxigênio	$1 + 1,5 \cdot 10^{-6}$
<i>Ferromagnéticos</i>	
Cobalto	60
Níquel	50
Ferro fundido	30 a 800
Aço	500 a 5000
Ferro para transformador	5500
Ferro muito puro	8000
Metal um (Ni+Cr+Cu+Fe)	100000

A permeabilidade é calculada, utilizando a tabela ao lado, da seguinte forma:

$$\mu = \mu_r \times \mu_0$$

Se o material ferromagnético utilizado for chapa de ferro de excelente qualidade, teremos:

$$\mu_r = 8000$$

No vácuo  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} / \text{A}$

Portanto,

$$\mu = \mu_r \times \mu_0$$

$$\mu = 0,010 \text{T} \cdot \text{m} / \text{A}$$

Observação: Valores para o SI.

Uma grandeza importantíssima é a **densidade de fluxo magnético ou, simplesmente, indução magnética B**. Essa grandeza expressa o número de linhas de fluxo por seção/área. Com ela é possível justificar por que o campo magnético em um ímã é maior nas extremidades. Sua unidade de medida no SI é o tesla (T), no CGS é o gauss ( $1G = 10^{-4}T$ ).

O fluxo magnético pode ser calculado pela equação:

$$\Phi = B \times A$$

Em que:

- B é a densidade de fluxo em weber/m<sup>2</sup> ou tesla
- A é a área da superfície estudada em m<sup>2</sup>
- $\Phi$  é o fluxo em weber

No CGS:

- B - gauss
- A - cm<sup>2</sup>
- $\Phi$  - maxwell

A força de atração de um ímã pode ser aproximadamente calculada pela equação seguinte e depende da densidade de fluxo B e da seção transversal A do ímã (unidades do CGS):

$$F(N) = \frac{B^2(G) \times A(\text{cm}^2)}{2549400} \Rightarrow \frac{1}{10000^2} \times \frac{1}{10000} \times \frac{B^2(G) \times A(\text{cm}^2)}{2 \times \mu_{\text{ar}}}$$

Sendo:

- F em newtons
- B em gauss
- A em cm<sup>2</sup>

Na equação original temos B em tesla, área em m<sup>2</sup>. Como ímãs comerciais utilizam gauss e cm<sup>2</sup>, a equação é adaptada, conforme demonstrado anteriormente. Considere  $\mu_{\text{ar}} = 12,747 \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A}$  (aproximadamente  $\mu_0$ ).

**Aplicação:** A força aproximada de um ímã cilíndrico de neodímio de 1 cm<sup>2</sup> de área e 12000 gauss é de 56,5N, aproximadamente 5,8 Kgf.



## 1.10. Eletrostática

Este livro não trabalha eletrostática, mas foi acrescentado este tópico devido à estreita ligação entre efeitos magnéticos e efeitos entre cargas elétricas. Também é verdade que numa visão microscópica temos efeitos eletrostáticos em diversas situações em máquinas elétricas, mas isso é algo complexo demais para o propósito deste livro, então vamos nos limitar a algumas informações preciosas com relação a este assunto.

Alguns conceitos no estudo do campo elétrico são parecidos com os conceitos do magnetismo, como atração e repulsão entre cargas e o meio de interação entre cargas elétricas, mas é outro ramo da física, fundamentado no estudo dos elétrons, enquanto o magnetismo estudado até aqui está fundamentado na teoria dos **domínios** (molecular).

Ao estudarmos eletromagnetismo, como o próprio nome da ciência diz, existe a possibilidade de a indução magnética agir sobre cargas elétricas no material e veremos que cargas elétricas em movimento dão origem a um campo magnético. Enfim, são três os campos diferentes: campo magnético, campo elétrico e campo eletromagnético. Pense sobre isso.

## 1.11. Eletromagnetismo

Séculos se passaram. A eletricidade foi descoberta e começou a ser objeto de curiosidade dos cientistas e estudiosos da época. Alessandro Volta construiu a primeira pilha elétrica, André Marie Ampère iniciou suas teorias sobre a corrente de elétrons, entre outras atividades importantes da época.

Por volta de 1820, o físico dinamarquês Hans Cristian Orsted fez um experimento simples que certamente foi o ponto de partida para a evolução tecnológica que alcançamos hoje. Orsted queria provar a relação entre a corrente elétrica e o magnetismo. Ele deve ter observado alguma alteração da indicação de uma bússola, a qual estava próxima de um circuito elétrico. Para provar a relação entre eletricidade e magnetismo, ele se utilizou de um circuito parecido com o representado na Figura 1.7:

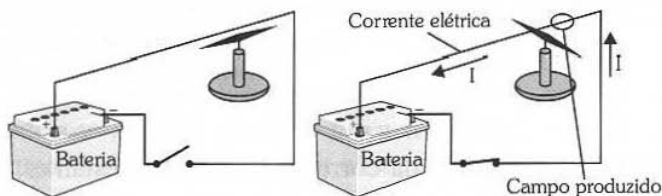


Figura 1.7

Quando o interruptor é acionado, uma corrente elétrica percorre o condutor no sentido eletrônico do – para o +. Uma bússola apontando o norte e com a agulha paralela ao condutor perdeu totalmente a sua orientação ao ser acionado o interruptor. Esse experimento de Orsted deu origem a um dos importantes fundamentos do eletromagnetismo: quando por um condutor circula uma corrente de elétrons, surgem ao redor desse condutor linhas de campo magnético, Figura 1.8. Faltava definir a orientação do campo ao redor do condutor.

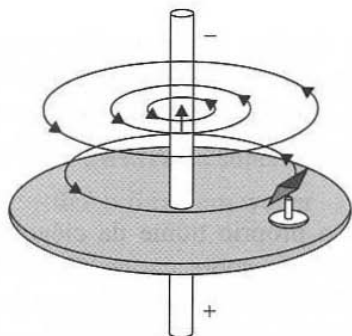


Figura 1.8

*Na Figura 1.8 utilizamos o sentido convencional da corrente elétrica. Para o sentido eletrônico, real, inverte a polaridade, o sentido da corrente e a direção do campo ao redor do condutor.*

O físico francês André Marie Ampère, que continuou a desenvolver estudos da relação entre eletricidade e magnetismo, em 1826, lançou uma teoria em que, segundo ele, todos os fenômenos elétricos, do magnetismo terrestre ao eletromagnetismo, derivam de um princípio único, que é a ação mútua de correntes elétricas. Grande sujeito!

Do trabalho de Ampère surgiu a lei de Ampère, a regra da mão direita para o sentido convencional e a regra da mão esquerda para o sentido eletrônico da corrente, que permitem, finalmente, definir um sentido para o campo magnético ao redor do condutor percorrido por uma corrente elétrica, Figura 1.9.

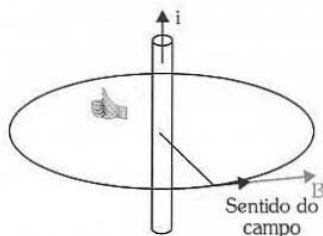


Figura 1.9

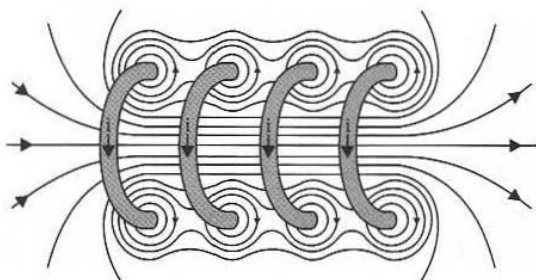
*É importante salientar que, enquanto a corrente "i" for fixa, o campo magnético "B" existirá, mas não será variável, portanto só há variação do campo eletromagnético se a corrente variar. Veremos a importância deste conceito mais adiante, quando tratarmos do segundo fundamento mais importante do eletromagnetismo.*

O polegar indica o sentido da corrente e os dedos restantes, o sentido do campo magnético.

## 1.12. Bobinas ou indutores

Podemos definir como bobina ou indutor um dispositivo constituído de fio magnético esmaltado, enrolado em forma de espiras, em volta de um núcleo. Em alguns indutores esse núcleo pode ser o próprio ar.

A finalidade da construção de indutores pode ser vista na Figura 1.10.



*Observe que a bobina representada tem como núcleo o próprio ar. Existem situações em que a permeabilidade do ar não é suficiente para o efeito desejado da bobina, então recorre-se a um núcleo com melhor permeabilidade.*

Figura 1.10

Ao redor de cada condutor ou espira que forma o indutor, quando há passagem de uma corrente de elétrons, surge um campo magnético. Fica claro, na figura, que os campos magnéticos individuais se associam, formando o campo magnético total da bobina. Observando a Figura 1.10, tente determinar os polos magnéticos da bobina. Utilize o sentido convencional para a corrente e a regra da mão direita. Lembre-se de que as linhas vão do norte para o sul.

Podemos calcular a intensidade do campo magnético produzido por uma bobina com a fórmula:

$$H = \frac{N \times I}{l} \quad N \times I = H \times l$$

Sendo:

- $N$  = número de espiras
- $I$  = corrente elétrica em A
- $H$  = intensidade do campo em Ae/m (ampère-espira por m)
- $l$  = perímetro do meio magnético em m

A força magnetomotriz, fmm, é a dada por  $N \times I$ , portanto a intensidade do campo pode ser definida como a força magnética dividida pelo comprimento do campo ou bobina. É correto observar que quanto menor o comprimento da bobina, mais concentrado o campo e maior a intensidade. Se

quisermos uma bobina maior, para manter o mesmo campo, temos de aumentar o número de espiras ou a intensidade da corrente.

Podemos também calcular a indução magnética em uma bobina pela equação:

$$B = H \times \mu \quad B = \frac{N \times I \times \mu}{l}$$

Sendo:

- B = indução magnética em tesla
- I = corrente elétrica em ampère
- $\mu$  = permeabilidade (T·m/A)
- l = perímetro do circuito magnético em m

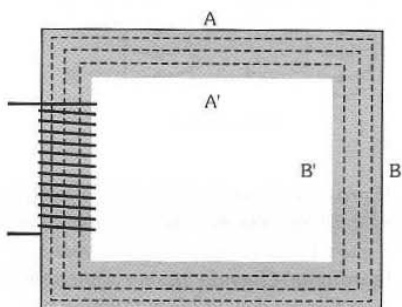
A intensidade do campo H produzida não depende do meio, mas a densidade de fluxo B ou indução magnética sim, sendo utilizada a permeabilidade  $\mu$  em sua fórmula.

Em eletricidade aprende-se que a corrente elétrica procura sempre o melhor caminho, ou com menor resistência, por isso os condutores de eletricidade possuem baixíssima resistência. Inclusive, cientistas já desenvolveram o supercondutor.

As linhas de força do campo magnético seriam melhor aproveitadas, produzindo maior indução, se atravessassem um meio melhor que o ar, com maior permeabilidade (condutividade magnética). É onde entram as chapas de ferro que formam o núcleo dos transformadores, o interior dos motores e os núcleos de ferrite de indutores utilizados em equipamentos de transmissão, entre outros.

### 1.13. Perímetro médio do meio magnético

Para tornar o cálculo de densidade o menos impreciso possível, geralmente se faz uso do cálculo do perímetro médio do circuito magnético. Isso pode ser melhor observado com um exemplo simples. Suponhamos um meio magnético com a seguinte configuração:



$$A = 30 \text{ cm externo}$$

$$B = 25 \text{ cm}$$

$$A' = 20 \text{ cm interno}$$

$$B' = 15 \text{ cm}$$

O perímetro médio seria a média da soma do perímetro interno com o externo.

$$P_{\text{int}} = (20+15) \times 2 = 70 \text{ cm}$$

$$P_{\text{ext}} = (30+25) \times 2 = 110 \text{ cm}$$

$$P_{\text{médio}} = 90 \text{ cm}$$

Calcula-se então B utilizando o perímetro médio.

**Exemplo:** Se  $N = 30$  esp,  $I = 2$  A, núcleo de aço com  $\mu_r = 700$ , teríamos  $B = 0,06$  T aproximadamente.

Este é um circuito magnético linear, pois não foi considerada a curva de magnetização do material, adotando-se uma permeabilidade constante. Nesse tipo de circuito calculamos B aplicando diretamente a equação dada, mas a maioria dos circuitos magnéticos depende das curvas magnéticas dos materiais, Figura 1.11.

## 1.14. Linhas de campo no ferro

Mantendo constante H, isto é, não alterando o número de espiras nem a corrente que passa através delas nem o comprimento da bobina, se introduzirmos um núcleo de ferro, a indução sofre acréscimo de acordo com a qualidade desse núcleo (maior permeabilidade). Em outras palavras, quanto menor o número de linhas desperdiçadas, maior a densidade. Veja as curvas da Figura 1.11.

Uma aplicação prática que comprova a melhor condução das linhas no ferro do que pelo ar é a construção de um pequeno eletroímã. Com cerca de cinquenta centímetros de fio esmaltado nº 21, um prego e uma bateria, pode-se construir um eletroímã experimental, Figura 1.12.

É preciso fazer duas observações. O eletroímã em questão é alimentado por uma fonte de corrente contínua, portanto não há problemas de indução de correntes parasitas no núcleo, que veremos adiante. A segunda observação é que temos um eletroímã ou um ímã a partir da eletricidade. Sendo um ímã, podemos e devemos determinar os seus polos magnéticos. Como fizemos com a bobina, devemos observar o sentido convencional da corrente e a partir deste determinar a extremidade em que as linhas de força saem e entram.

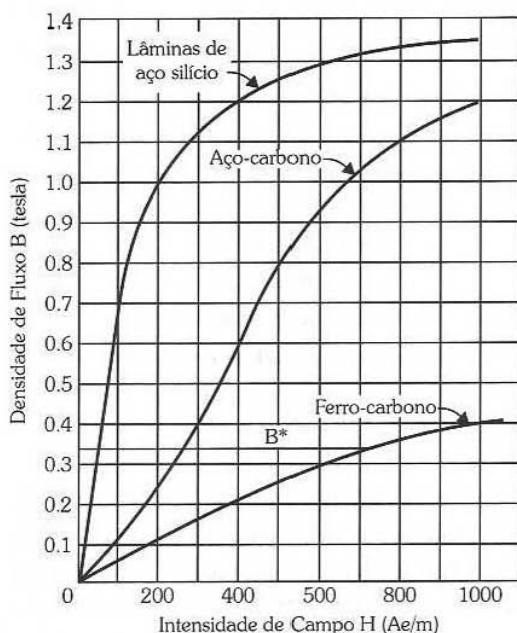


Figura 1.11

Para os valores iniciais de  $H$  a indução  $B$  sobe rapidamente, mas depois há uma curva acentuada e  $B$  praticamente é constante. Quando mesmo aumentando o fluxo a densidade magnética não aumenta mais, é porque o número de linhas de força por área no material atingiu seu máximo. Neste caso dizemos que o núcleo está saturado.

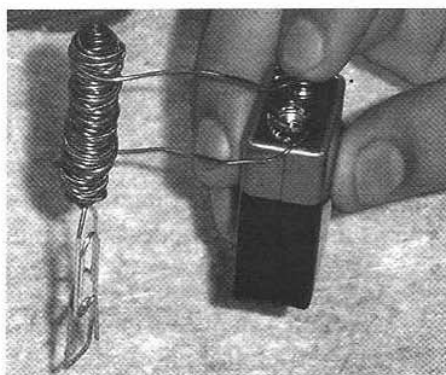


Figura 1.12

Enrole o fio em forma de espiras ao redor do prego, como na figura. Se retirado o núcleo de ferro, papel feito pelo prego, não haverá atração de nenhum dos prendedores de papel mostrados na figura, pois a indução magnética é reduzida. Lembre-se de que indução é o número de linhas por área e se fizermos uma comparação com a região magneticamente mais forte em um ímã, vamos notar que é onde as linhas mais se concentram.

Note que isso depende do sentido do enrolamento. Por exemplo, se o sentido do enrolamento for horário, do polo positivo para o negativo, na extremidade positiva temos o polo sul, Figura 1.3.

Outra regra é obter o norte apontado pelo dedo polegar da mão direita, enquanto os outros dedos seguem o sentido convencional da corrente. Para o sentido eletrônico utilize a mão esquerda.

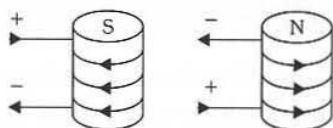


Figura 1.13

*Invertendo o sentido do enrolamento, invertamos os polos. A regra é: sentido horário do enrolamento, polo +, norte magnético.*

## 1.15. Saturação, remanescência e histerese

Quando o campo magnético em um material é aumentado até a sua saturação e em seguida reduzido, a densidade magnética  $B$  não acompanha a redução do fluxo  $H$ . Sendo assim, quando  $H$  chegar a zero, ainda existirá uma densidade magnética remanescente no material (remanescência ou remanência).

Para anular  $B$ , é necessário aplicar no material um campo magnético de polaridade oposta ao causador da remanescência inicial (**força coercitiva**). Aumentando o campo  $-H$  contrário, a remanescência positiva,  $Br +$ , vai até zero, mas o material se magnetiza com polaridade oposta se continuarmos a aumentar  $H$ , com densidade  $-B$ . Se atingida a saturação, há uma remanescência negativa, Figura 1.14. Se houver remanescência negativa, para eliminá-la o processo é o mesmo. É preciso aplicar um campo magnético  $H$  positivo até zerá-la.

O fato importante é que, enquanto aplicamos o campo para anular a remanescência, a densidade correspondente a esse fluxo ainda não existe, porque a remanescência provoca um atraso na densidade magnética. A este atraso entre  $H$  e  $B$  chamamos de histerese magnética.

A força coercitiva pode vir como qualidade do material, em que verificamos se ele tem maior ou menor **coercividade**.

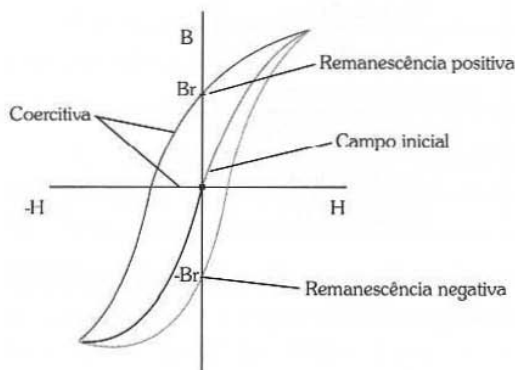


Figura 1.14

*Na figura observe que o campo inicial parte de 0 produzindo  $B$  de 0 ao final da curva. Ao aplicar campo magnético contrário  $-H$ ,  $-B$  correspondente a  $-H$  cresce apenas após anulada a remanescência  $Br$ . Isso se chama histerese.*

## 1.16. Relutância

A relutância pode ser definida como a oposição oferecida pelo conjunto formador do caminho magnético à "passagem" do fluxo magnético. Ela pode ser expressa pelas fórmulas seguintes, uma relacionando comprimento, permeabilidade e seção, e outra a força magnetomotriz e o fluxo.

$$R_m = \frac{l}{\mu \times S} \text{ Ae/Wb ou } R_m = \frac{F_{mm}}{\phi} = \frac{N \times I}{\phi}$$

sendo:

- $l$  - perímetro do meio magnético em m
- $\mu$  - permeabilidade do meio magnético T.m/A
- $S$  - área do meio magnético em m<sup>2</sup>
- $R_m$  - relutância em Ae/Wb

O fluxo em um circuito magnético pode ser determinado dividindo  $F_{mm}$  pela  $R_m$  total, semelhante à lei de Ohm.

## 1.17. Circuito magnético

No centro dessa quantidade de grandezas diferentes, é difícil fixar o sentido de cada uma delas rapidamente. Algo que pode ajudar, apesar de ser mais uma informação, é a construção de circuitos magnéticos equivalentes. Podemos estabelecer uma analogia entre circuito elétrico e circuito magnético para facilitar ainda mais o entendimento. Observe o seguinte quadro de grandezas:

<b>Eletrromagnetismo</b>	<b>Eletricidade</b>
Força magnetomotriz	Tensão elétrica
Intensidade de fluxo	Intensidade de corrente
Relutância	Resistência elétrica
Permeabilidade	Condutividade
Permeância	Condutância

Com as equiparações do quadro você seria capaz de montar um circuito elétrico que representasse o eletroímã da Figura 1.12.



## 1.18. Indução magnética

O primeiro fundamento do eletromagnetismo você já conhece e está ligado à passagem de corrente em um condutor que faz surgir, ao redor de todo condutor, linhas de campo magnético. Este fundamento é especialmente importante para entendermos como funcionam os eletroímãs e indutores de corrente contínua e começamos a dar a importância ideal aos fenômenos eletromagnéticos.

O segundo fundamento do eletromagnetismo leva a entender como funcionam os transformadores e os geradores elétricos. O fundamento trata do movimento de um condutor elétrico no interior de um campo magnético ou a movimentação de um campo magnético, tendo no seu interior um condutor elétrico.

Por volta de 1831, o cientista inglês Michael Faraday apresentou uma série de trabalhos em um volume intitulado "Pesquisas experimentais em eletricidade". Nesse material estavam os ensaios que comprovavam os fenômenos de indução.

Faraday havia descoberto que, ao aproximar um ímã de uma bobina conectada a um galvanômetro, mesmo sem bateria conectada ao circuito, havia o aparecimento de uma corrente elétrica. O mesmo acontece se aproximarmos a bobina do ímã, Figura 1.15.

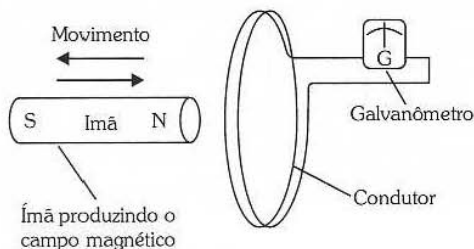


Figura 1.15

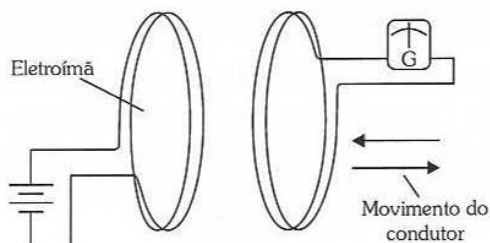
"Movimentando um condutor, próximo a um campo magnético, surge nas extremidades do condutor uma tensão induzida, que produz uma corrente induzida se o circuito for fechado."

A corrente induzida pode ser observada pela alteração no galvanômetro, mas cessado o movimento do condutor, cessa a indução de corrente.

O procedimento contrário também pode induzir corrente:

"Movimentando um campo magnético próximo a um condutor, surge nas extremidades do condutor uma tensão induzida, que produz uma corrente induzida se o circuito for fechado."

Você deve ter notado uma constatação universal: uma descoberta desencadeia outra. Assim é quando começamos a estudar eletricidade e magnetismo. Precisamos entender muito bem todos os conceitos para continuarmos a evoluir. Se desprezar algo ou deixar passar em branco, faltará mais à frente. O segredo é estudar, pesquisar, conversar sobre o assunto.



*Não houve problemas ao substituir o ímã por um eletroímã.*

Figura 1.16

Os próximos capítulos aplicam estes conhecimentos, associados a outros, para entender como certas máquinas funcionam. Por enquanto, não deixe de fazer os exercícios propostos neste capítulo.

Unidade	Símbolo	CGS	SI	Conversão
Fluxo magnético	$\Phi$	Maxwell	Weber	$1\text{Mx} = 10^{-8}\text{Wb}$
Densidade de fluxo	B	Gauss	Tesla	$(1\text{G} = 10^{-4}\text{T})$
Permeabilidade	$\mu$	Gauss/Oersted	$\text{T} \cdot \text{m} / \text{A}$	*
Relutância	$R_m$	$\text{A}/\text{Mx}$	$\text{A}/\text{Wb}$ ou $\text{H}^{-1}$	$\text{A}/\text{Mx} = \text{A}/10^{-8}\text{Wb}$
Campo magnético	* H	Oersted	$\text{Ae}/\text{m}$	$1\text{Oe} = 0,796\text{A}/\text{cm}$

*Quadro comparativo de unidades*

- 1) A intensidade H pode ser dada simplesmente em A/m;
- 2) No CGS, no vácuo,  $\mu_0 = 1$ , portanto  
 $1 \text{ gauss/oersted} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} / \text{A}$  ;
- 3) Industrialmente a permeabilidade pode ser encontrada em henry/m;
- 4) Permeabilidade no ar igual aproximadamente à do vácuo.

### Observação

Podem ser utilizados os dois sistemas (SI e CGS) para realização dos cálculos, tomando-se o cuidado de utilizar as unidades de um único sistema apenas nas fórmulas. Se necessário, faça a conversão antes. Em teoria o SI deveria substituir o CGS, mas muitas pesquisas e equacionamentos importantes foram realizados no antigo CGS, portanto é bom não estranhar ao se deparar com unidades do CGS ao consultar um livro antigo. Além disso, não se surpreenda se encontrar unidades quantitativamente iguais, mas com nomenclaturas diferentes em livros traduzidos.

## 1.19. Eletroímã em corrente alternada

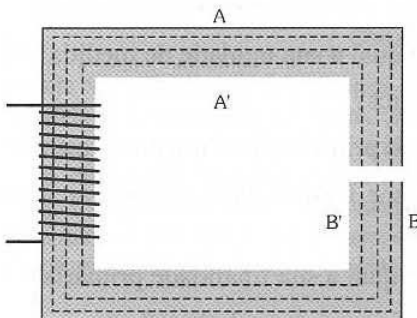
Muitos estudantes relatam que, ao construir eletroímãs e alimentá-los com corrente alternada, ocorre vibração na atração desse eletroímã exercida sobre uma lâmina de metal. Isso acontece porque a corrente alternada produz uma força magnética ou campo magnético no eletroímã pulsante. Essa pulsação é responsável pela vibração.

Para reduzir essa vibração excessiva, nos eletroímãs industrializados, como bobinas de contadores, por exemplo, pode-se encontrar anéis nas extremidades do núcleo de ferro. Nos anéis são induzidas correntes pelo campo principal, as quais produzem um campo defasado do campo principal, responsável pela força de atração entre as pulsações do campo principal. Esse campo derivado reduz satisfatoriamente a vibração sentida em um eletroímã em corrente alternada e justifica a utilização dos anéis.

## 1.20. Exercícios de fixação

- 1) Onde foi descoberto o primeiro mineral com propriedades magnéticas e qual o nome dado a ele?
- 2) Defina magnetismo.
- 3) De onde surge a propriedade magnética dos ímãs?
- 4) Descreva como acontecem as forças de atração e repulsão entre dois ímãs.
- 5) Como anular o campo magnético de um ímã?
- 6) Por que o norte da agulha da bússola aponta em direção ao norte geográfico da Terra?
- 7) Defina materiais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos.
- 8) O que é fluxo magnético e qual a sua unidade de medida no SI?
- 9) O que é densidade magnética e qual a sua unidade de medida SI?
- 10) O que é permeabilidade magnética?
- 11) Defina eletromagnetismo e o seu primeiro fundamento.
- 12) Descreva a experiência feita por Orsted para comprovar a relação entre eletricidade e magnetismo.
- 13) Que são bobinas ou indutores e qual a sua finalidade primária?
- 14) Qual a finalidade do núcleo de ferro em uma bobina?

- 15) Como determinar os polos magnéticos de um eletroímã? Faça um desenho que demonstre como executar esta tarefa, auxiliando sua resposta teórica.
- 16) Defina remanescência e histerese.
- 17) Quando ocorre a saturação do núcleo de ferro magnético de uma bobina?
- 18) Descreva indução magnética e seus fundamentos.
- 19) Calcule a força de atração de um ímã com as seguintes características:  
 $B = 2.000$  gauss, seção =  $2,5 \text{ cm}^2$ , ímã em forma de ferradura
- 20) Calcule o fluxo magnético em um ímã com as seguintes características:  
 $B = 0,5 \text{ T}$ ,  $A = 5 \text{ cm}^2$
- 21) Calcule a densidade magnética de uma bobina com as seguintes características:  
 $N = 1.000$  espiras,  $I = 5 \text{ A}$ ,  $L = 100 \text{ cm}$ , núcleo vácuo
- 22) Para o circuito magnético seguinte responda às questões:
- Se o material utilizado para construção do núcleo fosse aço silício e a bobina produzisse um fluxo magnético de  $200 \text{ Ae/m}$ , qual seria a densidade de fluxo? Utilize as curvas de magnetização da Figura 1.11.
  - Calcule o fluxo magnético total, considerando as dimensões do meio magnético e os dados apresentados no quadro ao lado da figura. (Calcule  $R_m$  total do circuito e utilize  $\Phi = F_m / R_m$ )
  - Calcule a densidade de fluxo total do circuito magnético utilizando os dados do quadro seguinte.



Dimensões:  $A = 40 \text{ cm}$      $B = 30 \text{ cm}$   
 $A' = 30 \text{ cm}$      $B' = 20 \text{ cm}$   
 Seção ou Área =  $100 \text{ cm}^2$

Meio ar:  $5 \text{ cm}$   
 $N = 1200$  espiras  
 $I = 1,7 \text{ A}$

Permeabilidade relativa do material  
 $\mu_r = 1700$   
 Permeabilidade do ar =  $\mu_0$