

# TEORIA DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS. GRANDEZAS MAGNÉTICAS FUNDAMENTAIS

## Magnetismo

O magnetismo é uma forma de energia apresentada apenas por alguns materiais, tais como ferro, aço, compostos de ferro, ligas especiais, níquel e cobalto.

Entre outras propriedades, os corpos com magnetismo apresentam a de atrair outros corpos. Nota-se, entretanto, que só os corpos feitos com os materiais citados no parágrafo anterior podem ser atraídos.

Os corpos que possuem magnetismo são denominados ÍMÃS. Os ímãs são normalmente produzidos pelo homem (ÍMÃS ARTIFICIAIS); há, porém, o ÍMÃ NATURAL, um composto de ferro conhecido pelo nome de MAGNETITA, encontrado com relativa facilidade na natureza. Quando se faz um corpo adquirir propriedades magnéticas, ele pode perdê-las em pouco tempo ou conservá-las por toda a sua existência. No primeiro caso temos um ÍMÃ TEMPORÁRIO e no segundo caso um ÍMÃ PERMANENTE. Um ímã natural é permanente.

Várias teorias têm sido apresentadas para explicar o magnetismo, entre as quais destacamos a de WEBER-EWING (TEORIA DOS ÍMÃS MOLECULARES) e a dos DOMÍNIOS

MAGNÉTICOS, esta última mais moderna e mais completa.

A teoria dos ímãs moleculares diz que as moléculas das substâncias magnéticas (as que podem apresentar propriedades magnéticas) são pequenos ímãs, cujos efeitos não podem ser apreciados porque estão dispostos no corpo de tal forma que suas ações se anulam mutuamente. A imantação de um corpo consiste em “arrumar” os ímãs moleculares de modo que suas ações se somem. Esta teoria, com o conhecimento atual da constituição da matéria, cedeu lugar a novas idéias.

A teoria dos domínios magnéticos baseia-se no fato de que os fenômenos magnéticos resultam do movimento de cargas elétricas. É fato comprovado e de grande aplicação que uma carga elétrica em movimento apresenta não só um campo elétrico como também, e principalmente, propriedades magnéticas; convém ressaltar que as propriedades magnéticas só são observadas quando a carga está em movimento, ao passo que o campo elétrico existe também quando ela está em repouso.

Conhecendo o fato acima e sabendo que os elétrons dos átomos de um corpo estão sempre em movimento (“spin” e movimento em suas órbitas), o homem

concluiu que todos os elétrons de um corpo têm propriedades magnéticas (são ímãs pequeníssimos).

Mas esta conclusão não contraria o que foi afirmado no primeiro parágrafo? Se todos os corpos apresentam elétrons em movimento, todos têm, propriedades magnéticas?

A resposta é NÃO para as duas perguntas. Sabe-se que quando duas cargas elétricas iguais movimentam-se em sentidos opostos os seus efeitos magnéticos se anulam. Sabe-se também que os elétrons dos átomos constituem dois grupos que giram em sentidos opostos. Quando esses dois grupos são iguais (em número de elétrons), as propriedades magnéticas dos átomos são nulas, fato que ocorre com a maioria das substâncias. Quando os grupos são quantidades de elétrons diferentes, há o predomínio de um deles, e os átomos são minúsculos ímãs; isto é o que ocorre com os materiais a que nos referimos no início do capítulo e que são chamados **MATERIAIS MAGNÉTICOS**.

Os átomos com propriedades magnéticas reúnem-se em grupos de aproximadamente  $10^{15}$  unidades, constituindo **DOMÍNIOS MAGNÉTICOS**. Um pedaço de ferro, por exemplo, é formado por domínios. Observa-se, entretanto, que os efeitos dos domínios não se somam, como acontece com os efeitos dos átomos que os constituem, e, em verdade, praticamente se anulam. É por este motivo que normalmente um corpo de material magnético não é um ímã. Este fato é conseqüência da má disposição dos domínios, cujas ações estão em oposição, fazendo com que o corpo, como um todo, não apresente qualidades magnéticas.

É possível, porém, dar nova disposição aos domínios, que resulte numa ajuda mútua por parte desses grupos de

átomos, produzindo-se então um ímã. Fazer um corpo apresentar propriedades magnéticas, ou **IMANTÁ-LO** (ou ainda **MAGNETIZÁ-LO**), é, portanto, orientar os seus domínios de modo que somem suas ações magnéticas.

### **Campo Magnético**

Qualquer região ou matéria em que são observados efeitos magnéticos é um campo magnético.

Pode-se tomar conhecimento de um campo magnético com auxílio de uma bússola (agulha magnética) ou de um fio conduzindo corrente elétrica. Quando o campo existe, age uma força sobre a agulha magnética, forçando-a a mudar de posição. No caso do fio, o campo magnético atua sobre as cargas em movimento no mesmo, obrigando-as a mudar de direção, o que, por sua vez, provoca o deslocamento do fio.

Para representar graficamente um campo magnético, dando uma idéia de sua grandeza em diferentes pontos, bem como da sua forma (que dependerá da forma do corpo magnetizado), usamos linhas que são chamadas **LINHAS DE FORÇA**. Estas linhas são traçadas de tal modo que indicam as ações do campo sobre corpos magnéticos nele colocados.

### **Magnetismo Terrestre**

A Terra é um gigantesco (porém relativamente muito fraco) ímã. A ação do seu campo magnético sobre pequenas agulhas imantadas que giram livremente sobre eixos (as bússolas) permite um traçado da sua forma e o conhecimento da sua direção e do seu sentido.

Quando o campo magnético da Terra age sobre uma bússola, os extremos desta ficam apontados aproximadamente para os pólos norte e sul geográficos,

e por este motivo são chamados respectivamente de pólo norte e pólo sul. Este fato pode ocorrer com qualquer ímã em barra que possa mover-se livremente; daí a designação de pólo norte e sul dada às extremidades desses ímãs (e, por semelhança de efeitos, a outros de formas diferentes), onde o seu magnetismo torna-se mais aparente.

A ação do campo magnético terrestre sobre a bússola não se faz sentir apenas no plano horizontal, fazendo-a deslocar-se para estacionar na direção norte-sul da Terra. Verifica-se também que a bússola apresenta uma inclinação em relação à horizontal do lugar em que está situada, dando-se ao ângulo em apreço a denominação de **INCLINAÇÃO MAGNÉTICA**.

A direção norte-sul verdadeira não corresponde perfeitamente à indicada por uma bússola. O ângulo formado pelas duas direções é a **DECLINAÇÃO MAGNÉTICA**.

### **Atração e Repulsão entre Ímãs**

Quando lidamos com ímãs, notamos que quando seus campos magnéticos são colocados em oposição se repelem, e quando os campos se somam há atração entre os ímãs; em outras palavras, pólos de nomes iguais se repelem e pólos de nomes diferentes se atraem.

### **Grandezas Magnéticas Fundamentais**

#### **Força Magnetomotriz ( $F$ )**

OERSTED foi o primeiro homem a observar que uma corrente elétrica pode dar origem ao magnetismo, mostrando que há estreita ligação entre magnetismo e eletricidade. Sua experiência foi simples: fazendo passar uma corrente por um condutor, pôde notar que isto pro-

vocava o deslocamento de uma bússola próxima do mesmo, e que o sentido e a intensidade do movimento da bússola estavam relacionados com o sentido e a intensidade da corrente elétrica.

Hoje utilizamos normalmente a corrente elétrica para produzir campos magnéticos.

Chamamos de **FORÇA MAGNETOMOTRIZ** (f. m. m.) à causa do aparecimento de um campo magnético. No condutor percorrido pela corrente elétrica, a força magnetomotriz é a própria corrente

$$F = I$$

e sua unidade é também o AMPÈRE.

Observa-se, porém, que quando o condutor é enrolado em forma de bobina (ou SOLENÓIDE), isto é, em forma helicoidal ou semelhante, os efeitos do campo magnético tornam-se “N” vezes mais fortes, conforme o número de VOLTAS ou ESPIRAS descritas pelo mesmo, o que nos permite dizer que a força magnetomotriz é então

$$F = N I$$

N = número de espiras

Neste caso, a unidade de força magnetomotriz pode ser denominada AMPÈRE-ESPIRA, porém usa-se o símbolo (A).

#### **Força Magnetizante (H) ou Intensidade de Campo Magnético**

A força magnetizante em um ponto qualquer próximo do condutor que conduz corrente depende diretamente da intensidade da corrente que produz o campo magnético e é inversamente proporcional ao comprimento do “caminho” magnético que está sendo considerado (caminho representado por uma linha de força):

$$H = \frac{I}{l}$$

I = intensidade da corrente, em AMPÈRES (A)

l = comprimento, em METROS (m)

No caso de uma bobina, como é evidente,

$$H = \frac{NI}{l}$$

Concluiu-se, das relações acima, que

$$H = \frac{F}{l}$$

A unidade de força magnetizante ou intensidade de campo magnético é o AMPÈRE/METRO (A/m).

O campo magnético em torno de um condutor de seção circular é também circular e pode ser representado por linhas de força circulares. O comprimento a que se referem as expressões acima é então o comprimento de uma circunferência, ou

$$l = 2\pi r$$

donde

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

ou

$$H = \frac{NI}{2\pi r}$$

### Fluxo Magnético ( $\phi$ )

É o número de linhas usadas na representação de um campo magnético. A unidade de fluxo é o WEBER (Wb). Quando um condutor é submetido a um campo magnético e este é feito variar do valor máximo a zero, no tempo de um

segundo, provocando o aparecimento de uma d. d. p. de 1 VOLT entre os terminais do condutor, dizemos que o fluxo máximo é de 1 WEBER. (Ver Capítulo XI.)

### Densidade de Fluxo Magnético ou Indução Magnética ( $\beta$ )

Trata-se do número de linhas de força que "atravessam" uma seção do campo de área unitária:

$$\beta = \frac{\phi}{S}$$

A unidade de densidade de fluxo magnético é o TESLA (T).

Outro conceito será visto posteriormente, relativo à ação que um campo exerce sobre uma carga em movimento no mesmo.

### Permeabilidade ( $\mu$ )

A permeabilidade exprime a facilidade que um determinado meio, com dimensões (comprimento e área de seção transversal) unitárias, oferece ao estabelecimento de um campo magnético. Esta grandeza é expressa pela relação

$$\mu = \frac{\beta}{H}$$

que é constante em meios não-magnéticos, porém apresenta variações em meios magnéticos.

Quando um campo magnético é estabelecido no vácuo, a relação em apreço é igual a

$$4\pi \cdot 10^{-7}$$

valor que é conhecido como PERMEABILIDADE DO VÁCUO, sendo designada como  $\mu_0$ .

As permeabilidades dos outros

meios são sempre comparadas com a do vácuo, e os números resultantes dessas comparações são as PERMEABILIDADES RELATIVAS ( $\mu_r$ ) dos mesmos.

Do exposto conclui-se que

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{e} \quad \mu = \mu_0 \mu_r$$

$\mu$  = permeabilidade de um material qualquer

$\mu_0$  = permeabilidade do vácuo ( $4\pi \times 10^{-7}$ )

$\mu_r$  = permeabilidade relativa do material

A permeabilidade de um material qualquer ( $\mu$ ) e a permeabilidade do vácuo são dadas em uma unidade conhecida como HENRY/METRO (H/m); a permeabilidade relativa de um material qualquer é apenas um número que exprime a relação entre as duas primeiras, não sendo acompanhado de unidade.

### Permeância ( $P$ ) e Relutância ( $R$ )

Permeância é a facilidade que um meio qualquer oferece ao estabelecimento de um campo magnético.

Esta grandeza depende

a) diretamente da permeabilidade do meio em que está sendo criado o campo magnético;

b) diretamente da área da seção transversal do corpo em que está sendo criado o campo;

c) inversamente do comprimento do corpo (ou região) em que está sendo criado o campo

$$P = \frac{\mu S}{l}$$

Relutância é o inverso da permeân-

cia; corresponde à dificuldade oferecida pelo meio ao estabelecimento de um campo magnético:

$$R = \frac{1}{P} = \frac{l}{\mu S}$$

### “Lei de Ohm” para Magnetismo

A permeabilidade de um material magnético não é constante. A dos materiais não-magnéticos é considerada constante, e assim é possível determinar o fluxo que será estabelecido nos mesmos por uma determinada força magnetomotriz, desde que se conheça sua relutância. Nestes materiais verifica-se que

“O FLUXO MAGNÉTICO PRODUZIDO É DIRETAMENTE PROPORCIONAL À FORÇA MAGNETOMOTRIZ E INVERSAMENTE PROPORCIONAL À RELUTÂNCIA”.

$$\phi = \frac{F}{R}$$

Este enunciado é conhecido como “Lei de Ohm” para magnetismo, dada sua semelhança com a Lei de Ohm já estudada.

Como nos materiais magnéticos a relutância não é constante, e depende da força magnetomotriz, esta relação não pode ser usada para prever o fluxo que será produzido por uma determinada f. m. m., ficando sua aplicação restrita à determinação do fluxo provocado por uma certa força magnetomotriz quando é conhecida a relutância correspondente.

### Unidades de Relutância e de Permeância

Da relação que existe entre a força magnetomotriz, o fluxo magnético e a relutância, concluímos que esta última grandeza pode ser expressa em AMPÈRES-ESPIRAS/WEBER (A/Wb).

A unidade de permeância é, então, por definição, o WEBER/AMPÈRE-ESPIRA (Wb/A).

### Métodos para Imantação

Para que os domínios magnéticos de um corpo sejam orientados, é necessário submetê-los a um campo magnético suficientemente forte para provocar o deslocamento dos mesmos.

Para tanto pode ser usado o campo magnético de um corpo imantado ou o campo produzido numa bobina (ou mesmo num condutor) pela passagem de uma corrente elétrica.

O grau de imantação adquirida pelo corpo depende do número de domínios orientados e, evidentemente, será conseguido o máximo de imantação quando todos os domínios estiverem orientados. Esta última condição corresponde à SATURAÇÃO MAGNÉTICA do material.

#### EXEMPLOS:

1 – O núcleo de um solenóide é um cilindro de bronze com 10 centímetros de comprimento e 2 centímetros de diâmetro. Qual é sua relutância?

#### SOLUÇÃO:

$$l = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$d = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m} \quad r = 0,01 \text{ m}$$

$$S = \pi r^2 = 3,14 \times 0,01^2 = 314 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$R = \frac{l}{\mu S}$$

Como o núcleo é feito de material não-magnético, e a permeabilidade

relativa dos materiais não-magnéticos é considerada igual a 1,

$$\mu = \mu_0 \mu_r = 4 \pi \times 10^{-7} \times 1 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$R = \frac{l}{\mu S} = \frac{10^{-1}}{12,56 \times 10^{-7} \times 314 \times 10^{-6}} = 2 \times 10^8 \text{ A/Wb}$$

2 – Numa bobina com relutância de 20 A/Wb deseja-se obter uma densidade de fluxo de 1 tesla. Sabendo que ela é constituída por 500 espiras, qual a força magnetomotriz que deverá existir e qual a corrente magnetizante? A seção da bobina é de 20 cm<sup>2</sup>.

#### SOLUÇÃO:

$$20 \text{ cm}^2 = 0,002 \text{ m}^2$$

$$\beta = \frac{\phi}{S} \therefore \phi = \beta S = 0,002 \text{ Wb}$$

$$F = \phi R = 0,002 \times 20 = 0,04 \text{ A}$$

$$F = NI \therefore I = \frac{F}{N}$$

$$I = \frac{4 \times 10^{-2}}{5 \times 10^2} = 8 \times 10^{-5} \text{ A}$$

3 – Quantas espiras de fio constituem um solenóide, se a corrente que o percorre produz um fluxo total de 80 quilolinhas em um circuito magnético cuja relutância é de 0,005 ampère-espira por linha? A corrente é de 2 A.

#### SOLUÇÃO:

$$\phi = 80 \text{ quilolinhas} = 80.000 \text{ linhas} = 0,0008 \text{ Wb (UM WEBER CORRESPONDE A } 10^8 \text{ LINHAS)}$$

$$R = 0,005 \text{ A/linha} = 500.000 \text{ A/Wb}$$

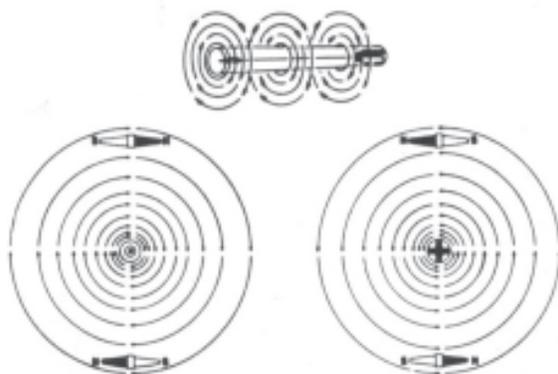
$$F = \phi R = 8 \times 10^{-4} \times 5 \times 10^5 = 400 \text{ A}$$

$$F = NI$$

$$N = \frac{F}{I} = \frac{400}{2} = 200 \text{ espiras}$$

## Sentido do Campo em Torno de um Condutor que Conduz Corrente

A direção e o sentido de um campo magnético qualquer são, por convenção, a direção e o sentido indicados, respectivamente, pelo eixo longitudinal e pela extremidade “NORTE” da agulha imantada de uma bússola colocada no mesmo. É possível, portanto, fazer o desenho de um campo, com auxílio de linhas de força, indicando ao mesmo tempo o modo como o ímã atua sobre outros corpos colocados em suas proximidades.



CAMPO MAGNÉTICO EM TORNO DE UM CONDUTOR DE SEÇÃO CIRCULAR PERCORRIDO POR UMA CORRENTE ELÉTRICA. A FLECHA NO INTERIOR DO CONDUTOR INDICA O SENTIDO DO MOVIMENTO DOS ELÉTRONS

FIG. X-1

Entretanto, nem sempre se dispõe de bússolas ou quaisquer dispositivos que possam ser utilizados para determinar o sentido de um campo. Por este motivo, o homem procurou modos práticos que permitissem atingir esse objetivo.



CAMPO MAGNÉTICO DE UMA ESPIRA

FIG. X-2

No caso de um condutor percorrido por uma corrente elétrica, as próprias mãos servem para tal fim. Basta que se suponha estar segurando o condutor com uma das mãos, de tal modo que o dedo polegar indique o sentido da corrente no mesmo; os outros dedos indicam o sentido do campo em torno do condutor.

Na aplicação desta regra prática é necessário apenas observar que a mão esquerda deve ser usada quando se trabalha com o sentido eletrônico da corrente, e a mão direita quando se considera o sentido convencional.

## Sentido do Campo Produzido por uma Bobina Helicoidal

Verifica-se experimentalmente que o campo magnético produzido por uma corrente elétrica, numa bobina deste tipo, é semelhante ao de um ímã em barra. Observa-se também que nas extremidades da bobina os efeitos do campo são mais aparentes, como ocorre nos extremos do ímã em barra, dando a mesma idéia de pólos. Realmente, a bobina age sobre um ímã

colocado perto dela, do mesmo modo que agiria um ímã em barra, e podem ser observadas as mesmas ações entre pólos; isto permite que as extremidades da bobina possam ser designadas como “NORTE” e “SUL”.

Também neste caso é possível determinar o sentido do campo com ajuda das mãos. Basta que se suponha estar segurando a bobina com uma das mãos, de modo que os dedos (com exceção do polegar) indiquem o sentido da corrente nas espiras; o dedo polegar indica, então, a extremidade “NORTE” da bobina. Deverá ser usada a mão esquerda quando se trabalhar com o sentido eletrônico da corrente e a mão direita com o sentido convencional.

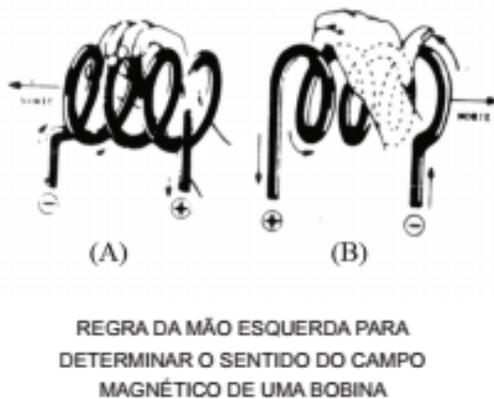


FIG. X-3

### Espectros Magnéticos

Os espectros magnéticos são figuras que dão uma idéia do campo magnético de um ímã ou de um conjunto de ímãs. São obtidos geralmente com auxílio de limalhas de ferro.

Para se conseguir um espectro magnético, basta colocar sobre um ímã uma folha de papel ou uma lâmina de vidro (não há isolante para o magnetismo) e espalhar a limalha uniformemente sobre o papel ou o vidro. As aparas de ferro, ao caírem sobre o material que cobre o ímã, se movimentam e se distribuem

de modo irregular, sob a forma de linhas, originando figuras que variam de conformidade com o ímã utilizado na experiência.

A explicação para este fato é simples. Cada pedacinho de ferro é transformado num pequeno ímã ao ser submetido ao campo magnético, e naturalmente ocorrem ações (atração e repulsão) entre os pequenos ímãs e o ímã cujo espectro está sendo obtido. Acontece com os pedacinhos de ferro o mesmo que ocorreria com as agulhas de bússolas que fossem colocadas perto do ímã, as quais se orientariam de tal modo que, se seus extremos fossem unidos, formariam linhas de um pólo ao outro da bobina. Foram essas linhas que deram a Faraday a idéia de representar graficamente um campo magnético com linhas de força.



ESPECTROS MAGNÉTICOS

FIG. X-4

### PROBLEMAS

#### GRANDEZAS MAGNÉTICAS FUNDAMENTAIS

1 – Qual é a relutância de um circuito magnético em que um fluxo total de 2 webers é criado por uma corrente de 5 ampères que flui em um solenóide com 200 espiras?

R.: 500 A/Wb

2 – Que corrente deve passar por um solenóide de 500 espiras para produzir

um fluxo total de 1,2 weber em um circuito magnético cuja relutância é de 200 ampères-espiras por weber?

R.: 480 mA

3 – Calcular a força magnetomotriz necessária para produzir um fluxo de 0,015 Wb em um entreferro de 0,00254 m de comprimento, com uma seção efetiva de 0,019 m<sup>2</sup>

R.: 1.500 A

4 – Uma força magnetizante de 2.000 A/m produz uma densidade de fluxo de 1 tesla em um certo tipo de ferro. Qual é sua permeabilidade com esta densidade de fluxo?

R.: 0,0005 H/m

5 – Uma bobina de fio, com 8 cm de comprimento, é enrolada em uma peça

de madeira com 0,5 cm de diâmetro. Se a bobina tem 500 espiras, que corrente deve percorrê-la para estabelecer no centro da mesma um fluxo de 0,5 microweber?

R.: 3,25 A

6 – Uma bobina de 200 espiras é enrolada uniformemente sobre um anel de madeira com uma circunferência média de 60 cm e uma seção transversal uniforme de 5 cm<sup>2</sup>. Sabendo que a corrente que passa pela bobina é de 4 A, calcular: a) a força magnetizante, b) a densidade de fluxo e c) o fluxo total.

R.: 1.333 A/m; 1.675 μ T; 0,837 μWb