



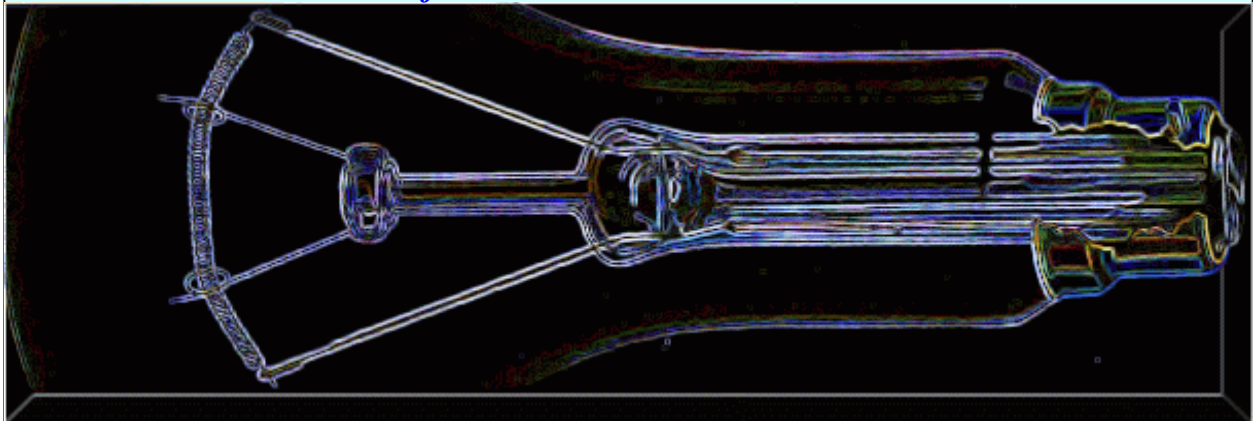
ESCOLA POLITÉCNICA / DCTM – UFBA

APOSTILA DE MATERIAIS ELÉTRICOS

Baseada no programa da disciplina Materiais Elétricos – ENG 105
do Curso de Engenharia Elétrica da UFBA

Versão 1.2 – Março 2002

Professor: Ronaldo F Cavalcante



A
p
o
s
t
i
l
a

USINA HIDRELÉTRICA

Usina Hidroelétrica de Xingo

Linha Transmissão 230/500 KV

Subestação da Usina Elevatória de Traição

SUBESTAÇÃO ELEVADORA 230,500 KV

SUBESTAÇÃO ABAIXADORA 138/69 KV

Linha de Sub-Transmissão 138/69 KV

SUBESTAÇÃO ABAIXADORA 138/69 - 13,8 KV

CONSUMIDOR RESIDENCIAL - Ligações típicas.

Subestação aérea em poste, trafo de 30 kva

M
a
t
e
r
i
a
l
e
s
-
E
l
é
t
r
i
c
o
s

APOSTILA MATERIAIS ELÉTRICOS - *CAPÍTULO VI*

MATERIAIS MAGNÉTICOS

1. INTRODUÇÃO

Atualmente há uma dependência do magnetismo na maioria dos equipamentos elétricos. Materiais como o ferro (principalmente), o cobalto, o níquel e suas várias ligas (ferro-níquel, ferro-cobalto, etc.) adquirem magnetismo permanente cuja aplicação é de grande importância para a Engenharia Elétrica.

Os estudos atuais da extensa gama de tipos de materiais magnéticos estão dirigidos para a redução nas dimensões dos equipamentos, minoração de perdas e saturação, do porque de alguns materiais serem magnetizáveis e outros não e o comportamento diferente desse tipos de materiais, entre outros estudos mais aprofundados.

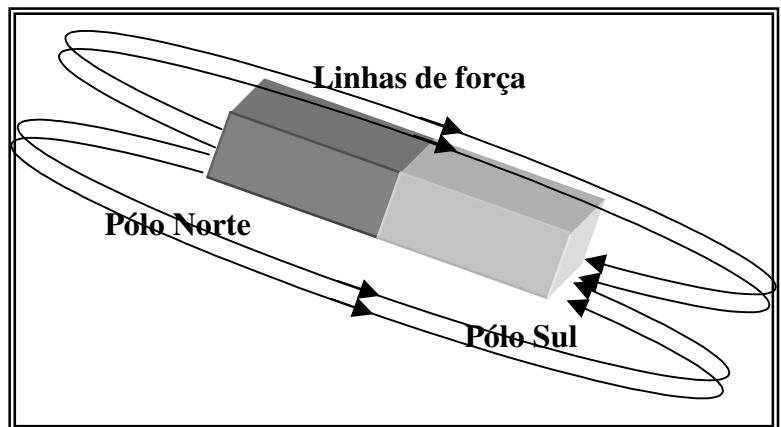
O **ferromagnetismo** é o resultado da importância comercial e histórica das propriedades magnéticas do ferro, cuja causa é originada na estrutura eletrônica dos átomos. Sabe-se que no máximo dois elétrons ocupam um nível de energia, mesmo nas estruturas cristalinas, e que estes possuem spins contrários com cada um se transformando em micro magneto com a devida polaridade norte e sul. Se um elemento não tem subníveis internos totalmente preenchidos, o total de spins estará desbalanceado pois o número de elétrons com um determinado spin é diferente do número com spin contrário causando um momento magnético global que, logicamente, não é nulo como nos elementos com todos os níveis preenchidos.

2. CONCEITOS - Revisão

2.1. Magnetismo

- Imãs naturais – MAGNETITA

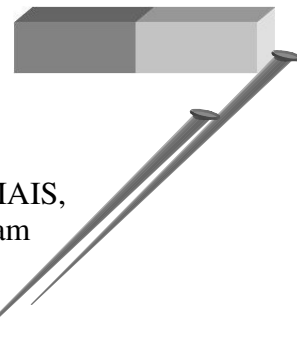
Descoberto na China por volta de 2600 A.C, depois conhecida pelos antigos Gregos, tinha o nome de “Pedra guia”. Era o Minério de Ferro chamado magnetita com muita ocorrência na região da Magnésia, Ásia Menor.



O campo magnético produzido por um ímã em forma de barra tem o aspecto da figura ao lado onde se indica os dois pólos NORTE e SUL . Quanto mais forte o ímã mais linhas de forças compõe o circuito fechado magnético.

Sendo um ímã natural com propriedade de atração do ferro, a magnetita pode transformar os pedaços de ferro em outros ímãs.

Um exemplo ao lado mostra o ímã atraindo um prego e este, transformado em outro ímã, atraindo outro prego.

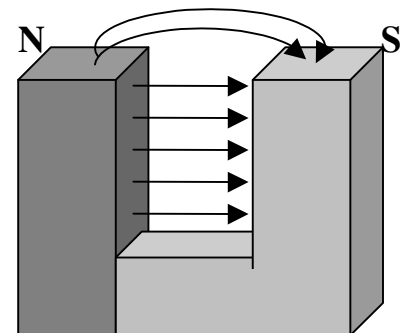
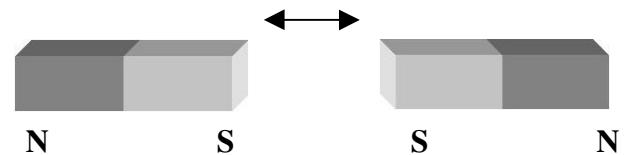
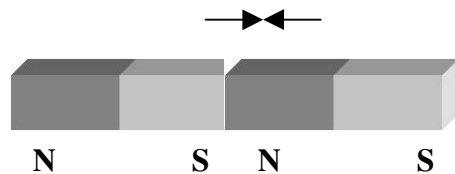


Os pedaços de ferro imantados, que são os **IMÃS ARTIFICIAIS**, possibilitou aos chineses inventarem a bússola, com a qual puderam se orientar nas viagens através do planeta, e mais tarde descobriram o magnetismo da própria Terra.

A TERRA então é outro imã natural. As linhas de forças saem do polo norte para o polo sul do imã terrestre.

A bússola acompanha as linhas de força da terra (magnética) Partindo-se um imã em qualquer número de pedaços, cada um deles será um novo imã com as mesmas propriedades do original. Vai daí que não se pode ter um imã com só um polo, como nas cargas elétricas que podem ser negativas ou positivas isoladamente. Porém a atração entre os imãs se dá igualmente às forças eletrostáticas:

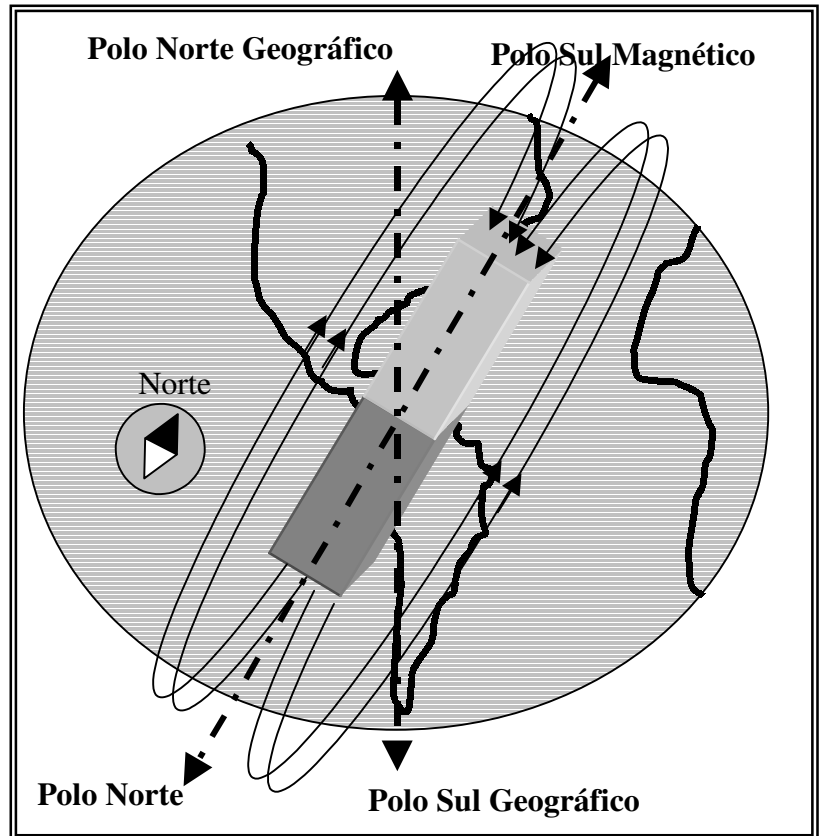
Pólos iguais se repelem e pólos diferentes se atraem.



Se tivermos um imã em forma de U, na região entre seus pólos, teremos um campo magnético uniforme:

Lembre-se: as linhas do campo de indução magnética geradas por Imã “nascem” no pólo norte e “morrem” no pólo sul dos ímãs .

A imantação ou magnetização é o processo para se transformar um determinado material em imã temporário ou permanente. Porém isso depende do material ser ou não megnetizável, uma vez que só se pode magnetizar poucos tipos de materiais.



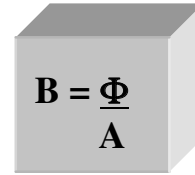
2.2. Fluxo Magnético (Φ)

É o conjunto de linhas de força de um campo magnético.

A unidade é o **WEBER (Wb)**. Um Weber equivale a **10⁸ linhas** de força. Como é uma unidade muito grande usa-se mais o micro weber (**μ Wb**)

2.3. Densidade de fluxo magnético (B)

É a quantidade de linhas de fluxo por unidade de área. Temos que no caso da área perpendicular ao fluxo.
 No Sistema Internacional a unidade é Weber por metro quadrado (Wb/m²) ou **TESLA (T)**



2.4. Permeabilidade magnética de um meio (μ)

É a capacidade de concentração do fluxo magnético desse meio (ar, vácuo, material) ou ainda, a maior ou menor facilidade com que o fluxo atravessa o meio.

Permeabilidade no vácuo (μ₀) : μ₀ = 4 π x 10⁻⁷ **unidade: Tm/Ae**
Permeabilidade relativa (μ_R) : **O quanto μ_R é maior que μ₀**
Permeabilidade no material (μ) : μ = μ_R · μ₀

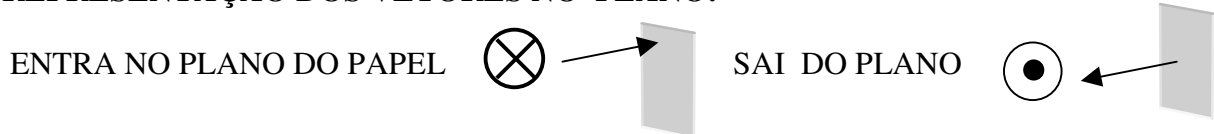
A permeabilidade absoluta de um meio se obtém a partir do vácuo e a permeabilidade relativa.
 Se por exemplo o meio for a água, μ_R < 1 , logo μ < 1
 Se o meio for o ferro puro, μ_R = 8.000, logo μ = 8.000 x 4 π x 10⁻⁷

2.5. Campo magnético

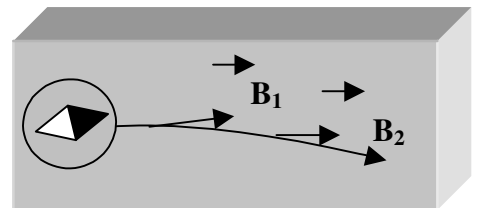
Se for colocado um pedaço de cartolina ou papelão fino sobre um imã de barra, espalhando-se limalha de ferro uniformemente sobre o papelão, teremos o formato das linhas de força que emergem do imã, conforme figura ao lado, formando o que se chama CAMPO MAGNÉTICO. Esse campo é semelhante ao Campo Gravitacional e o Campo Elétrico, ou seja, uma região do espaço com características especiais. Em todos eles teremos os vetores (módulo, direção e sentido) representativos desses campos.

No campo gravitacional temos que em qualquer ponto nas proximidades da Terra o vetor aceleração da gravidade é a relação entre a força peso e a massa ($\vec{g} = \vec{F} / m$)
 O campo elétrico é a relação entre a força de atração e a carga colocada em algum ponto do campo ($\vec{E} = \vec{F} / q$)

REPRESENTAÇÃO DOS VETORES NO PLANO:



Já no caso do Campo Magnético o **vetor campo magnético** ou **indução magnética**, que é tangente às linhas de indução em cada ponto, e tem o mesmo sentido de uma bússola colocada nesse ponto, não se pode fazer uma analogia perfeita com os outros casos por não existir só um tipo de carga (positiva ou negativa) ou massa equivalente. Porém os estudos do **ELETROMAGNETISMO**, que associa a eletricidade e o magnetismo demonstram interação entre o campo magnético e cargas elétricas ou correntes elétricas.



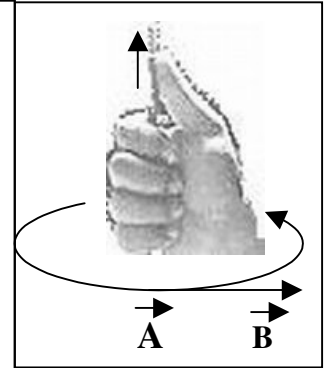
2.6. Eletromagnetismo

Experiência de Oersted

Experiências realizadas por Oersted, observando que um condutor atravessado por uma corrente elétrica atraía a agulha de uma bússola, levaram-no a concluir que cargas elétricas em movimento produzem no espaço um campo magnético.

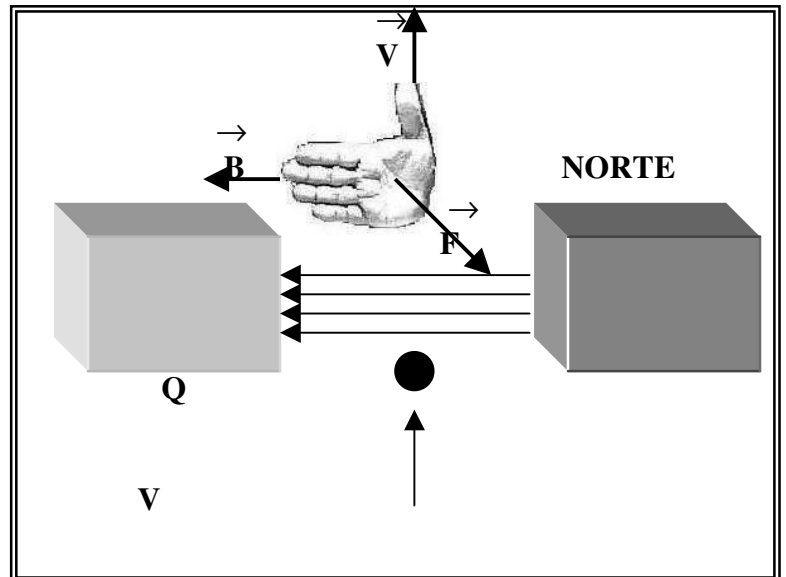
Consideremos um condutor retilíneo atravessado por uma corrente i ; num ponto A a direção do vetor indução magnética será perpendicular ao plano determinado pelo fio e o ponto A.

O sentido do vetor B é dado pela 1ª regra da mão direita: envolvemos o condutor com a mão direita de tal forma que o polegar coincida com o sentido da corrente; girando a mão ao redor do condutor, os demais dedos nos dão o sentido de B .



Vamos considerar então um campo magnético uniforme (tem o mesmo valor em qualquer ponto) produzido por um ímã e uma carga elétrica no interior do mesmo.

Se a carga Q permanecer parada, nada acontece, porém se ela for impulsionada com uma velocidade V , no sentido perpendicular às linhas de força do campo B , agirá sobre ela uma força F com direção perpendicular ao plano formado por B e V , e sentido conforme a segunda regra da mão direita, ou regra do “tapa” representada na figura ao lado.



Verificou-se então que o módulo de F é diretamente proporcional ao campo, à velocidade e à carga. Logo :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{V} \cdot \vec{B}$$

Evidente que se a carga for lançada em uma direção fazendo um ângulo (a) com a direção do campo, teremos

$$\vec{F} = q \cdot \vec{V} \cdot \vec{B} \cdot \sin a$$

Da expressão acima tiramos então o módulo do vetor intensidade de campo magnético:

A unidade é o Newton por Coulomb vezes metro por segundo, ou **TESLA**.

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{q \cdot \vec{V}}$$

Exemplo: Uma carga de seis micro coulomb é lançada em um campo magnético de cinco décimos de Tesla, com a velocidade de cem metros por segundo, na direção perpendicular ao campo. Calcule a força que atua na mesma. (Resp. $3,0 \times 10^{-4}$ N)

2.7. Relação entre a força causada pelo campo magnético e a força centrípeta.

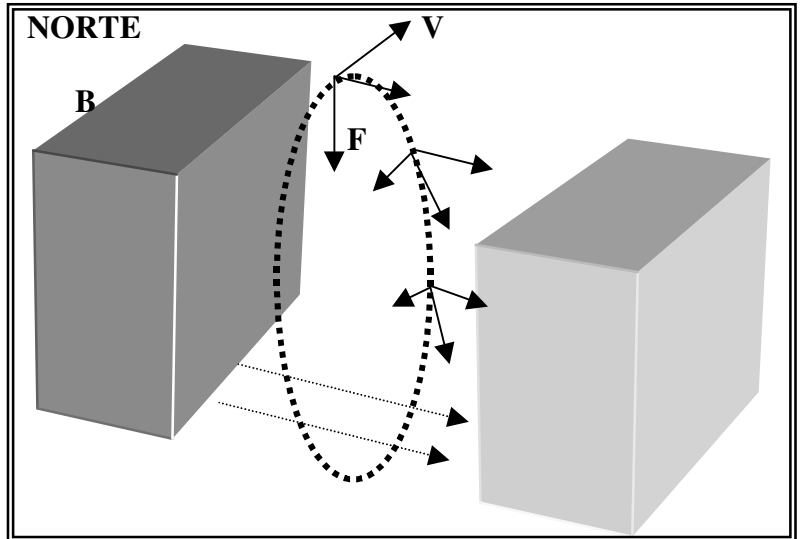
Considerando-se uma carga elétrica Q lançada com uma velocidade V numa direção perpendicular a um campo magnético B , a mesma sofre a influência da força $F = Q.V.B$ conforme visto anteriormente.

Apenas o vetor V muda de direção e sentido devido a força F que é sempre perpendicular a ele. Sendo F constante e atuando perpendicular à velocidade do móvel, resulta então em um movimento circular uniforme cujo raio é R . É exatamente o que acontece com a Força Centrípeta cujo módulo vale: $F_c = M.V^2 / R$

Como são forças equiparáveis, temos então: $F_c = F$, logo:

$$Q.V.B = M.V^2 / R \Rightarrow B.Q = MV / R$$

Temos então o raio da circunferência descrita pelo movimento de uma partícula carregada em um campo magnético uniforme.



$$R = \frac{MV}{BQ}$$

2.8. O campo magnético e a corrente elétrica

Agora vamos considerar em vez de uma carga, várias cargas em movimento dentro de um campo magnético, como por exemplo, um condutor no qual atravessa uma corrente elétrica i .

A determinação da direção e sentido de F é feito usando a mesma regra da mão direita anterior (tapa), usando em vez da velocidade, a corrente no polegar.

No cálculo do módulo de F temos que

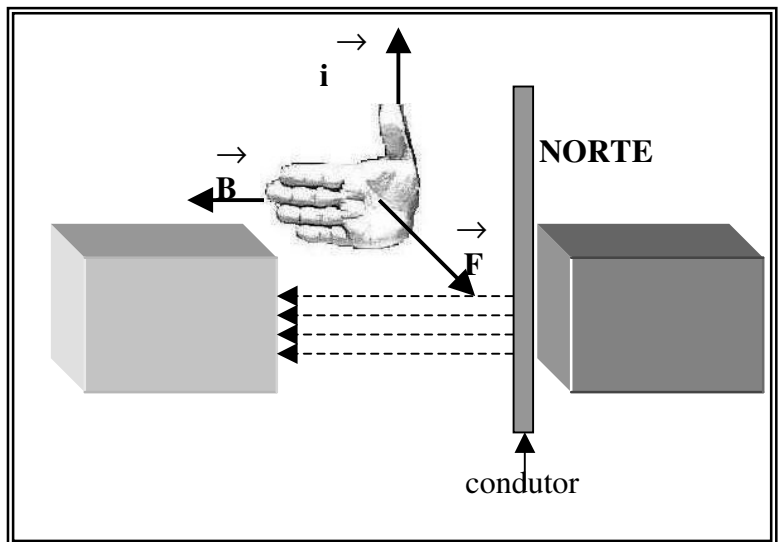
$$F = B.i.L \text{ sen}\theta$$

Para uma carga. Como a corrente são muitas temos que $i = \Delta q / \Delta \tau$ substituindo vem:

$$F = B.q.v \text{ sen}\theta$$

Se considerarmos o trecho L do condutor imerso no campo, calculamos a velocidade das cargas nesse trecho e substituímos na fórmula da força $v = L/\Delta \tau$ e teremos finalmente

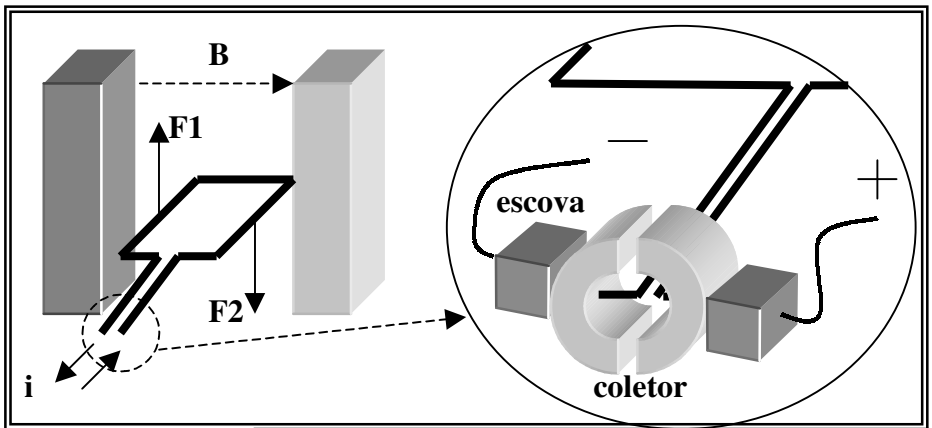
Da mesma maneira que foi visto para a carga isolada, se o condutor estiver no mesmo sentido do campo, a força será nula.



$$F = B . i . v . \Delta \tau \text{ sen}\theta$$

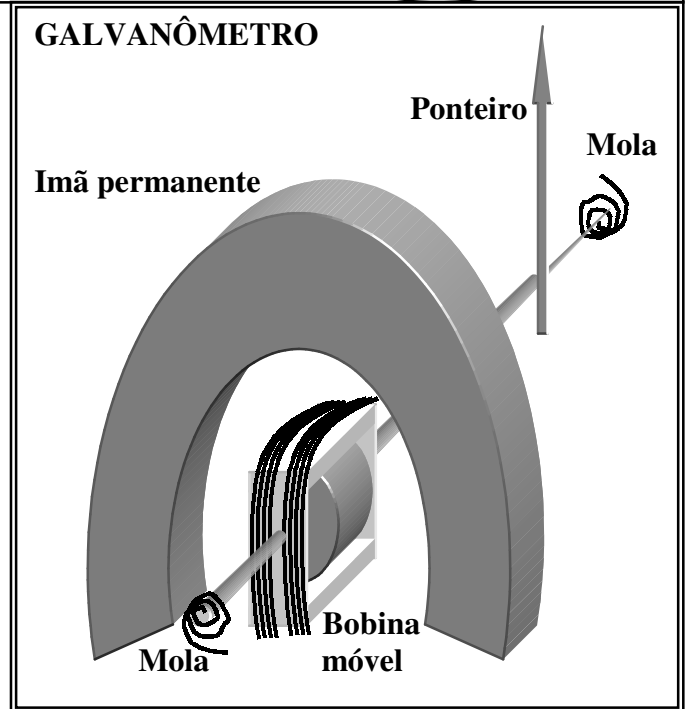
2.9. Efeito motor

Uma espira, que é um condutor enrolado em forma de anel, é imersa em um campo magnético uniforme de intensidade B (figura ao lado). Faz-se atravessar uma corrente nesse circuito fechado, através de escovas



condutoras e contatos móveis (coletores) seccionados de maneira a permitir que essa corrente venha a fluir sempre numa mesma direção. Essa bobina, fixada em um eixo que permita sua livre rotação, sofre o efeito do momento de forças $F1$ $F2$ mantendo assim uma rotação contínua. É o **EFEITO MOTOR** em que está baseada a grande parte dos motores elétricos.

A mesma propriedade é utilizada para a construção de galvanômetros (medidores de corrente) ou medidores de bobina móvel, conforme vemos na figura ao lado, onde a mola se opõe ao efeito do momento da força



2.10. A corrente elétrica gerando campo magnético

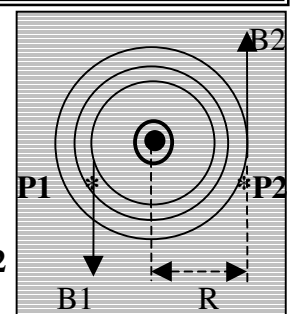
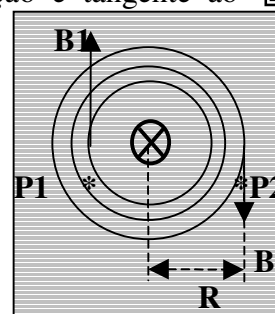
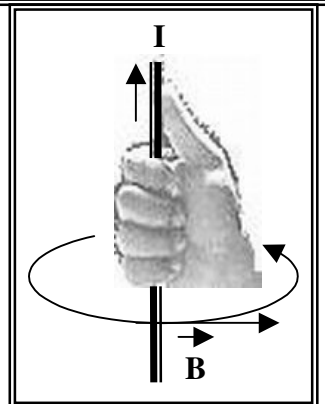
É exatamente o inverso do que foi visto anteriormente: Uma corrente elétrica percorrendo um condutor (um fio, por exemplo) e gerando um campo magnético. Como foi visto anteriormente na experiência de Oersted, um condutor atravessado por uma corrente elétrica, gera em torno de si mesmo um campo magnético cuja direção e sentido é conhecido pela regra da mão direita, demonstrada na figura ao lado.

Um fio de comprimento infinito, por onde passa uma corrente intensa, atravessando um plano, conforme figura, permite o aparecimento de círculos concêntricos de campo de força cuja direção é tangente ao círculo que passa pelo ponto considerado.

O módulo desse campo é obtido por meios experimentais e é diretamente proporcional a corrente e inversamente proporcional ao raio.

$$B = K i/R$$

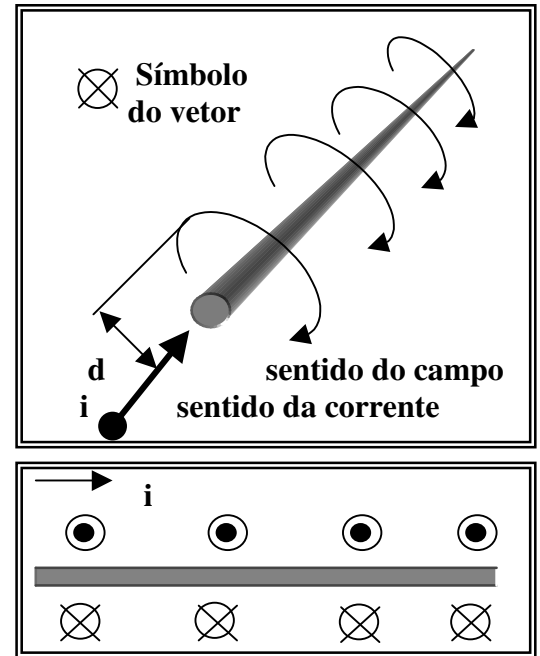
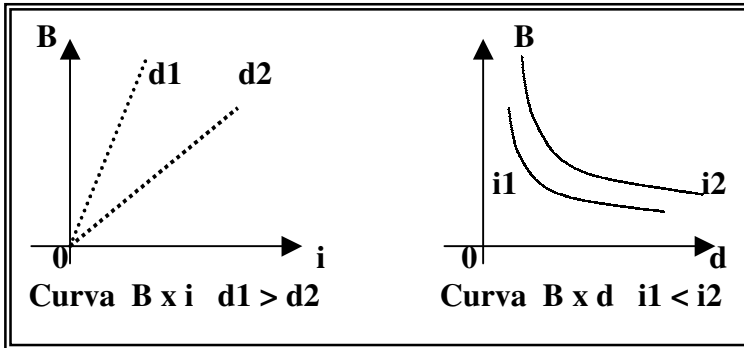
A constante $K = \mu / 2 \pi$ e $\mu = 4 \pi \times 10^{-7}$ (vácuo), logo: $K = 2,0 \times 10^{-7}$ sendo μ a permeabilidade magnética do meio.



Então, a constante $K = 2 \cdot 10^{-7}$ o que torna a expressão
 No caso de condutor de comprimento infinito e no vácuo.

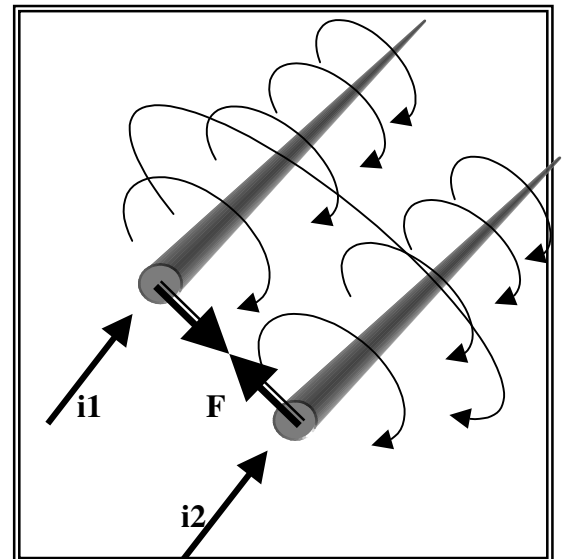
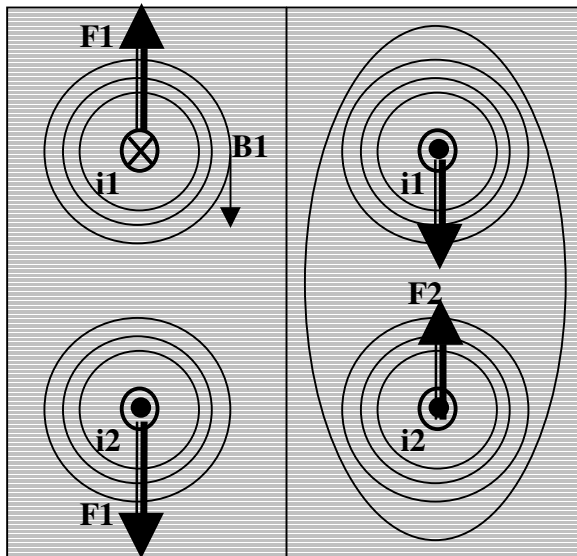
$$B = 2 \cdot 10^{-7} \cdot i / R$$

Vemos na figura ao lado os parâmetros principais tais como: sentido da corrente, sentido do campo, distância do centro ao ponto considerado e a simbologia dos vetores em plano bidimensional.
 Abaixo vemos os gráficos $B \times i$ e $B \times d$



2.11. Corrente em condutores em paralelos

Quando dois condutores em paralelo são percorridos por correntes elétricas, existirão entre eles forças, devido aos campos magnéticos gerados por aquelas correntes em cada condutor, que serão atrativas ou repulsivas entre si, a depender do sentido de cada corrente.



É o mesmo que acontece com o efeito motor explicado no capítulo anterior. Se as correntes estiverem no mesmo sentido, as forças serão atrativas, e vice-versa, como mostra o esquema abaixo
CÁLCULO DA FORÇA. – Considere na figura acima o campo B_1 gerado por i_1 interagindo com o condutor onde passa a corrente i_2 de mesmo sentido que i_1 .

Como já foi visto, $F = B_1 \cdot i_2 \cdot L \cdot \sin\theta$. Mas $\theta = 90^\circ$, logo $F = B_1 \cdot i_2 \cdot L$. Temos $B_1 = K \cdot i_1 / d$
 Substituindo o campo na fórmula da força para cada condutor teremos:

$F = (K \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot L) / d$ ou $F = \mu / 2 \pi \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot L$ ou
 No caso, uma força de atração devido ao sentido das correntes

$$F = \frac{2,0 \times 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot L}{d}$$

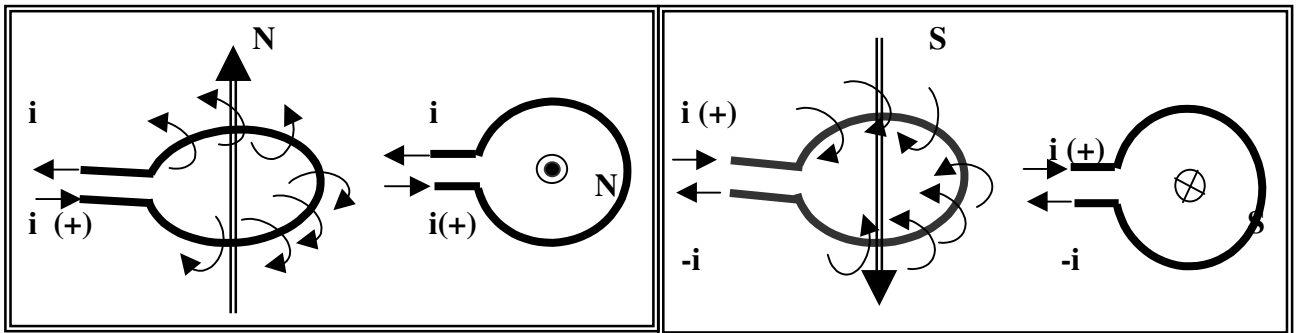
A partir dessa propriedade é que mais tarde foi definida o AMPÈRE como unidade de medida de corrente elétrica:

AMPÈRE é a corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de espessura desprezível e comprimento infinito, separados por uma distância de 1 metro, gera em cada um desses condutores, uma força de 2×10^{-7} newtons por metro de comprimento.

2.12. Espiras e enrolamentos

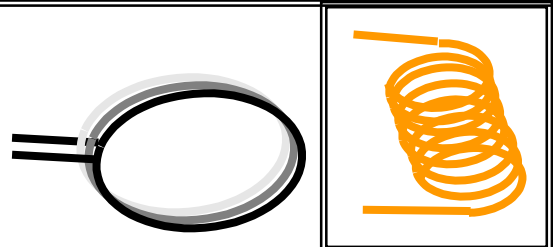
Se dobrarmos um fio condutor em forma de anel ou laço teremos o que se chama de ESPIRA pois vem do termo espiral. Considerando que ao passar a corrente num condutor retilíneo é gerado um campo magnético circular podemos imaginar então que ao passar a corrente em um condutor circular (espira) campo seja concentrado retilíneo, como o de um ímã cuja polaridade depende do sentido da corrente elétrica que, por convenção é positiva no sentido de entrada da espira.

É o que realmente acontece sendo que as linhas de força dentro da espira ficam mais concentradas como vemos na figura abaixo.



CAMPO DE UMA ESPIRA :
 Para N espiras: $B = \mu i / 2R$

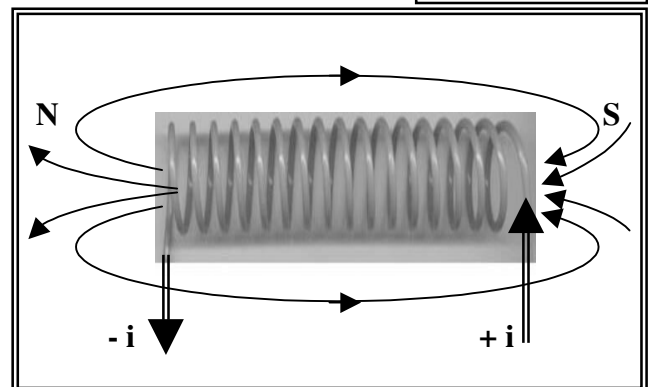
$$B = \mu \cdot i / 2.R$$



2.13. Bobina ou enrolamento

É um conjunto de espiras enroladas, e isoladas, sobre uma forma com núcleo de ar ou de algum material ferro-magnético, que contribui para aumentar a densidade do Fluxo Magnético.

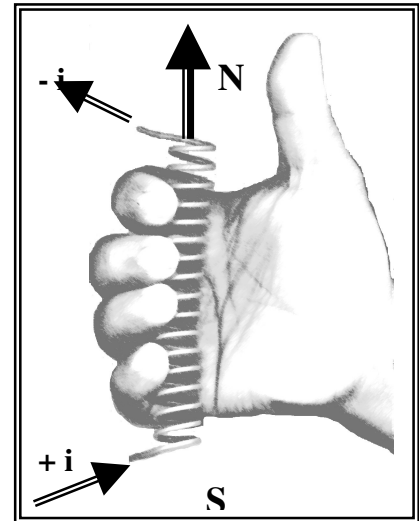
Esse tipo de enrolamento, também chamado de SOLENÓIDE, quando submetido a uma corrente elétrica, transforma-se em um ímã temporário e é usado nas mais diversas aplicações da engenharia elétrica. O campo magnético gerado é uniforme, tem a direção do eixo



geométrico do mesmo e orienta-se de sul para norte (nasce no norte). O sentido desse campo depende do sentido da corrente e do tipo de enrolamento. Ver figuras ao lado.

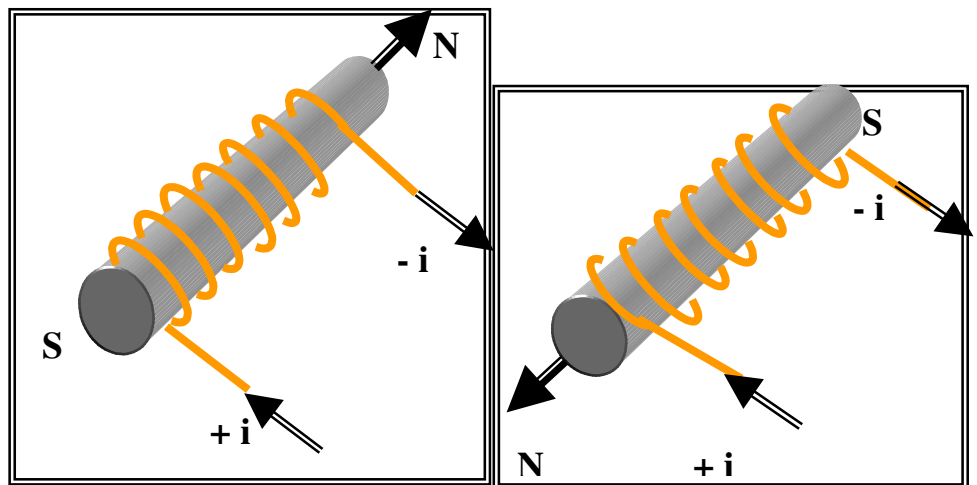
Para determinar o sentido do campo de uma bobina ou solenóide, recorre-se a mesma regra da mão direita usada para o condutor retilíneo (ver figura ao lado).

Segurando-se a bobina com a mão direita de maneira que os quatro dedos acompanhem o sentido da corrente, e o polegar estendido, conforme figura, então o Norte estará no sentido indicado pelo polegar.



Lembrar que o sentido da corrente contínua será sempre o convencional, ou seja, a corrente que entra estará vindo do polo positivo da fonte.

Observe que se o sentido da corrente for trocado, o sentido do campo também o será, assim como se for mudado o sentido do enrolamento, como mostra a figura

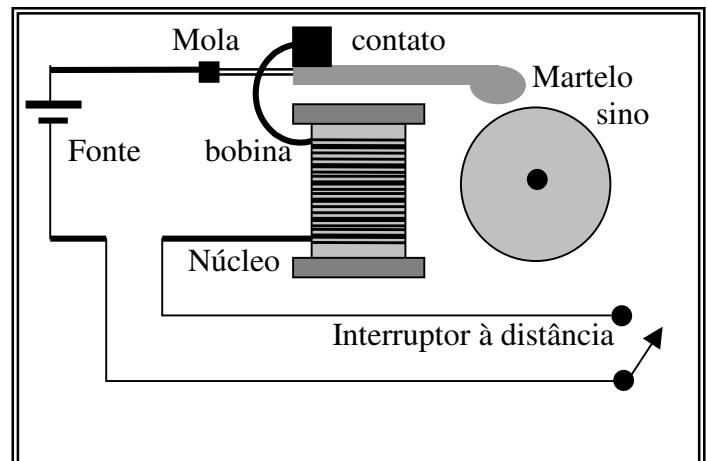


ao lado, onde vemos também a inclusão de um núcleo de material ferro magnético que aumentará a densidade de fluxo.

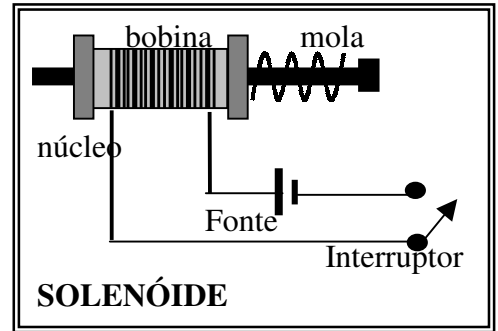
2.14. Aplicações

Com a inclusão do núcleo ferro magnético, há um acréscimo muito grande na intensidade do campo magnético da bobina ou solenóide, o que tornou possível a utilização desse dispositivo na construção de ELETROÍMÃS.

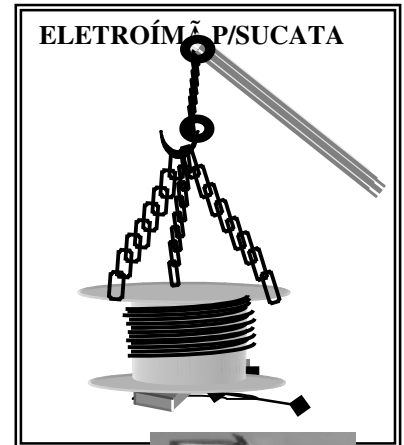
Os eletroímãs são dispositivos compostos de enrolamento sobre um núcleo de ferro que podem ser comandados à distância como por exemplo, o solenóide, a campainha, relês, etc. Numa campainha, ao ligarmos o interruptor, a bobina se imanta através do contato ligado ao martelo. Este, ao ser atraído pelo núcleo imantado, abre o circuito desligando a fonte e retornando a posição inicial devido a ação da mola, ligando novamente o circuito. O ciclo se repete indefinidamente até desligarmos o interruptor. Ver figura ao lado.



No solenóide com êmbolo, (fig. ao lado), basta ligarmos o circuito e, a depender do sentido do enrolamento e da corrente, o campo atrairá a barra de ferro para o interior do núcleo, acionará um dispositivo qualquer (fechar uma porta, ligar um equipamento através de um contato) e retornará ao ponto de partida através da mola.

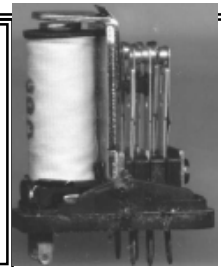
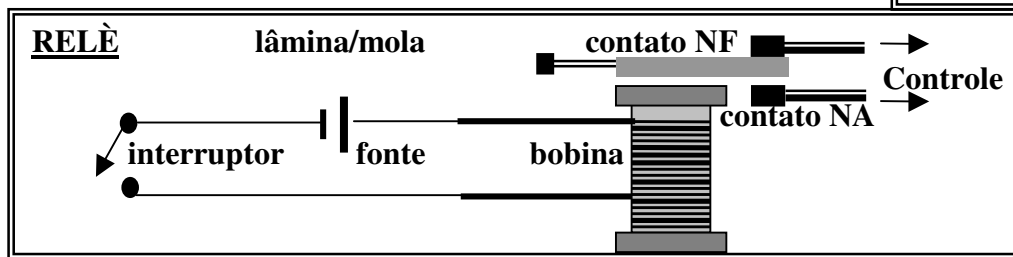


Os eletroímãs industriais são usados apenas como ímãs temporários. Eles são em geral de tamanho relativamente grande, sendo transportados por guinchos. Ao ligar a fonte de energia, a base imantada atrai os pedaços de ferro ou materiais magnéticos que, após movimentado para o local desejado são soltos pelo desligamento da fonte (figura ao lado)



Os relês magnéticos são dispositivos utilizados para controlar grandes potências através dos seus contatos que estão normalmente abertos (NA) ou normalmente fechados (NF) e invertem essas condições quando a bobina é imantada e atrai as lâminas conectadas a esses contatos.

Ver figura abaixo



Campo de uma bobina ou solenóide

Como o campo de uma espira em função do raio tem a fórmula $B = \mu \cdot i / 2.R$ então, para um conjunto de espira temos

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

2.15. Força Magnetomotriz (fmm)

É a força (fmm) que gera o campo elétrico, analogamente ao circuito elétrico cuja corrente é gerada por uma força eletromotriz fem e o seu valor é diretamente proporcional a corrente e ao número de espira.

$$F_{mm} = N \cdot i$$

A unidade é o AMPÈRE-ESPIRA (Ae)

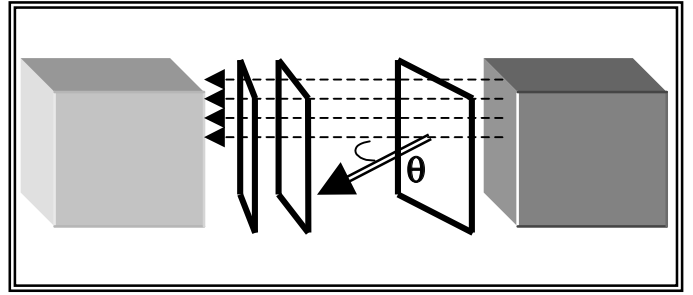
2.16. Fluxo e densidade de fluxo

Já vimos que a densidade de fluxo magnético é $B = \Phi / A$, no caso do fluxo ser perpendicular ao plano da área considerada. Porém se o plano formar um ângulo

θ com a direção do campo e tirando o valor do fluxo temos
 A unidade é Tesla.m² ou Weber .

$$\Phi = B.A \cos \theta$$

Como vemos na figura ao lado, quando o ângulo θ , entre a perpendicular ao plano e a direção do campo, é zero, o fluxo é máximo pois $\theta = 0$ e $\cos\theta = 1$, logo $\Phi = B.A$
 Quando esse ângulo for noventa graus então o fluxo é zero, pois $\cos 90 = 0$.

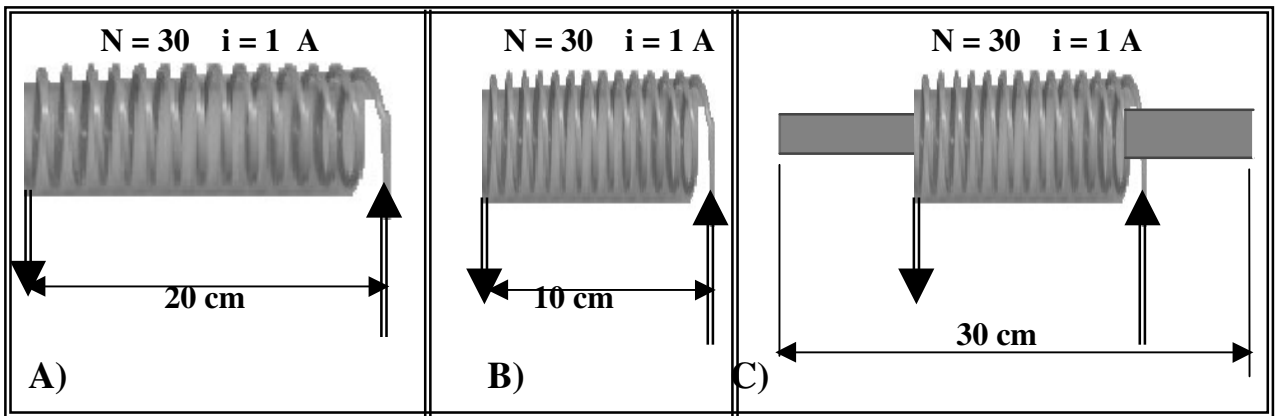


2.17. Intensidade de campo (h)

É a quantidade de ampère-espira por metro de comprimento da bobina.
 A unidade é o **Ae/m**

$$H = \frac{Ni}{L}$$

É importante observar que se aumentarmos o comprimento da bobina (esticando-a, por exemplo), mantendo a mesma quantidade de ampère-espira, a intensidade de campo diminui.
 Também se um núcleo ferro-magnético for introduzido na bobina, o comprimento (l) usado no cálculo da intensidade de campo, é o comprimento desse material.



Como exemplo, vemos na figura acima três bobinas com o mesmo número de ampère – espira. (30 Ae). A bobina **A**) tem 20 cm de comprimento que foi encurtada para fazer a bobina **B**) e posteriormente introduziu-se um núcleo ferro-magnético de 30 cm de comprimento transformando-a na bobina **C**)

Calculando as intensidades decampo teremos:

$$H (A) = \frac{30 \times 20}{0,20} = 300 \text{ Ae/m} ; H (B) = \frac{30 \times 20}{0,10} = 600 \text{ Ae/m} ; H (C) = \frac{30 \times 20}{0,30} = 200 \text{ Ae/m}$$

Vemos então que apesar de colocarmos um núcleo na bobina **C** a intensidade de campo foi a menor das três e também, diminuindo-se o comprimento da bobina **A**, aumentou **H**.

2.18. Indução eletromagnética

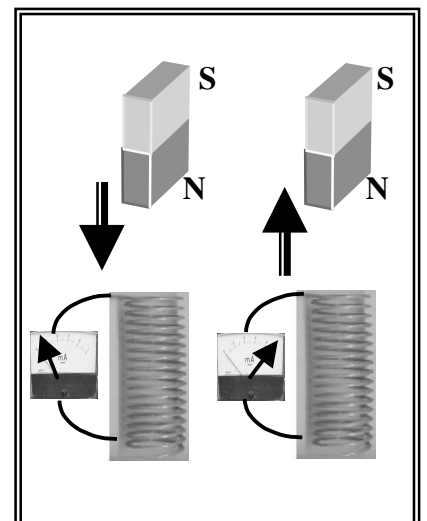
Mesmo sendo conhecido há uns dois séculos atrás a interação entre a eletricidade e o magnetismo onde um gerava o outro, só por volta de 1831 que a INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA foi descoberta dando um grande impulso no fenômeno e iniciando uma nova era: a era da ELETRICIDADE. Até então era muito oneroso obter-se eletricidade através de baterias e acumuladores e só se podia transporta-las a pequenas distâncias.

A indução eletromagnética permite que campos magnéticos possam gerar força eletromotriz quando atravessam circuitos compostos de bobinas ou enrolamentos, o que é o inverso do que já foi visto, ou seja, a corrente elétrica atravessando condutores e gerando campo magnético. É a base da construção dos grandes GERADORES de usinas elétricas.

Michael Faraday e J. Henry experimentaram o fenômeno no qual um condutor ao atavessar linhas de força magnéticas ou ser atravessado por essas, desenvolve em seus extremos uma força eletromotriz (**fem**) ou **Tensão Induzida**. O experimento consistia em aproximar e afastar um ímã permanente de uma bobina cujos terminais foram ligados a um medidor de corrente sensível (galvanômetro).

Além de notarem que o ponteiro do medidor se movia devido a aproximação do ímã, também observaram que no afastamento, o mesmo se movia para o lado contrário, indicando que o sentido da corrente depende da polaridade induzida na bobina e um movimento mais veloz do ímã causa maior tensão medida no galvanômetro.

A partir desse experimento foram criadas as leis fundamentais da indução eletromagnética : A lei de Faraday e a lei de Lenz.



2.19. Lei de faraday

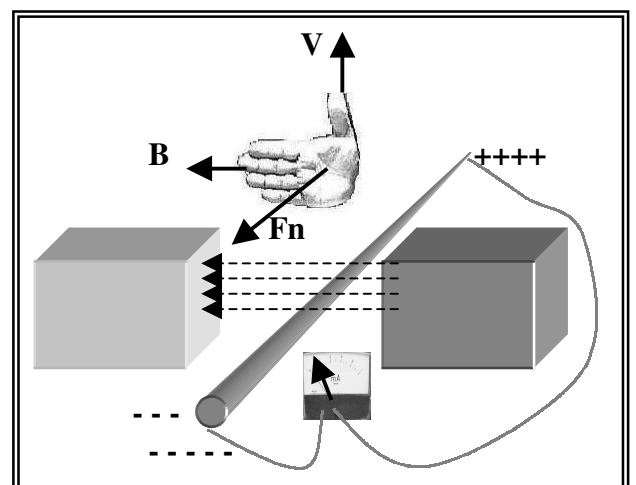
Essa lei demonstra que um fluxo magnético variável induz em um circuito elétrico a que ele atravessa, uma força eletromotriz (**fem**) cujo valor aumenta conforme o aumento da velocidade dessa variação.

Ou seja, a tensão induzida é uma variação do fluxo na unidade do tempo.

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau}$$

Se um condutor de comprimento **L** cortar as linhas de força de um campo magnético aparecerá, em suas extremidades uma **fem** que será proporcional a intensidade do fluxo e a velocidade da intersecção.

Lembrando da força de atração sobre uma carga unitária que atravessa um campo magnético com a velocidade **V** temos: **F = qBV senθ** cujo sentido é definido pela regra da mão direita (tapa).

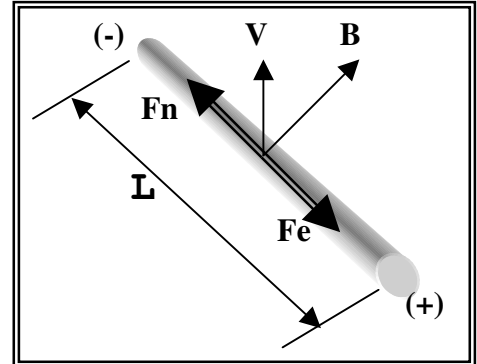


Se em vez da carga, tivermos um condutor (ver figura ao lado), essa mesma força atrairá os elétrons (várias cargas) para uma das extremidades que ficará negativa.

Utilizando-se da mesma regra da mão direita, onde o polegar está no sentido da velocidade, os outros dedos no sentido do campo, teremos o lado negativo indicado pelo sentido do ‘tapa’.

2.20. F.E.M. Induzida

Para o cálculo da fem induzida, temos que a força (F_n) que desloca os elétrons livres para uma extremidade tornando-a negativa, deixa a outra extremidade carregada positivamente, positivamente originando um campo elétrico (E) com a força de atração (F_e), de mesma intensidade e sentido oposto, conforme figura ao lado.

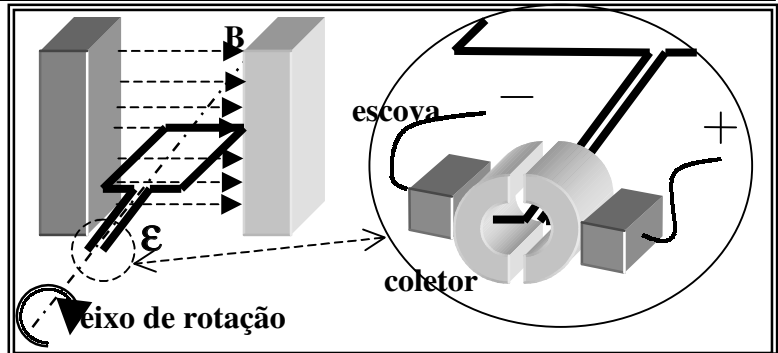


O campo elétrico não é nulo no interior, e como já foi visto em eletrostática, para um ângulo θ de noventa graus (condutor perpendicular às linhas):

$U = d.E$	$\epsilon = L.E$	$E = \epsilon/L$	$F_e = q.E$	$F_n = q.V.B$	$F_n = F_e$
$q.V.B = q.E$ $V.B = E$ $V.B = \epsilon / L$					
$\epsilon = L.B.V$ volts					

Tensão induzida na bobina

Uma espira, portanto um circuito fechado (fig.), girando sob efeito de uma energia mecânica em um campo magnético, vai gerar uma **fem induzida** que aumentará conforme a rapidez dessa

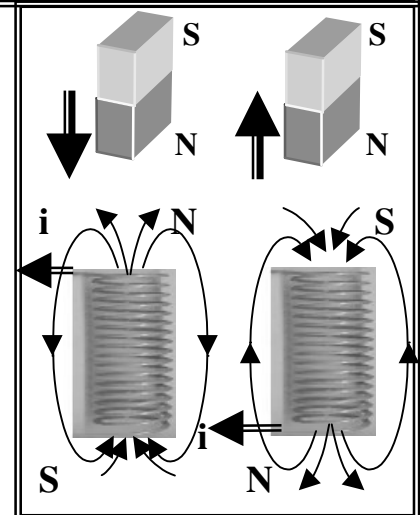


variação. É o que diz a lei de Faraday, já vista.

$$\epsilon = \Delta\Phi/\Delta\tau$$

Para o caso de uma bobina com N espiras temos:

$$\epsilon = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau}$$



2.21. Lei de Lenz

Três anos mais tarde que Faraday, Lenz anunciou uma lei complementar àquela, que em síntese, diz que um circuito fechado submetido a uma variação de fluxo magnético, induz nele mesmo uma corrente que gera um campo magnético capaz de se opor ao campo que lhe deu origem. Isto é, a tensão induzida tem polaridade tal que se opõe à variação do fluxo.

Vemos ao lado a geração da corrente e a polaridade da bobina.

Essa polaridade, que determina o sentido da corrente, acontece sempre de maneira a criar uma oposição entre os dois ímãs (natural e a bobina). Por exemplo, quando se aproxima, da bobina, o polo norte do ímã, é criado nesse lado um outro polo norte, para fazer lhe fazer oposição dificultando a aproximação (dois pólos iguais, se repelem). Então o sentido da corrente seria aquele da figura. Agora, ao se afastar o ímã, é criado no lado da bobina um pólo sul, causando uma tentativa de aproximação (pólos diferentes se atraem) afim de dificultar esse afastamento. E o sentido da corrente passa a ser o contrário do anterior.

Há várias maneiras de gerar essa corrente tais como: movendo-se o ímã, a bobina, outra bobina imantada, variando-se a corrente de um solenóide estático, etc.

Deixando o condutor retilíneo e raciocinando em termos de uma espira ou conjunto de espiras (enrolamento ou bobina), temos que a tensão induzida depende de vários fatores tais como:

- Intensidade de fluxo: mais linhas de força, maior a tensão.
- Número de espiras: quanto mais espiras, também a tensão é maior
- Velocidade da interseção: quanto mais linhas são cortadas na unidade de tempo, mais tensão.
- O deslocamento pode ser do campo (indutor) ou da bobina, ou espira (induzido).

As principais aplicações das leis de indução foram os GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA, GERADORES DE CORRENTE ALTERNADA E TRANSFORMADORES além dos demais **MATERIAIS MAGNÉTICOS**.

3. MATERIAIS MAGNÉTICOS

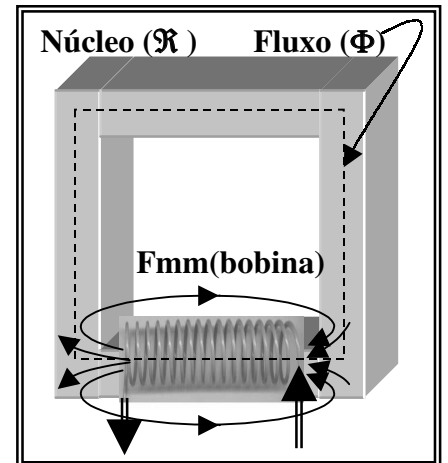
3.1. Circuito magnético

Guardando as devidas proporções, um circuito magnético pode ser comparado com um circuito elétrico. Se conhecermos a força magnetomotriz (**fmm**), que é a quantidade de ampère-espira, e tivermos o valor da RELUTÂNCIA (\mathfrak{R}), que é a resistência magnética, podemos calcular o valor do fluxo (Φ) a exemplo do que se faz no circuito elétrico onde calculamos a corrente (**i**) conhecendo a força eletromotriz (**fem**) e a resistência elétrica (**r**), isto é: **i = fem / r**

Vamos inicialmente comentar sobre algumas definições básicas para facilitar um pouco a compreensão dos circuitos magnéticos, sendo que algumas foram vistas acima. Ver figura ao lado.

RELUTÂNCIA (\mathfrak{R}) – É o equivalente à resistência elétrica no circuito elétrico. Trata-se de um tipo de resistência que se opõe ao fluxo magnético dificultando a sua passagem. A unidade é o Ampère-espira por Weber (**Ae/Wb**)

PERMEÂNCIA (μ) – Sendo o inverso da relutância ($1 / \mathfrak{R}$), é a propriedade que facilita a passagem do fluxo pelo circuito magnético.



FLUXO MAGNÉTICO (Φ) – É a quantidade de linha de força do circuito magnético, a unidade é o Weber (**Wb**), como já visto acima, e é o equivalente à corrente (**i**) no circuito elétrico. Um Weber corresponde a cem milhões de linhas de força (10^8 linhas)

FORÇA MAGNETOMOTRIZ (fmm**)** – É a força que gera o fluxo magnético e é medida em ampère-espira (**Ae**). Ela equivale à força eletromotriz (**fem**) no circuito elétrico.

3.2. Lei do circuito magnético

A exemplo do que acontece no circuito elétrico com a Lei de Ohm (**i=fem/r**), também no circuito magnético temos que o fluxo é diretamente proporcional à força magnetomotriz e inversamente proporcional à relutância magnética: **$\Phi = \text{fmm} / \mathfrak{R}$** . Mas **fmm = Ni (Ae)** logo:

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

Dessa relação tiramos o valor da relutância: **$\mathfrak{R} = Ni / \Phi$**

Mas se considerarmos o valor de **Ni = fmm**; **$\mu = B / H$** ; **$B = \Phi / A$** e que **$H = Ni / L$** teremos o valor da relutância em relação a permeabilidade, ao comprimento e área da seção reta do circuito magnético, ou seja:

$$\mu = \frac{L}{\mathfrak{R}A}$$

$$\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu A}$$

Por dedução, a permeância é então:

Por exemplo, se um solenóide de 100 espiras for atravessado por uma corrente de 10 ampères e seu núcleo for um material de relutância 10 Ae/Wb, o fluxo será então de $\Phi = 100.10/10 = 100$ linhas

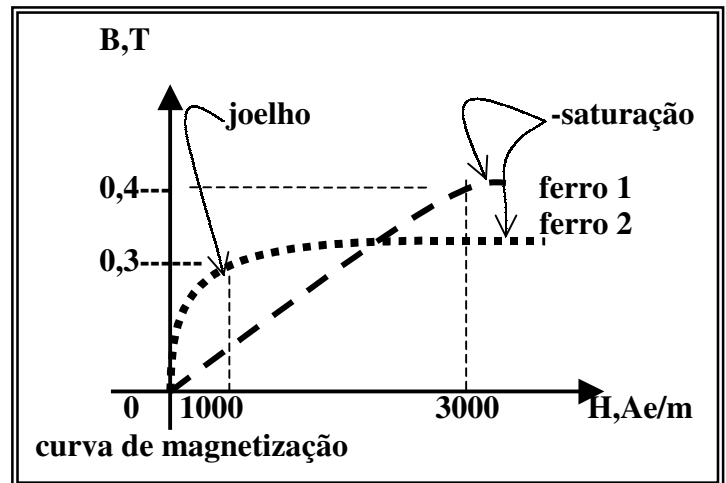
3.3. Curva de magnetização (B x H)

Para cada tipo de material magnético (por exemplo, o ferro doce) é levantada uma curva que relaciona a densidade de fluxo com a intensidade de campo (BxH) já estudados. A curva se obtém incrementando-se a força magnetizante (intensidade de campo magnético) e obtendo-se o resultado da densidade de fluxo até um dado valor, que é o de SATURAÇÃO em que pouca variação dessa densidade ocorrerá com o aumento da intensidade de campo. A região do “joelho” da curva é o limite aproximado da parte linear e o início da saturação.

Há uma variedade dessas curvas de um para outro material, como também, para o mesmo material, o tipo de tratamento térmico modifica essa curva.

No exemplo ao lado vemos as curvas de dois tipos de ferro. É possível observar que na curva que representa o ferro 2, necessita menor quantidade de ampère-espira para alcançar a saturação.

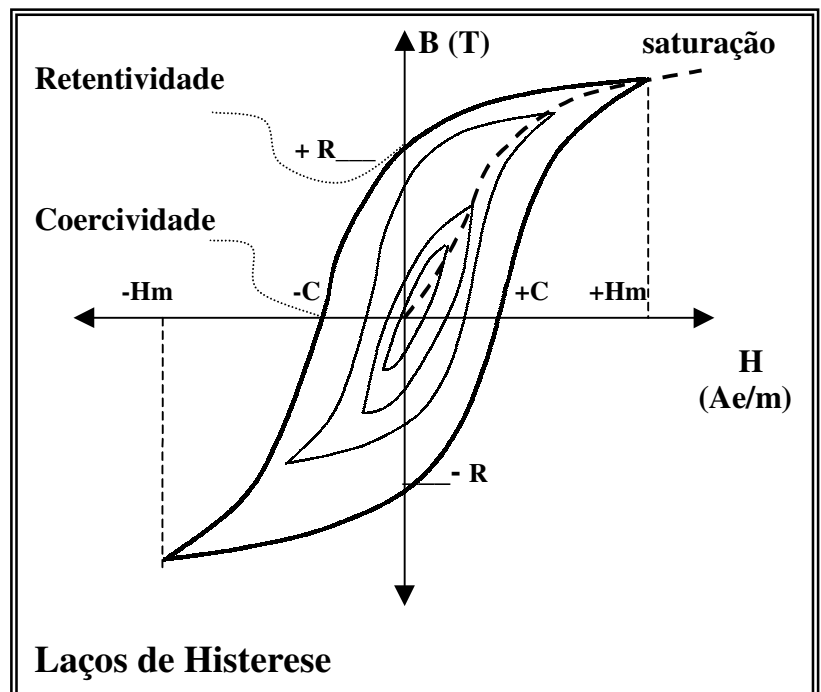
Na realidade essas curvas são levantadas quando da construção de outras curvas denominadas de LAÇOS DE HISTERESE que veremos a seguir.



3.4. Histerese

A HISTERESE é o fenômeno da perda de energia causada pela propriedade que tem todo o material magnético em se opor às variações do fluxo magnético que por ele circula, como é o caso do fluxo causado por uma corrente alternada. Essa oposição acontece sempre quando o fluxo tende a aumentar ou diminuir.

O levantamento da curva (BxH) é feita em várias etapas até a saturação: primeiramente aplica-se, no material não magnetizado, uma corrente que vai gerar a



intensidade de campo de zero até um H positivo máximo escolhido, resultando em uma densidade (B) e criando o início da curva de magnetização vista no gráfico ao lado (tracejada).

Ao diminuir a força magnetizante, a densidade (B) não volta da mesma maneira que cresceu e sim, permanece no material uma magnetização remanescente. Quando H cai a zero, B ainda mantém um certo valor (+R) que é chamado de **REMANÊNCIA**, **RETENTIVIDADE**, **DENSIDADE RESIDUAL DE FLUXO** ou **INDUÇÃO RESIDUAL**.

Para que B consiga cair até zero, é necessário aplicar um H negativo (inverter a corrente) até um certo valor (-C) que é chamado de **COERCIVIDADE**. Continua-se aumentando negativamente a intensidade até -H máximo obtendo-se o -B máximo. Então se inverte a ação, pois a densidade negativa não sobe a zero acompanhando a intensidade de campo -H que cresce até esse valor, e sim permanece uma magnetização inversa que para alcançar o valor zero, é necessário um incremento positivo de H. Continuando o incremento positivo de H, completa-se o ciclo e forma-se o que se chama de **LAÇO DE HISTERESE**.

São executadas outras etapas de ensaio para o mesmo material, obtendo-se vários laços até que o valor de H não seja mais representativo no acréscimo de B, quando é atingido a **SATURAÇÃO** do material. A linha que une todos os vértices superiores desses laços, os (B,H) máximos, forma então a **CURVA DE MAGNETIZAÇÃO**, vista no ítem anterior, que é empregada no cálculo de equipamentos elétricos e em função da qual, é determinado o valor da permeabilidade do material pela equação $B = \mu H$, já vista.

Podemos notar que nos ramos descendentes dos laços, o valor de B é sempre maior que nos ramos ascendentes e que o material magnético tende a se opor a variação de fluxo, causando perda de potência ou energia, que é o que chamamos de **HISTERESE**.

3.4.1. Magnetostricção

É o aumento de volume de um material ferromagnético devido a variação da magnetização. Esse fenômeno causa a vibração de núcleos de aparelhos de corrente alternada que utilize o dobro da frequência dessa corrente. Também é usado nos aparelhos de ultra-som.

3.4.2. Ponto de Curie

É um ponto de temperatura onde um material ferromagnético perde essa propriedade, geralmente tornando-se paramagnético. Vale lembrar que a permeabilidade aumenta com a temperatura até esse Ponto de Curie, quando cai drasticamente para valores nas imediações dos valores dos materiais paramagnéticos. Entretanto, a recíproca é verdadeira, ou seja, materiais paramagnéticos quando submetidos a uma temperatura acima daquele ponto, tornam-se magnéticos. O ponto de Curie do ferro é 775° C; do níquel, 360° C e do cobalto é 1110° C.

3.4.3. Aplicações

- Materiais com grande remanência e alta coercividade: são usados geralmente na fabricação de ímãs permanentes.
- Materiais com grande permeabilidade inicial: usados para blindagens magnéticas.
- Materiais com pouca retentividade e força coercitiva : usados na construção de eletroímãs, pois é usada a corrente elétrica nos comandos à distância.

- Para construção de máquinas deve-se ter elevada intensidade de campo de saturação juntamente com uma grande resistividade.
- Na magnetização alternada, a área do laço de histerese deve ser o menor possível pois a perda por unidade de volume do material é diretamente proporcional à essa área.

3.5. Permeabilidade

A PERMEABILIDADE (μ) – Ou permeabilidade absoluta, é como uma permeância específica de um material, ou seja, a maior ou menor facilidade com que esse material se deixa magnetizar ou concentrar as linhas de fluxo magnético.

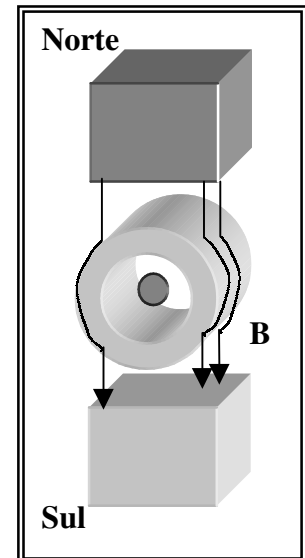
No interior de um campo magnético, a densidade de fluxo (**B**) varia, em um determinado ponto, conforme a corrente aplicada, o comprimento do condutor, a posição em relação ao ponto considerado e de um coeficiente de proporcionalidade (μ) que vem a ser a permeabilidade desse meio. A expressão matemática que representa essa densidade de fluxo, vista anteriormente é: **B = μ H (Tesla)** de onde tiramos o valor da permeabilidade em (**Tm/Ae**):

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

Esse valor da permeabilidade, que não é uma constante, é extraído dos gráficos das curvas de magnetização e laços de histerese já descritos.

3.5.1. Relutância mínima

O fluxo magnético sempre se dirige para o material de maior permeabilidade, em caso de mais de um material fazendo parte do circuito magnético. Essa propriedade é muito usada na blindagem magnética de equipamentos sensíveis. Vemos ao lado uma esfera protegida por uma anel magnético, ambos imerso em um campo B cujas linhas de força são desviadas por aquele anel.



3.5.2. Divisão dos materiais em função da permeabilidade

- MATERIAIS INDIFERENTES: $\mu \cong \mu_0$. São materiais como a madeira, o cobre, plásticos, ar, etc., que não alteram o caminho das linhas de força, não sendo influenciados pelo campo magnético.
- MATERIAIS DIAMAGNÉTICOS: $\mu < \mu_0$. São os materiais como a água, o ouro, a prata, etc. que modificam o trajeto das linhas de força afastando-as ligeiramente. Sua permeabilidade é um pouco menor que a do vácuo.
- MATERIAIS PARAMAGNÉTICOS: $\mu > \mu_0$. São os materiais como o alumínio, o paládium, a platina, o oxigênio, etc., que concentram ligeiramente as linhas de força no seu interior. A permeabilidade é um pouco maior que a do vácuo.
- MATERIAIS MAGNÉTICOS OU FERROMAGNÉTICOS : Causam uma forte concentração das linhas de força magnética no seu interior e permitem grandes imantações. São exemplos o ferro, o aço, o níquel, o cobalto, o metal mu, etc.

3.5.3. Permeabilidade Relativa

O valor da permeabilidade absoluta também é determinado através da **Permeabilidade Relativa e a Permeabilidade do Vácuo**.

Permeabilidade do vácuo (μ_0) cujo valor é $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, na prática, considerada igual a do ar.

Permeabilidade relativa (μ_R) – Expressa o quanto uma determinada permeabilidade é maior que a permeabilidade do vácuo. Ou seja, é a relação entre a quantidade de linhas de fluxo existente no material e a quantidade que teria se esse material fosse substituído pelo vácuo sob as mesmas condições de fmm e dimensões.

Essa relação pode ser expressa como $\mu_R = \mu / \mu_0$ que é um número adimensional devido as unidades serem iguais. Por exemplo, se um determinado material tiver uma permeabilidade relativa de 100, significa dizer que a permeabilidade absoluta do mesmo é 100 vezes maior que a permeabilidade do vácuo, ou seja $\mu = 100 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \Rightarrow \mu = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ Tm/Ae}$

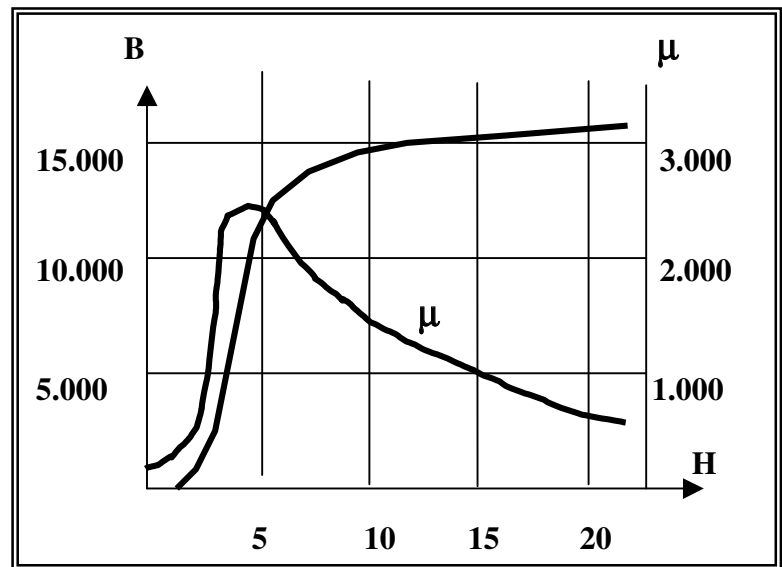
Vemos então que podemos calcular a permeabilidade do material a partir do produto da permeabilidade do vácuo pela permeabilidade relativa que pode ser tabelada para os diversos tipos de material. Um exemplo é a tabela de valores de μ_R abaixo transcrita .

Cobalto = 60	Níquel = 50	Ferro fundido = 30 a 800
Aço = 500 a 5000	Ferro transformador = 5500	Ferro puro = 8000
Metal UM = 100.000 (76 Ni + 1,5 Cr + 4 Cu + Fe)		

Na figura ao lado vemos um exemplo da curva BxH e da permeabilidade do ferro, inicialmente não magnetizado e apresentando um certo valor, onde se nota que μ cresce rapidamente até um máximo para depois decrescer a partir desse B/H máximo.

3.5.4. Envelhecimento

Devemos observar que a permeabilidade (μ) diminui com o tempo, pois a densidade de fluxo



(B), que depende da força de magnetização (H) reduz sua capacidade de concentração das linhas de força, e logicamente, as perdas por histerese aumentam. Esse fenômeno acontece com o ferro e o aço mais do que nas ligas de ferro-silício, por exemplo.

3.6. Perdas

As perdas dependem principalmente do modo de fabricação do material, percentagem dos componentes (no caso de ligas), espessura no plano que ficará perpendicular ao campo, indução

máxima, etc. As perdas principais nos materiais magnéticos são devidas a **HISTERESE** e a **CORRENTE DE FOUCAULT**.

As perdas por histerese, já vista anteriormente, deve-se a energia despendida em orientar os domínios magnéticos do material na direção do campo. Uma magnetização proveniente de uma corrente alternada causa no material ferromagnético uma perda de energia por unidade de volume, que é transformada em calor. Essa perda é proporcional à área do laço de histerese e à frequência da corrente magnetizante. Mas o laço também é proporcional ao máximo valor de densidade de fluxo magnético (**Bm**) elevada a uma potência que depende do material, cuja fórmula é: **Ph = K.f.Bm²**, sendo K função da qualidade desse material. Essas perdas são reduzidas através de tratamento térmico

A outra perda de potência de conformidade com a lei de Joule (**i² r**), é devido a **CORRENTE DE FOUCAULT**. Esta perda é o resultado de correntes que aparecem internamente em blocos maciços de materiais ferromagnéticos imersos em um campo magnético e que tendem a se opor à variação da indução magnética. Também nos núcleos de enrolamentos onde uma fem alternada gera um campo magnético envolvendo esse núcleo (figura ao lado). Sendo a resistência do bloco muito baixa, ocorrem valores de corrente muito grande. Essa propriedade é muito usada para fabricação de fornos de indução.

Para minorar esse efeito, utiliza-se núcleos laminados (figura ao lado), nos aparelhos eletromagnéticos, isolados e em disposição especial, limitando assim a fem induzida, a exemplo das chapas laminadas dos núcleos de transformadores. Esse tipo de perda pode ser expressa pela equação **Pf = K.d²f².Bm²V** para o caso de um volume de núcleo metálico em campo magnético. Sabe-se que a perda total é proporcional ao volume (V) do conjunto de chapas, ao quadrado da espessura (d), ao quadrado da frequência (f) e ao quadrado da densidade máxima de fluxo (Bm). K depende da resistividade do material.

O isolamento e a disposição dessas chapas devem ser bem feitos para evitar vibrações tão comuns em máquinas e transformadores. A espessura de cada chapa, deve ser inversamente proporcional à frequência da corrente geradora do fluxo magnético que varia hoje entre 0,35 e 0,60 mm. O isolamento é geralmente feito com verniz especial mas pode ser de papel com espessura entre 0,025 mm a 0,4 mm. Voltaremos a falar do assunto ao tratarmos de transformadores e ligas ferromagnéticas.

