



RELATÓRIO FINAL DE ATIVIDADES

F-809 – INSTRUMENTAÇÃO PARA ENSINO

CAMPO MAGNÉTICO DE UM SOLENÓIDE



ALUNO:

FELIPE TIJIWA BIRK

RA: 004910

COORDENADOR DO CURSO.....PROF. DR. JOSÉ JOAQUIM LUNAZZI
ORIENTADOR.....PROF. DR. MÁRCIO A. A. PUDENZI

OBJETIVOS

Este projeto tem como principal objetivo, mostrar a existência de um campo magnético no interior de um solenóide finito (ou bobina), quando uma corrente elétrica flui através do mesmo. Através do efeito visual adotado, podemos explorar outros conceitos físicos como empuxo e magnetização de materiais. Para um entendimento mais completo e eficiente, são ilustrados exemplos simples de aplicações práticas envolvendo o princípio físico do eletroímã.

INTRODUÇÃO TEÓRICA

Os primórdios da ciência do magnetismo perdem-se na história, quando se descobriu que um pedaço de óxido de ferro natural, chamado *magnetita*, suspenso livremente, se orientava aproximadamente ao longo da direção norte-sul. Este objeto formava uma bússola magnética primitiva. Mais tarde, descobriu-se que barras de ferro podiam adquirir esta mesma propriedade do magnetismo. Barras assim diziam-se magnetizadas e eram conhecidas como ímãs. Ímãs atraem também limalha de ferro e a região onde se acumula a limalha é conhecida como pólo do ímã. Os ímãs possuem um pólo norte (N) por onde saem as linhas de campo e um pólo sul (S) por onde elas entram. Se uma bússola é colocada nas proximidades de um ímã, aparecerão forças nos pólos da agulha da bússola. Diz-se que na região em volta do ímã há um campo magnético e que a agulha da bússola se alinha na direção deste campo.

Em 1819, o físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851), foi o primeiro cientista a notar a deflexão sofrida pela agulha de uma bússola quando colocada nas proximidades de um fio percorrido por corrente elétrica. Esta observação teve importância fundamental, pois sugeriu imediatamente que deve haver alguma ligação entre eletricidade e magnetismo. Foi observado também que as linhas de campo em torno de um fio longo percorrido por corrente, formam círculos concêntricos que obedecem a conveniente "Regra da Mão Direita" (figura 1).

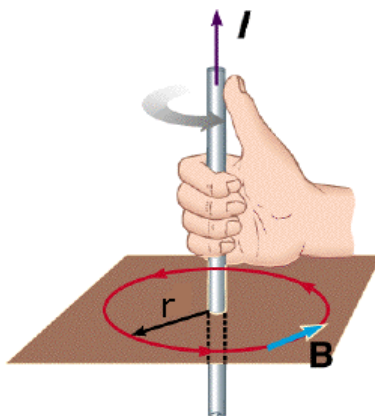


Figura 1. A "Regra da Mão Direita" é um truque simples para saber a direção do campo magnético em torno de um fio percorrido por corrente elétrica. O polegar aponta no sentido da corrente e os demais dedos definem o sentido do campo magnético.

As descobertas de Oersted influenciaram trabalhos de outros grandes cientistas que tiveram importantes contribuições no estudo das relações entre eletricidade e magnetismo. Entre os principais nomes podemos citar: Jean Baptiste Biot, Felix Savart, André-Marie Ampère, Joseph Henry, Michael Faraday, Heinrich Lenz, entre outros. De fato, poucas semanas após a descoberta de Oersted, o brilhante físico francês André-Marie Ampère (1775 – 1836) mostrou experimentalmente que, quanto aos efeitos magnéticos externos, um ímã permanente pode ser substituído por um solenóide¹ conveniente.

¹ "Solenóide" vem da palavra grega *solen* que significa "tubo"

Um solenóide é feito enrolando-se um fio isolado de forma tubular e compacta. Se o comprimento do solenóide for da ordem ou maior que cerca de dez vezes o seu diâmetro, o campo magnético produzido em seu centro, quando percorrido por uma corrente, é bastante uniforme. As linhas de campo para uma corrente que percorre um solenóide são mostradas na figura 2.

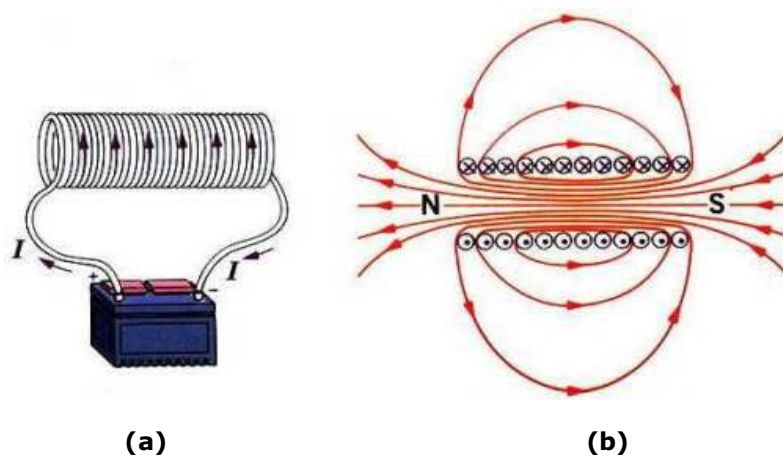


Figura 2. (a): Solenóide percorrido por uma corrente elétrica; (b): Linhas de campo magnético em um solenóide percorrido por essa corrente. Note a semelhança com as linhas de campo geradas por um magneto natural.

Se o solenóide não é longo, então, a densidade de fluxo magnético em um ponto P no eixo no solenóide, pode ser calculada a partir da Lei de Ampère, obtendo-se então²:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2} (\sin \Phi_2 - \sin \Phi_1) \quad [1] \quad (\text{solenóide finito})$$

onde n é o número de espiras por unidade de comprimento (N/L), μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo e os ângulos Φ_1 e Φ_2 estão definidos na figura 3.

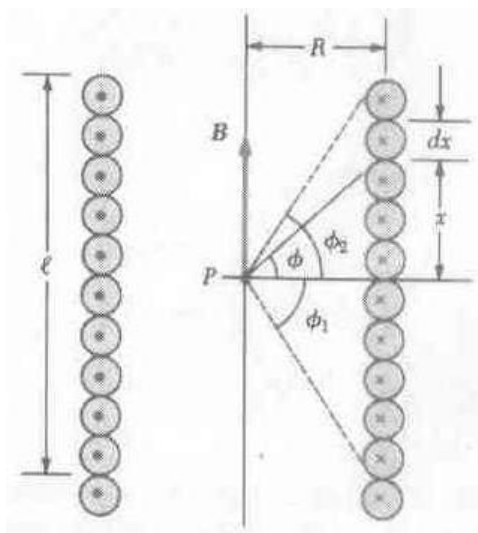


Figura 3. Geometria utilizada para determinar o campo magnético produzido por um solenóide finito em um ponto P de seu eixo central.

Essa expressão se reduz ao caso de um solenóide longo quando extrapolamos os ângulos de tal maneira que Φ_1 e Φ_2 tendam a 90° :

² Para uma abordagem mais completa desta derivação, ver referência 1, pág. 189.

$$B = \mu_0 n I$$

[2]

(solenóide ideal)

No interior de um solenóide longo, o campo magnético não é uniforme, sendo mais intenso no centro, decrescendo com uma dependência dos ângulos Φ_1 e Φ_2 nas extremidades e indo rapidamente a zero, à medida que nos afastamos do centro. Este comportamento está ilustrado na figura 4.

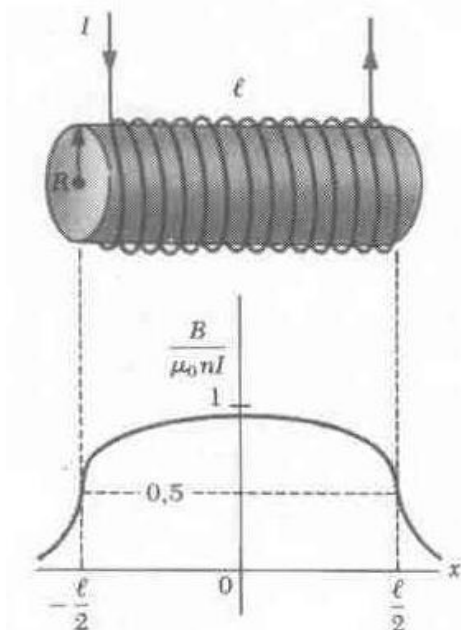


Figura 4. Intensidade do campo magnético ao longo do eixo de um solenóide compacto e longo.

É importante notar que o campo magnético próximo ao centro do solenóide, mostra-se bastante uniforme, caindo praticamente pela metade nas bordas. No caso da bobina utilizada neste experimento, o campo magnético ao longo do eixo central depende da geometria do carretel sobre o qual o enrolamento foi feito, ou seja, depende de L , Φ_1 e Φ_2 . Estes valores serão mostrados mais adiante.

Baseando-se num grande número de resultados experimentais, podemos fazer a seguinte generalização: cargas em movimento em relação ao observador, criam campos magnéticos.

MONTAGEM EXPERIMENTAL

Este experimento mostra-se bastante simples, pois requer uma lista de materiais acessível e de baixo custo. A montagem experimental utilizada, está ilustrada na figura 5.

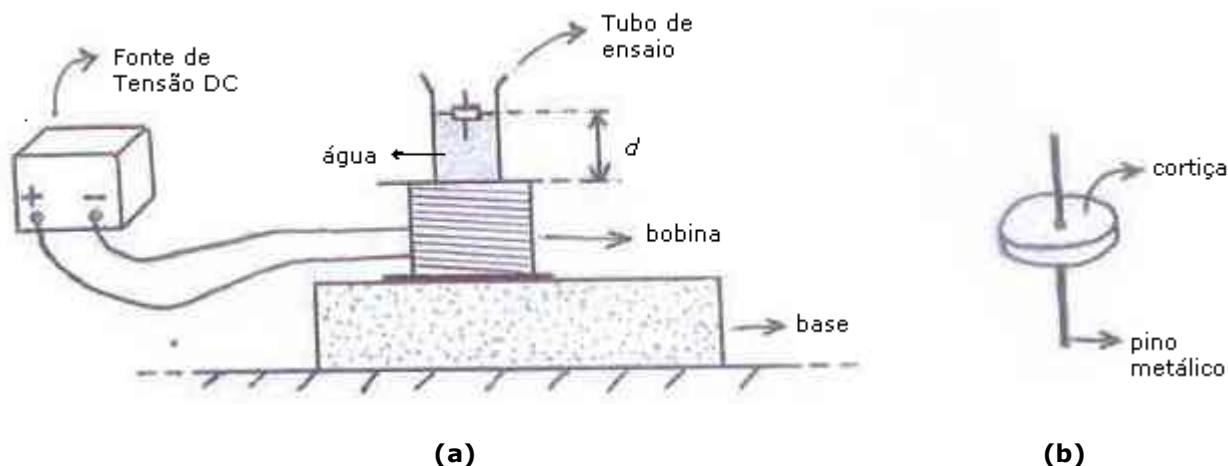


Figura 5. (a): Montagem experimental ; (b): Detalhes do corpo de prova.

Um pedaço retangular de espuma serve como suporte (base) tanto para a bobina, quanto para o tubo de ensaio (um furo apropriado na espuma mantém o tubo estável).

O líquido a ser utilizado será água e para manter o corpo de prova suspenso, usaremos cortiça. O corpo de prova consiste de um pedaço de clip metálico inserido num disco de cortiça extraída de uma rolha de garrafa.

Para a confecção da bobina, foi utilizado fio de cobre esmaltado 20 AWG³ e para os testes experimentais, utilizamos uma fonte de tensão contínua variável (0 a 15V ; 2 A).

No período inicial do trabalho foram realizados cálculos teóricos para obter uma estimativa das ordens de grandeza envolvidas no projeto, principalmente o número de espiras por unidade de comprimento (n). Para isso foram realizadas medidas experimentais do campo magnético na superfície de um "ímã de geladeira", para que pudéssemos ter uma idéia da magnitude do campo a ser alcançado e, desta forma, fazer uma estimativa de n e da corrente elétrica a ser utilizada. As medidas do campo foram realizadas com um 'Gaussímetro' digital e o valor medido foi em torno de 10^{-2} Tesla, sendo este o valor fixado nos cálculos. Como o solenóide a ser utilizado não é ideal, ou seja, seu comprimento (L) não é muito maior que o raio (r), devemos utilizar a equação [1] para determinarmos n .

Para obtermos um campo magnético da ordem de 10^{-2} Tesla sem que fosse necessário um n muito grande, definimos um valor alto, porém acessível, para a corrente elétrica. Assim, os valores de n e I tornaram-se viáveis para a confecção da bobina. Considerando um ponto P exatamente no centro da bobina, os ângulos estimados foram:

$$\Phi_1 = \Phi_2 \cong 45^\circ$$

Então, através da equação [1] e fixando os valores de B e I , obtemos:

$$\left. \begin{array}{l} B = 1,2 \times 10^{-2} \text{ T} \\ I = 1,3 \text{ A} \\ \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A} \end{array} \right\} n \cong 104 \text{ esp/cm ; para } L = 3 \text{ cm teremos } \cong 312 \text{ espiras}$$

Utilizando este valor para n , foi feito o enrolamento ao longo dos 3cm do carretel, resultando num total de aproximadamente 315 espiras. Esse enrolamento foi realizado na Oficina Eletrotécnica do IFGW e os testes experimentais realizados nos Laboratórios de Ensino (LEI).

A resistência da bobina foi medida com um 'Ohmímetro' digital resultando num valor de aproximadamente $1,6 \Omega$. Então, fixando-se o valor da corrente em $1,3 \text{ A}$, determinamos o valor da tensão a ser ajustada na fonte através da Lei de Ohm: $U = R \cdot I = 1,6 \Omega \cdot 1,3 \text{ A} \cong 2,1 \text{ V}$.

O valor de $1,3 \text{ A}$ para a corrente foi escolhido levando-se em conta a capacidade do fio ($1,6 \text{ A}$) e da fonte (até 2 A), sendo apropriado para atender às expectativas do experimento.

DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Este experimento consiste basicamente em mostrar a ação do campo magnético produzido por um solenóide finito sobre um corpo de prova com propriedades ferromagnéticas⁴, quando o mesmo encontra-se suspenso em meio líquido com o auxílio de um outro material com densidade menor.

Quando a fonte de tensão é ligada, a corrente que circula através da bobina cria um campo magnético no seu interior, magnetizando o pino metálico na mesma direção deste campo (já que o material do qual é feito o pino, possui propriedades ferromagnéticas). O corpo de prova

³ Ver tabela AWG (American Wire Gauge) no Apêndice II

⁴ Uma breve introdução às propriedades magnéticas da matéria está contida no Apêndice III

então, irá se comportar como um pequeno ímã que será atraído para o centro da bobina, ou seja, irá afundar na água. Este comportamento é mostrado na figura 6.

Para explorar um pouco mais o conceito de magnetização, podemos proceder da seguinte forma: colocamos no fundo do tubo, um pedaço do mesmo material metálico utilizado no corpo de prova (pode ser um clip inteiro) e mantemos o corpo de prova na superfície da água. Ao ligarmos o campo magnético externo, B (gerado pela corrente na bobina), o mesmo atuará sobre os dois corpos (o clip no fundo e o corpo de prova na superfície), magnetizando-os na mesma direção de B . Ao desligarmos o campo (ou seja, a fonte), essa magnetização é mantida por um certo tempo fazendo com que o clip magnetizado mantenha o corpo de prova submerso. Agora, aproximando-se um ímã permanente pelo fundo do tubo, dois fenômenos podem ocorrer dependendo da polaridade do ímã: (1): polaridade na mesma direção de B ; (2): polaridade oposta a B . A figura 6 ilustra esse procedimento.

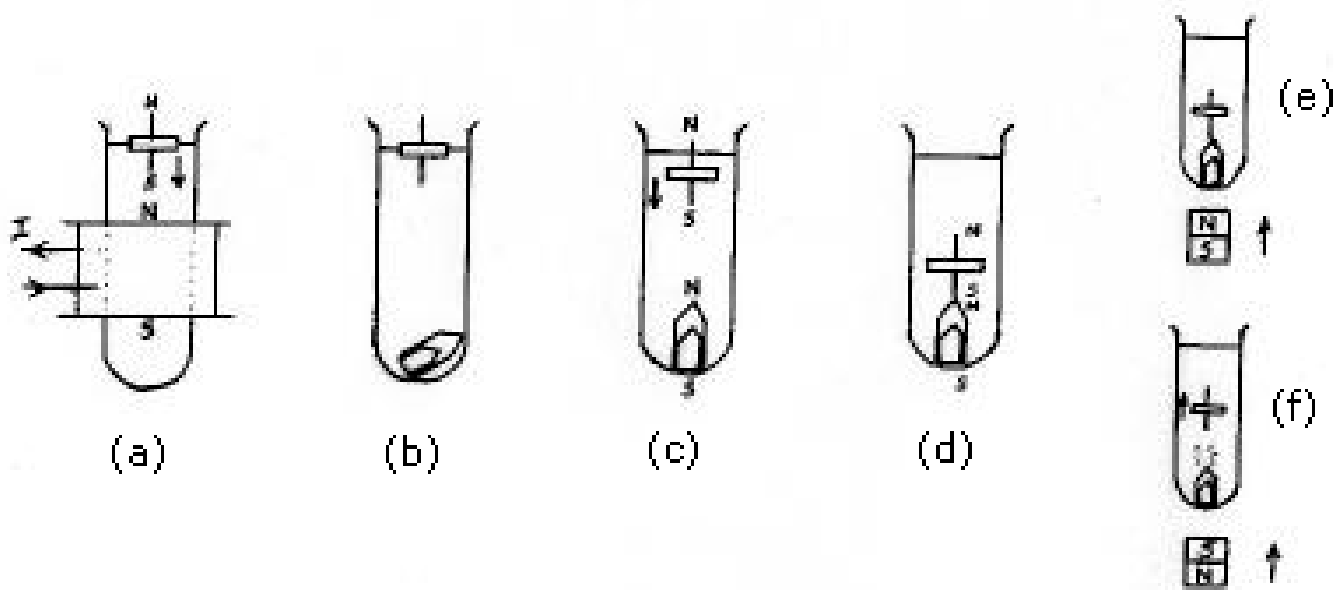


Figura 6. (a): Processo de magnetização do corpo de prova. Quando a corrente (I) flui pela bobina, o campo magnético produzido em seu interior (B), induz uma magnetização no pino com mesma polaridade de B , atraindo o corpo para baixo; (b): configuração utilizada para mostrar o conceito de magnetização (sem campo); (c): quando o campo B é ligado, o corpo de prova afunda e o clip no fundo também é magnetizado; (d): mesmo com o campo desligado novamente, a magnetização induzida no clip mantém o corpo de prova submerso; (e): ao aproximarmos um ímã permanente com polaridade paralela ao B inicial, a atual configuração se mantém; (f): agora, ao invertermos a polaridade do ímã, a magnetização induzida no clip também é invertida, causando a repulsão do corpo de prova de volta à superfície.

No caso (1), a presença do ímã apenas reforça a magnetização já existente, ainda mantendo o corpo de prova submerso. Já no caso (2), o campo magnético do ímã induz uma magnetização inversa nos metais, fazendo surgir uma força de repulsão entre o clip e o corpo de prova e desta forma, liberando o corpo de prova de volta à superfície.

Durante os testes foi observado que o fenômeno descrito em (a), ocorre apenas a partir de uma certa distância (d) entre o corpo de prova e a borda superior da bobina (ver figura 5). Para distâncias menores que d , a força magnética que atua sobre o corpo, é suficiente para superar o empuxo⁵ que mantém o corpo suspenso e fazê-lo afundar. Caso contrário, o corpo não afundará.

⁵ Uma breve ilustração do conceito de empuxo está incluída no Apêndice I

COMENTÁRIOS E CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento das atividades referentes ao projeto, foram feitas algumas modificações em relação à montagem experimental proposta inicialmente. Uma das mudanças foi o fato de termos utilizado uma bobina ao invés de enrolarmos o fio diretamente ao longo do tubo de ensaio (conforme sugerido no projeto). Isso foi feito devido a dificuldades encontradas na obtenção de uma fonte apropriada, visto que a corrente que passaria pelo enrolamento seria muito alta (da ordem de dezenas de Ampères), a menos que esta corrente agisse num intervalo de tempo bastante curto. Mesmo assim, estaríamos colocando em risco a segurança do experimento.

Um outro ponto a ser destacado refere-se ao estudo em regime alternado. O fato de termos trabalhado com uma voltagem baixa (aproximadamente 2 V), dificultou a obtenção de uma fonte alternada segura e estável para o circuito (eventualmente um Variac), sendo que o efeito visual do experimento não teria uma melhora relevante. A solução destes problemas, bem como aplicações práticas⁶ envolvendo este projeto, podem ser desenvolvidas em futuros trabalhos.

Apesar dessas modificações, os objetivos do projeto permaneceram inalterados e os resultados obtidos foram bastante satisfatórios.

A realização deste projeto foi muito gratificante e pudemos concluir que através de procedimentos simples, pode-se explorar conceitos físicos importantes e, em conjunto com uma abordagem histórica, despertar no aluno o interesse pelo estudo dos fenômenos naturais.

APLICAÇÕES PRÁTICAS

Nesta seção serão mostradas algumas aplicações práticas envolvendo o princípio físico dos eletroímãs. Muitas dessas aplicações, estão presentes em nosso dia a dia, sendo que muitas delas passam despercebidas pela maioria das pessoas. A seguir são mostradas ilustrações sobre o esquema básico de funcionamento de: (6a) uma trava magnética; (6b) um acendedor de fogão antigo e (6c) uma campainha domiciliar. Inúmeros outros exemplos poderiam ser citados, entre eles: alto-falantes, motores elétricos, bombas para aquário, etc.

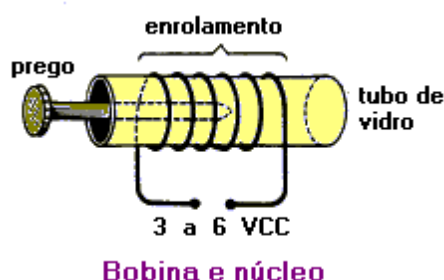


Figura 6a. Esquema básico de uma trava magnética, na qual o prego é atraído para o centro da bobina quando o circuito é fechado.

⁶ Por exemplo, pode-se calibrar uma escala de modo a medir densidades ou viscosidades de fluidos. Uma mola presa ao corpo de prova servirá de ponteiro para o instrumento.

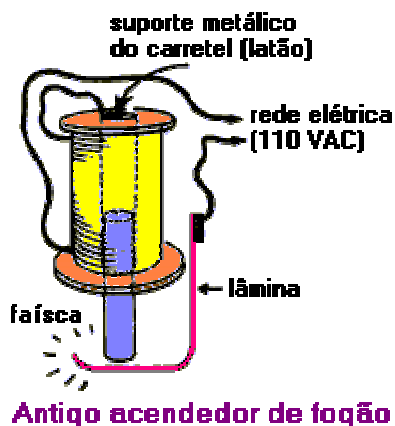


Figura 6b. Esquema básico de um antigo acendedor de fogão. Quando o cilindro de ferro toca a lâmina, o mesmo é atraído para o centro do carretel, abrindo o circuito e produzindo uma faísca. A força gravitacional se encarrega de completar o ciclo.

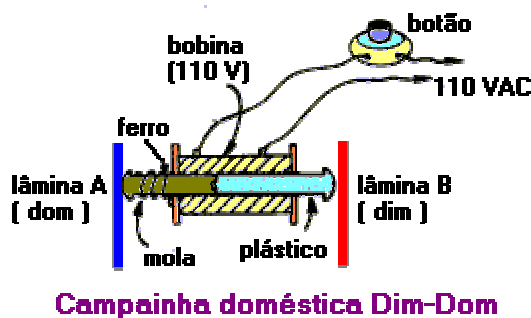


Figura 6c. Esquema de uma campainha residencial "dim-dom". O mesmo princípio dos dois exemplos anteriores está envolvido. Quando o botão é pressionado, pino de ferro é atraído para o centro do enrolamento e a parte de plástico produz o "dim". Quando o circuito é aberto novamente, uma mola faz com que o pino de ferro volte à posição original, assim produzindo o "dom".

APÊNDICE I

Este Apêndice inclui uma breve ilustração do conceito de empuxo aplicado a corpos flutuantes.

FLUTUAÇÃO DE EMBARCAÇÕES

A madeira (que não seja aroeira) flutua e o ferro afunda. Antigamente (no tempo de Cabral) todos os navios eram de madeira. Quando, há mais de 100 anos, surgiram os primeiros navios de ferro, havia marinheiros que se recusavam a entrar nestes navios, porque achavam que afundariam. No entanto, os modernos navios de ferro afundam menos que as caravelas do tempo das descobertas.



Figura 7. O peso referente ao volume de água deslocado pelo navio (empuxo), equilibra o peso total do navio fazendo com que o mesmo flutue.

Como é possível um barco de ferro flutuar?

O navio é oco. Quando chega à água, ele desloca (empurra) uma parte da água, até que o peso da água deslocada seja igual ao peso total do navio (fora e dentro d'água). Neste instante ele para de afundar e flutua. Se furar o casco do navio, entra água e o peso do navio mais a água que entrou se torna maior que da água deslocada e ele afunda, como afundou o submarino do qual aspiramos ar entrando água.

Não adianta fazer navios de madeira, pois o navio sempre leva carga que o torna pesado e se furar o casco, ele acaba afundando. Uma embarcação que aproveita a flutuação da madeira é a jangada feita de troncos amarrados uns aos outros.

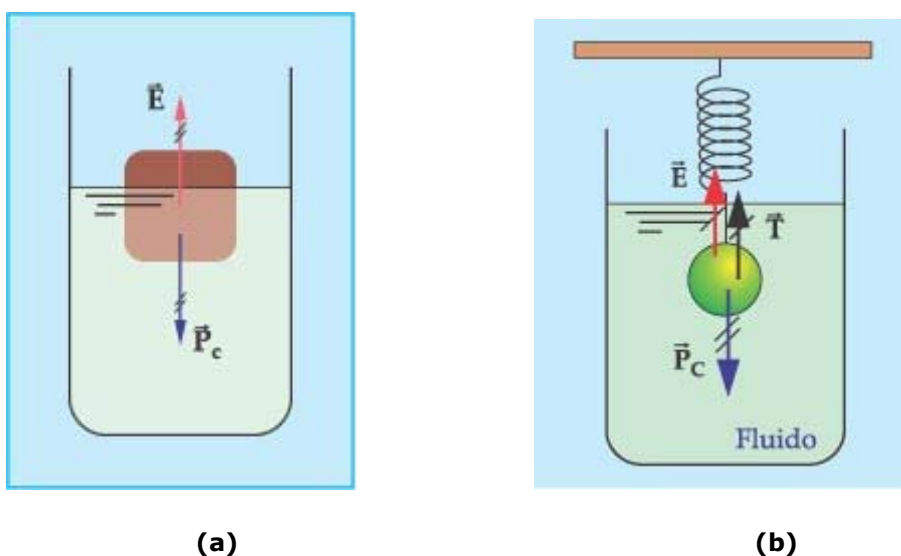


Figura 8. (a): Peso e empuxo atuando sobre um corpo flutuando num fluido; (b): Diagrama de forças em um dinamômetro. A força de tração imposta pela mola é somada ao empuxo do corpo, de forma a cancelar seu peso.

Número AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm ²)	Número de espiras por cm	Kg por Km	Resistência (ohms/Km)	Capacidade (A)
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92
23	0,5733	0,26	16,0	2,29	56,4	0,73
24	0,5106	0,20	18,0	1,82	85,0	0,58
25	0,4547	0,16	20,0	1,44	106,2	0,46
26	0,4049	0,13	22,8	1,14	130,7	0,37
27	0,3606	0,10	25,6	0,91	170,0	0,29
28	0,3211	0,08	28,4	0,72	212,5	0,23

10

APÊNDICE II - TABELA AWG (American Wire Gauge) – Fios e Cabos Padrão
Nesta Tabela não são mostrados todos os números dos fios (apenas de 14 a 28)

APÊNDICE III – PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DA MATÉRIA

Determinados materiais apresentam propriedades magnéticas. Por propriedade magnética se entende a capacidade que um objeto tem de atrair outros objetos. Na interação entre dois objetos feitos de materiais magnéticos há também a possibilidade de repulsão entre eles. Os materiais que naturalmente apresentam propriedades magnéticas são chamados de ímãs. Convém notar que esses fenômenos de atração e repulsão podem também ser observados em materiais não magnéticos. Por exemplo, entre dois objetos carregados eletricamente. Porém, mesmo que carregados eletricamente, materiais não magnéticos não interagem com materiais magnéticos.

Em geral, propriedades elétricas ou magnéticas estão associadas a classes de materiais diferentes.

Uma outra forma de distinguir o tipo de fenômeno é conhecendo-se um dos materiais envolvidos. Sabemos que um ímã natural possui propriedades magnéticas: então todos os materiais que ele atrair ou repelir também terão propriedades magnéticas.

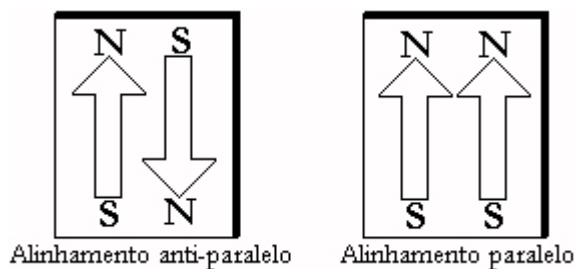
As propriedades básicas observadas em materiais magnéticos são explicadas pela existência de dois polos diferentes no material. A esses polos se dão os nomes de polo norte e sul. Polos de mesmo tipo se repelem e polos de tipos opostos se atraem. A esta configuração de dois polos dá-se o nome de "dipolo magnético". O dipolo magnético é a grandeza que determina quão forte é o ímã e sua orientação espacial pode ser representada por uma flecha que aponta do polo sul para o polo norte.

As propriedades magnéticas dos materiais tem sua origem nos átomos, pois quase todos os átomos são dipolos magnéticos naturais e podem ser considerados como pequenos ímãs, com polos norte e sul. Isto é algo que decorre de uma somatória de dipolos magnéticos naturais dos

10

elementos básicos da matéria (o "spin") com o movimento orbital dos elétrons ao redor do núcleo (pois este movimento cria um dipolo magnético próprio).

Para cada material, a interação entre seus átomos constituintes determina como os dipolos magnéticos dos átomos estarão alinhados. Sabe-se que dois dipolos próximos e de igual intensidade anulam seus efeitos se estiverem alinhados anti-paralelamente; somam seus efeitos se estiverem alinhados paralelamente.



Assim, teremos os seguintes casos:

- Se os dipolos, sob qualquer condição, permanecerem desalinhados, apontando em direções aleatórias, há um cancelamento geral dos efeitos dos dipolos e o material não apresenta nenhuma propriedade magnética macroscopicamente observável (material não-magnético).

- No caso dos dipolos estarem todos alinhados, temos um material chamado ferromagnético permanente (ímã natural).

- Se os dipolos somente se alinharem na presença de um outro ímã, temos três casos:

(1) material ferromagnético: o ímã externo, ao atrair um dos polos de cada um dos átomos do material ferromagnético, termina por alinhar todos os dipolos magnéticos deste. Com todos os seus dipolos magnéticos alinhados, o ferromagnético, para todos os efeitos comporta-se como um ímã natural. O resultado final é que o material ferromagnético é atraído pelo ímã natural. O ferro, o níquel e o cobalto são alguns exemplos de materiais ferromagnéticos.

(2) material paramagnético: o alinhamento é similar ao caso ferromagnético, porém de intensidade aproximadamente 1000 vezes menor. Por isso também não é de fácil observação. O resultado final é que o material paramagnético é muito fracamente atraído pelo ímã natural. O vidro, o alumínio e a platina são alguns exemplos de materiais paramagnéticos.

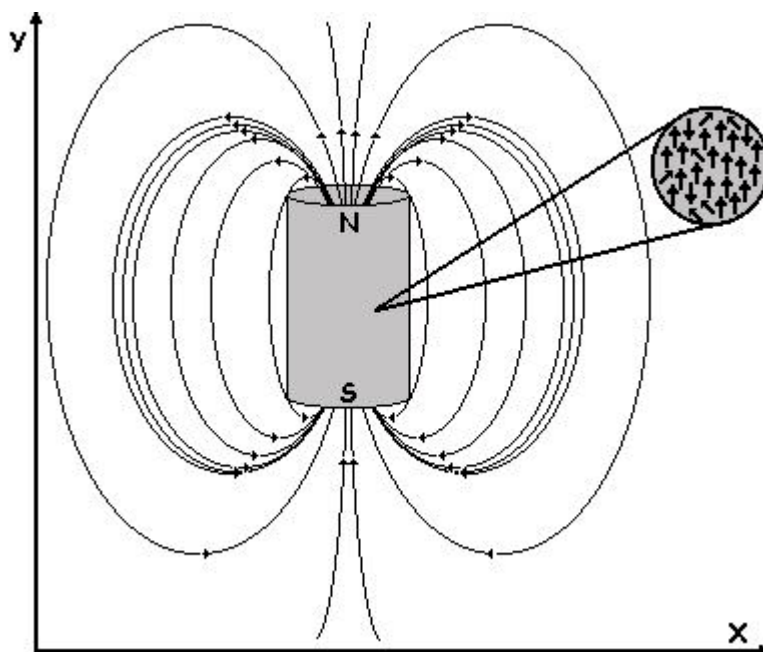
(3) material diamagnético: além de causas diferentes, macroscopicamente é o caso oposto do paramagnético. O resultado final é que o material diamagnético é muito fracamente repelido pelo ímã natural. No fundo, todo material é diamagnético; só que na maioria dos casos o ferromagnetismo (permanente ou não) ou o paramagnetismo são mais fortes que o diamagnetismo. A água, a prata, o ouro, o chumbo e o quartzo são alguns exemplos de materiais diamagnéticos.

Convém ressaltar que o alinhamento nunca é total, nem em número de dipolos e nem na direção de cada um deles; trata-se de médias.

De acordo com um dos primeiros pesquisadores do magnetismo, Michael Faraday, o campo magnético é a região do espaço na qual se realiza a interação magnética entre dois objetos que apresentam propriedades magnéticas. E as linhas de campo são as linhas imaginárias que mapeiam o sentido deste campo em torno dos objetos. Ou seja, elas indicam a direção da

atração ou repulsão magnética num ponto do espaço sob a influência de objetos magnetizados. As linhas de campo apontam do polo norte para o polo sul.

10



A atração ou repulsão entre dois objetos magnetizados é intermediada pela ação do campo magnético. Por outro lado, pode não haver atração ou repulsão entre dois objetos magnetizados, mesmo havendo entre eles campo magnético. Isto ocorre porque o campo magnético de um ímã enfraquece conforme aumenta a distância a ele. Então, dependendo da distância que separam os ímãs, o campo magnético não é forte o suficiente para, por exemplo, vencer o atrito que existe entre cada ímã e a superfície de uma mesa sobre a qual eles estejam colocados.

REFERÊNCIAS

1. Raymond A. Serway, Física 3 para Cientistas e Engenheiros com Física Moderna, 3ª edição, Livros Técnicos e Científicos Editora ;
2. Ference Jr.; Harvey B. Lemon; Reginald J. Stephenson, Curso de Física – Eletromagnetismo, Editora Edgard Blücher Ltda.;
3. D. Halliday; R. Resnick; J. Walker, Fundamentals of Physics-Extended, 6a edição, John Wiley & Sons Inc.;
4. hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html ;
5. farside.ph.utexas.edu/teaching/302l/lectures/node61.html ;
6. www3.ltu.edu/~s_schneider/physlets/main/bsolenoid.shtml ;
7. www.physics.sjsu.edu/facstaff/becker/physics51/mag_field.htm ;
8. www.cdsc.usp.br/roteiros/fluemp.htm ;
9. www.howstuffworks.com