

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO COBRE E ALUMÍNIO; SOBRE A  
FORÇA MAGNÉTICA EM UM ÍMÃ CAINDO DENTRO DE UM TUBO.**

Cristiane Rocha de Almeida

Prof. Dr. Francisco José dos Santos

Rio Claro (SP)

2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

CRISTIANE ROCHA DE ALMEIDA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO COBRE  
E ALUMÍNIO; SOBRE A FORÇA MAGNÉTICA EM UM ÍMÃ  
CAINDO DENTRO DE UM TUBO.

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,  
da Universidade Estadual Paulista Júlio  
de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Licenciada em Física.

Rio Claro - SP

2013

538 Almeida, Cristiane Rocha de  
A447e Estudo das propriedades elétricas do cobre e alumínio  
sobre a força magnética em um ímã caindo dentro de um tubo  
/ Cristiane Rocha de Almeida. - Rio Claro, 2013  
36 f. : il., figs., tabs., fots.

Trabalho de conclusão de curso (licenciatura - Física) -  
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas

Orientador: Francisco José dos Santos

1. Magnetismo. 2. Eletromagnetismo. 3. Indução  
eletromagnética. 4. Lei faraday-lenz. I. Título.

CRISTIANE ROCHA DE ALMEIDA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO COBRE  
E ALUMÍNIO; SOBRE A FORÇA MAGNÉTICA EM UM ÍMÃ  
CAINDO DENTRO DE UM TUBO.

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,  
da Universidade Estadual Paulista Júlio  
de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Licenciada em Física.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Francisco José dos Santos (orientador)

Prof. Dr. Roberto E. Lagos Monaco

Prof. Dr. Giovani Fornereto Gozzi

Rio Claro, 13 de novembro de 2013.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

## RESUMO

Campos magnéticos podem ser produzidos por ímãs naturais, ímãs artificiais, fios e solenoides percorridos por uma corrente elétrica. Um experimento interessante para observar a interação entre campo magnético e cargas livres em um condutor, é o de um ímã caindo dentro de um tubo feito com material condutor. O retardamento da queda do ímã pelo surgimento de um campo em sentido contrário ao original (Lei de Lenz) é função do número de elétrons livres no condutor e das propriedades elétricas deste. Com base nisso, temos como objetivo deste trabalho estudar a relação entre as propriedades elétricas dos materiais condutores, cobre e alumínio, com a força magnética gerada por um magneto de neodímio-ferro-boro, ímã, caindo dentro de um tubo de cobre e alumínio, posicionado verticalmente. Ao realizarmos esse experimento e o estudarmos, observamos que ele é uma demonstração da Lei de Faraday-Lenz.

Palavras-chave: Ímã. Campo Magnético. Indução Eletromagnética. Lei Faraday-Lenz; Eletromagnetismo.

## **ABSTRACT**

Magnetic fields can be produced by natural magnets, artificial magnets, and by circulating electric currents in wires and solenoids. An interesting experiment to observe the interaction between the magnetic field and free charges in a conductor, a magnet falling inside a tube made of conductive materials. The slowing down of the magnet by the appearance of a field in the opposite direction to the original one (Lenz's Law) is function the number of free electrons in the conductor and the electrical properties of this. Based on this, the objective of this study is to analyze the relationship between the electrical properties of conductors, copper and aluminum, with magnetic force on a neodymium magnet-iron-boron magnet falling inside a copper tube and aluminum, positioned vertically. In performing this experiment, we observed that it is a demonstration of Lenz-Faraday's Law.

Keywords: Magnet. Magnetic Field. Electromagnetic Induction. Lenz-Faraday's Law. Electromagnetism.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Eletricidade.....	7
2.1.1 Correntes elétricas em materiais condutores .....	8
2.2 Magnetismo.....	11
2.2.1 Ímã .....	12
2.2.2 Campo magnético .....	14
2.2.3 Relação dos principais processos de imantação.....	14
2.2.4 Linha de força.....	16
2.2.5 Características do vetor campo magnético H.....	18
2.2.6 Densidade de fluxo magnético ou indução magnética .....	19
2.2.7 Fluxo magnético .....	20
2.3 Eletromagnetismo .....	21
2.3.1 Lei de indução eletromagnética.....	22
<b>3. EXPERIMENTOS.....</b>	<b>25</b>
3.1 Frenagem eletromagnética.....	25
3.2 Verificação do aparecimento de corrente induzida.....	32
<b>4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>36</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>37</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os fenômenos magnéticos sempre existiram na natureza, no entanto, suas primeiras observações só foram feitas pelos gregos numa cidade asiática conhecida como Magnésia. Os gregos perceberam que uma pedra possuía características de atrair o material ferro. Atualmente essas pedras são chamadas de magnetitas devido ao nome de sua cidade de origem.

Outra versão, segundo Plínio, O Velho (23 – 79 a.C.), o nome da cidade de Magnésia se deu devido a uma descoberta feita pelo grego Magnes, pastor de ovelha na região da Tessália, ele observou que a ponta de ferro do seu cajado era atraída por algumas pedras ao longo do caminho, quando estava pastorando seu rebanho pela região.

Tales de Mileto foi o primeiro a tentar explicar a característica de atrair ferro dessa pedra. Segundo ele, a magnetita, tinha uma espécie de “alma” e que poderia comunicar-se com materiais constituídos de ferro e que também tinha o poder de atraí-lo. Assim surge o conceito de magnetismo, a origem do estudo da pedra que atrai ferro, ainda é dúbia, pois segundo alguns autores, o nome ‘magnetismo’ deriva-se do nome da região (Magnésia), para outros autores, o termo derivou-se do nome do pastor de ovelhas, que constatou a característica da pedra.

Essa breve descrição história descreve-se a origem do assunto central abordado neste trabalho. Estudar-se-á o magnetismo para compreender e realizar dois experimentos, que verificam a relação entre a interação do campo magnético e as cargas livres em tubos condutores de cobre e alumínio.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo discutem-se os conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento do trabalho.

### 2.1 Eletricidade

Chamamos de eletricidade o conjunto de fenômenos relacionados à existência ou fluxo de carga elétrica. Carga elétrica é uma propriedade intrínseca das partículas elementares que formam a matéria, ou seja, é uma característica relacionada à própria existência das partículas; os prótons são carregados positivamente, os nêutrons não possuem carga e os elétrons são carregados negativamente.

A eletricidade é regida pela força elétrica, que é originada devido a interação entre cargas elétricas. Esta força pode ser de repulsão, quando as cargas possuem o mesmo sinal, ou de atração, quando as cargas possuem sinal contrário. O campo elétrico é uma grandeza vetorial que representa a região do espaço onde cargas elétricas estão sujeitas à ação de uma força elétrica.

O estudo da eletricidade é subdividido em duas frentes: a eletrostática, que estuda o comportamento e as propriedades de cargas em repouso ou em equilíbrio no condutor. A eletrodinâmica estuda os fenômenos em que a carga elétrica se desloca no interior do condutor.

O conceito fundamental da eletrodinâmica é o de corrente elétrica, relacionada como movimento de cargas elétricas. Pode-se medir a intensidade média de corrente elétrica,  $i$ , no intervalo de tempo,  $\Delta t$ , através da quantidade de carga elétrica,  $\Delta q$ , que atravessa uma determinada área no interior do material (eq. 1, Fig. 3)

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1)$$

Toda a matéria é composta por átomos, unidos por ligações químicas e interações intermoleculares. Chama-se de íon o átomo com ausência ou excesso de elétrons, íons positivo quando ocorre a perda de elétrons e íon negativo quando há ganho de elétrons.

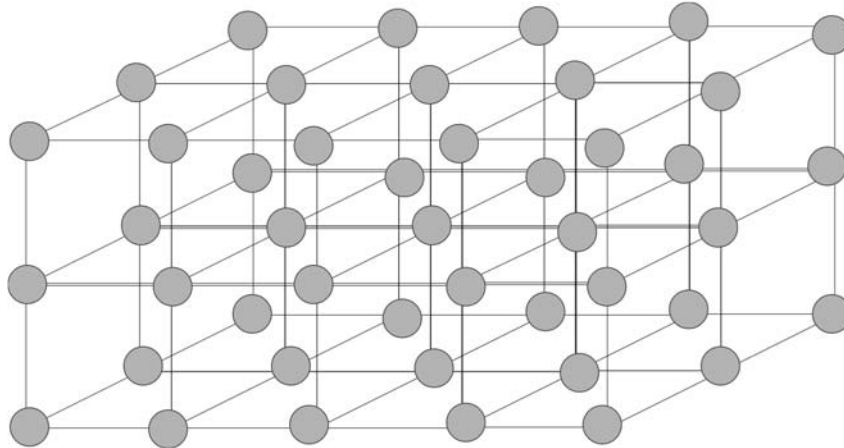
A classificação dos materiais como condutores ou isolantes se deve a facilidade com a qual as cargas elétricas negativas e positivas se movem no seu interior. Nos materiais condutores, como por exemplo, o cobre, o alumínio e outros metais, as cargas elétricas se movem com facilidade. Nos materiais em que as cargas não podem se mover livremente chamamos de não condutores, conhecidos também como isolantes, por exemplo, o vidro, a madeira e a borracha.

O comportamento dos condutores e não condutores depende da estrutura e das propriedades elétricas do material. Um átomo de qualquer metal, isolado, é eletricamente neutro. Por exemplo, o núcleo de um átomo de cobre é constituído por 29 prótons sendo cercado por 29 elétrons, no entanto quando uma grande quantidade de átomos de cobre se une formando uma amostra de cobre metálico, um ou mais elétrons mais afastados do núcleo de cada átomo se tornam livres, pois a intensidade das atrações dos elétrons ao núcleo é reduzida devido às interações com os elétrons e o núcleo dos átomos da vizinhança. Essas cargas negativas possuem facilidade em mover-se, passando a ser denominadas *elétrons livres*, classificando assim o cobre como condutor. Estes elétrons são conhecidos como elétrons livres e podem se movimentar através da rede cristalina no interior do metal.

### **2.1.1 Correntes elétricas em materiais condutores**

No interior de materiais condutores, cada átomo perde um ou mais elétrons tornando-se, portanto, um íon positivo. Os íons se organizam de uma maneira regular, dando origem a uma rede cristalina tridimensional.

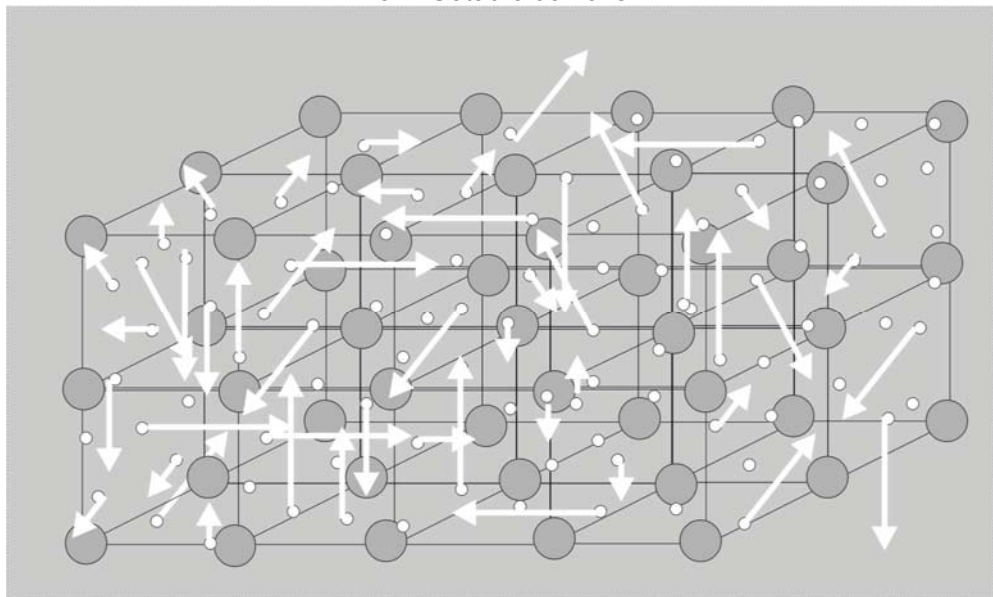
Referência: Laboratório Didático do Instituto de Física, 2003. Disponível em: <[www.if.ufrj.br](http://www.if.ufrj.br)> Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 1:** Rede cristalina tridimensional formada por íons de um metal.

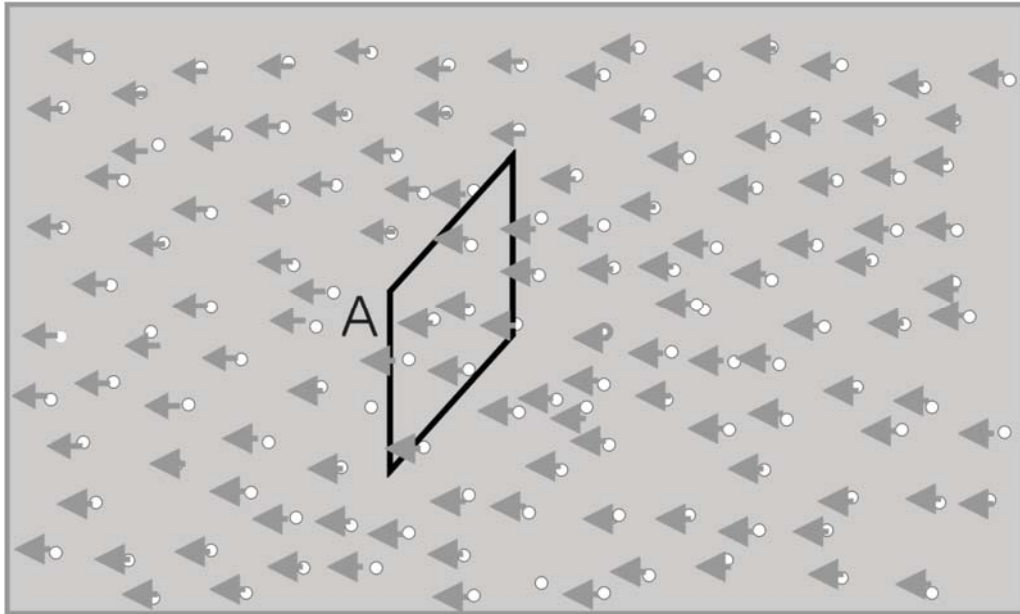
No metal, à temperatura ambiente, os íons e os elétrons livres possuem energia térmica suficiente para se movimentarem pelo material, de maneira desordenada e incerta. Os íons movem-se em torno de seu eixo de equilíbrio, oscilando. Na ausência de campo elétrico, os elétrons livres movimentam-se aleatoriamente no interior do material.

Referência: Laboratório Didático do Instituto de Física, 2003. Disponível em: <[www.if.ufrj.br](http://www.if.ufrj.br)> Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 2:** Movimento desordenado e incerto dos elétrons no interior do metal.

Referência: Laboratório Didático do Instituto de Física, 2003. Disponível em: <[www.if.ufrj.br](http://www.if.ufrj.br)> Acesso em: Outubro de 2013.



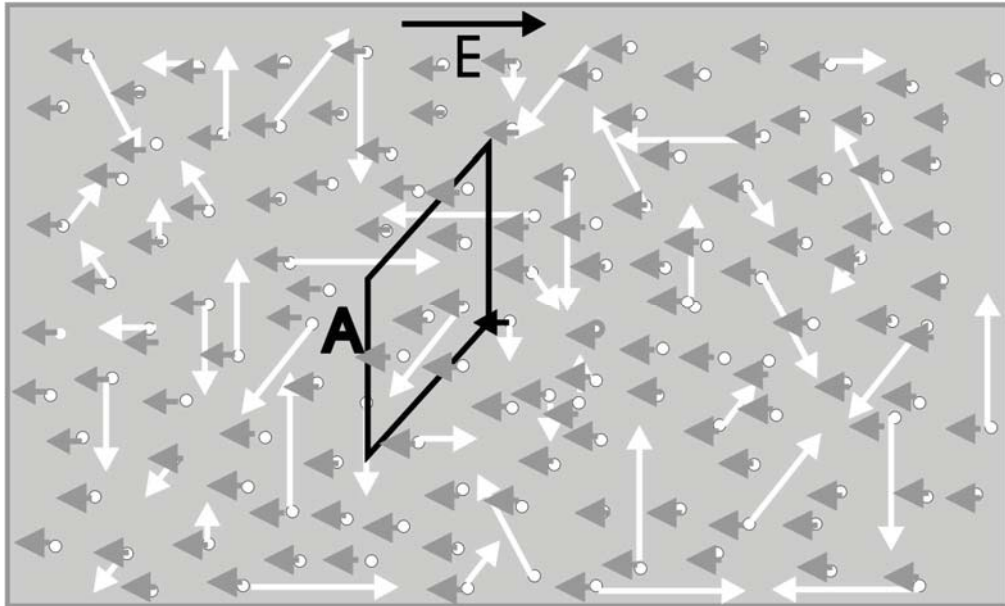
**Figura 3:** Movimento desordenado e incerto dos elétrons no interior do metal.

Dessa forma é possível notar que, no caso do movimento randômico de elétrons em um material condutor à temperatura ambiente (Fig. 2), a corrente elétrica é nula. Em média, as direções e sentidos do movimento dos elétrons se anulam, e a intensidade média de corrente é zero.

Aplicando-se uma diferença de potencial ao material, através de uma tomada ou de uma pilha, haverá geração de um campo elétrico influenciando o movimento dos elétrons livres, que por sua vez adquirem um movimento adicional ao movimento térmico. Os íons, por interagirem entre si e apresentarem grande massa em relação aos elétrons, praticamente não se movem na presença de um campo elétrico. Os elétrons adquirem velocidade na mesma direção, mas com sentido contrário ao campo elétrico ao qual estão submetidos. Essa velocidade é denominada velocidade de deslocamento ou velocidade de avanço.

Pode-se observar assim a existência de corrente elétrica no condutor com o movimento ordenado de cargas aceleradas pelo campo elétrico (Fig. 4).

Referência: Laboratório Didático do Instituto de Física, 2003. Disponível em: <[www.if.ufrj.br](http://www.if.ufrj.br)> Acesso em: Outubro de 2013.



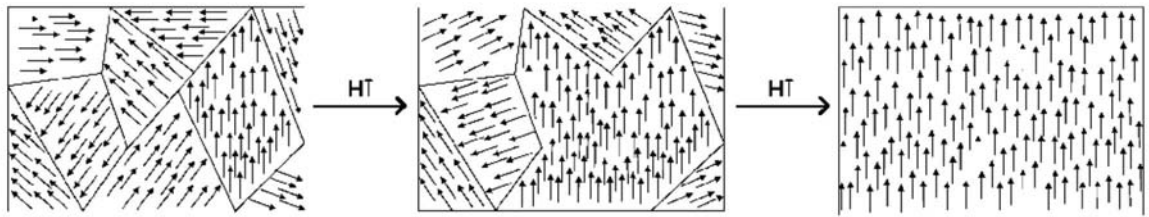
**Figura 4:** Metal sob a ação de um campo elétrico externo, a velocidade de deslocamento é representada pelas setas cinza, possui sentido contrário e a mesma direção do campo aplicado. As setas brancas ilustra o movimento desordenado e incerto de alguns elétrons no interior do metal.

## 2.2 Magnetismo

A propriedade intrínseca do elétron que atribui à matéria características magnéticas é o *spin*. Cada spin tem a mesma atuação que a de um pequeno ímã natural para todos os materiais. A organização dos spins polarizados em uma mesma direção e sentido é conhecida como domínio magnético (Fig. 5), e a magnitude desse ordenamento é o que origina, macroscopicamente, a característica magnética da matéria.

Em um material sem magnetismo natural, os efeitos magnéticos dos domínios são anulados, pois durante sua formação os spins adquirem orientações em diferentes sentidos. No entanto, se durante a formação do material os spins adquirirem uma orientação dominante e única, os efeitos magnéticos de cada domínio são somados, originando um ímã com propriedades magnéticas naturais.

Referência: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 2007. Disponível em:  
<[www.efisica.if.usp.br](http://www.efisica.if.usp.br)>. Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 5:** Alinhamento dos Domínios magnéticos, devido à presença de campo magnético.

No magnetismo o conceito de *massa magnética* é o equivalente ao conceito de carga elétrica em Eletrostática, e possibilita medir a força entre materiais imantados. As massas magnéticas serão consideradas puntiformes neste estudo. Simplificando dizemos que a região polar se equipara a um ponto, pois a massa magnética está compreendida numa região que as dimensões podem ser desconsiderados.

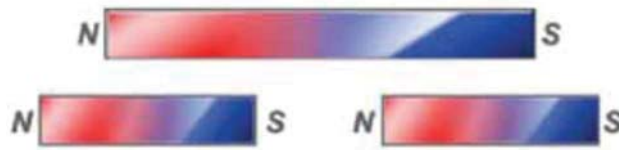
### 2.2.1 Ímã

A propriedade do tetróxido de triferro em atrair o ferro foi observada primeiramente em uma região da Ásia, chamada Magnésia. Para esses materiais foi dado o nome de ímãs. Devido a esse fato, o ímã ficou conhecido também como magneto, e o minério de ferro é também chamado de magnetita. A magnetita por ser encontrada na própria natureza e possuir propriedades magnéticas é conhecida como ímã natural. Mas é possível também obter ímãs artificiais, submetendo corpos que não apresentavam originalmente as propriedades de um ímã a um processo denominado imantação.

As extremidades de um ímã são denominadas polos magnéticos, norte e sul, pois as forças de atração magnética atuam com uma maior intensidade nas extremidades do ímã.

Na natureza não é possível ter um polo isolado, apenas norte ou apenas sul. Ou seja, se cortarmos um ímã, na parte que originalmente era polo norte, aparecerá um novo polo sul e se manterá o polo norte; no polo originalmente sul, aparecerá um novo polo norte e se manterá o polo sul, como representado na figura 6.

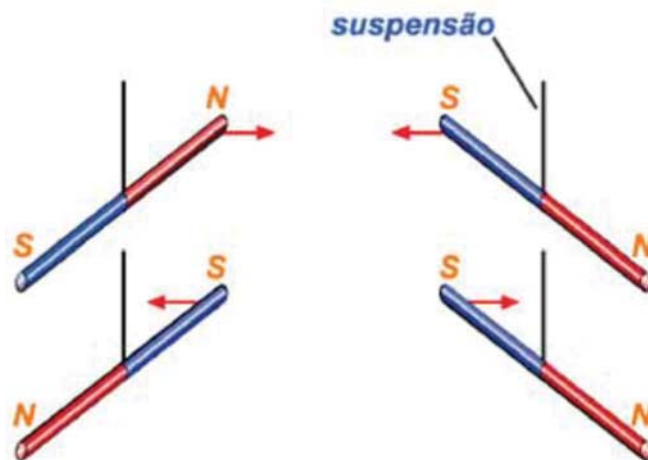
Referência: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 2007. Disponível em: <[www.efisica.if.usp.br](http://www.efisica.if.usp.br)>. Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 6:** Ilustração dos polos magnéticos de um ímã e da impossibilidade de existir um polo isolado.

Aproximando as regiões polares de todas as maneiras possíveis entre dois ímãs suspensos por seus centros de gravidade, observa-se que as regiões de mesmo polo (norte ou sul), sempre se repelem. Quando o mesmo ocorrer com as regiões de polos diferentes elas se atraem. Chama-se de fenômenos de atração e repulsão magnética.

Referência: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 2007. Disponível em: <[www.efisica.if.usp.br](http://www.efisica.if.usp.br)>. Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 7:** Verifica-se a atração entre as regiões polares de nome diferente na parte superior e a repulsão das regiões de mesmo nome na parte inferior.

Também é possível verificar que a região polar norte do ímã é aquela voltada para o polo norte geográfico da Terra e a região polar sul do ímã é voltada para o polo sul geográfico da Terra. Com isso, é possível concluir-se que o polo norte geográfico da Terra corresponde a uma região polar sul magnética, e que o polo sul geográfico é uma região polar norte magnética. A utilização das bússolas só é válida devido a essa orientação magnética de ímãs em relação ao campo magnético terrestre.

### 2.2.2 Campo magnético

Define-se como campo magnético, a região em torno de uma massa magnética, em que essa consiga exercer ações magnéticas. Assim como o campo elétrico é produzido por cargas elétricas, natural seria que o campo magnético fosse produzido por cargas magnéticas. No entanto, a possibilidade de existência de cargas magnéticas, também conhecidas como monopolos magnéticos, mesmo sendo admitida em algumas teorias, nunca foi observada. Entretanto, os campos magnéticos podem ser produzidos de duas formas.

A utilização de partículas eletricamente carregadas em movimento, como os elétrons, são responsáveis pela corrente elétrica no condutor, é a primeira forma de produzir um campo magnético. Correntes elétricas estacionárias (sem variação de fluxo de cargas elétricas no tempo) geram campos magnéticos uniformes (lei de Ampère ou de Biot-Savart).

A segunda forma é usar partículas que possuem um campo magnético intrínseco, como o spin do elétron. Em materiais magnetizados, os spins dos elétrons são somados originando um domínio magnético, que por sua vez induz um campo magnético em uma região em torno do material.

### 2.2.3 Relação dos principais processos de imantação:

- Indução magnética

Imantação induzida pela aproximação de um ímã e um material neutro. O campo magnético do ímã é capaz de alinhar os domínios magnéticos do material, polarizando-os em uma direção preferencial. Com o afastamento do ímã o material é capaz de manter os domínios magnéticos alinhados, adquirindo, assim, propriedade magnética.

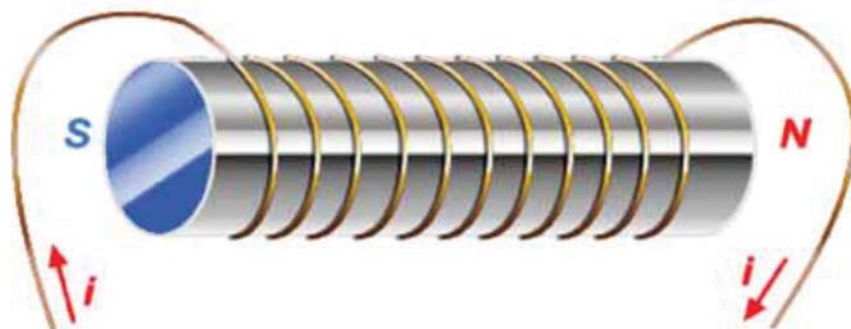
- Atrito

Quando uma barra de ferro é atritada sempre no mesmo sentido com um ímã, sendo a barra neutra, ela se imanta. Necessariamente o atrito deve ser no mesmo sentido sempre, caso contrário a barra não se imantará, pois o atrito em um sentido desfaz a imantação possivelmente obtida no outro.

- Corrente elétrica

Quando a imantação se dá por meio de corrente elétrica, o ímã formado recebe o nome de eletroímã. Um eletroímã é obtido quando uma barra de ferro é enrolada por um fio condutor, que por sua vez é percorrido por uma corrente elétrica. O solenoide formado pelo fio enrolado é capaz de gerar um campo magnético aproximadamente uniforme em seu interior. Esse campo magnético, por sua vez, influencia no alinhamento dos domínios magnéticos da barra de ferro, potencializando o campo magnético total. Os eletroímãs apresentam-se muito mais poderosos que os ímãs naturais, e diferentemente deles os eletroímãs permitem controlar a intensidade do campo magnético, aumentando ou diminuindo a intensidade da corrente elétrica que percorre o fio. Para obter um eletroímã mais poderoso basta aplicarmos corrente elétrica mais alta, e para que ele deixe de funcionar basta interromper a corrente.

Referência: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 2007. Disponível em: <[www.efisica.if.usp.br](http://www.efisica.if.usp.br)>. Acesso em: Outubro de 2013.



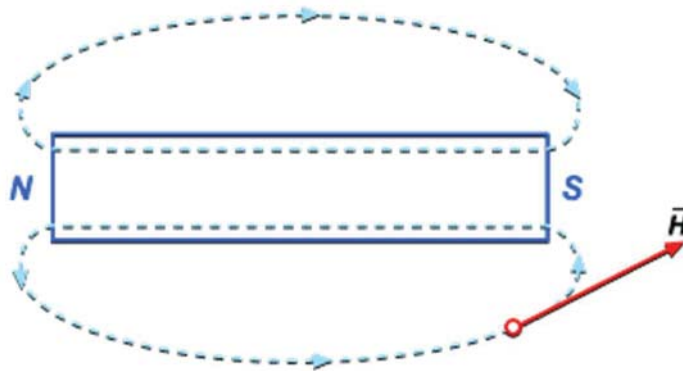
**Figura 8:** Imantação por corrente elétrica. (Imagem ilustrativa de um eletroímã).

Tem-se um ímã permanente quando depois de imantado o material é capaz de manter as propriedades magnéticas por um longo tempo. Em alguns casos a imantação é preservada por anos, como nos ímãs naturais. Por outro lado, se depois de imantado o material perder rapidamente as propriedades magnéticas é conhecido como ímã transitório ou temporal. Eletroímãs são considerados ímãs temporais.

### 2.2.4 Linha de força

Na existência de um campo magnético, podemos representá-lo por linhas de força de campo magnético, sendo que os vetores do campo,  $\vec{H}$ , são sempre tangentes à linha de força (Fig. 9).

Referência: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 2007. Disponível em: <[www.efisica.if.usp.br](http://www.efisica.if.usp.br)>. Acesso em: Outubro de 2013.

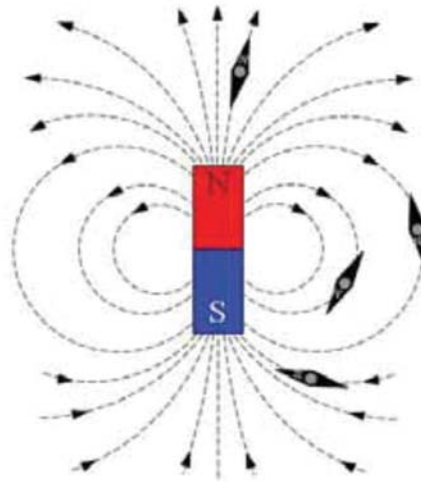


**Figura 9:** Ilustração da linha de força.

Definição análoga à definição de linha de força do campo eletrostático, portanto, as características das linhas de força do campo magnético são iguais as das linhas de força do campo eletrostático:

- Duas linhas de força de um campo magnético nunca se cruzam.
- Seriam retilíneas as linhas de força do campo magnético, se o campo fosse produzido por uma única massa magnética, mas sabe-se que na natureza não é possível a existência de uma massa magnética isolada. Portanto são curvas as linhas de campo magnético produzidas por mais de uma massa magnética.
- Convencionalmente o sentido das linhas é de norte para o sul do ímã, ou seja, 'saem' do polo norte e 'entram' no polo sul.

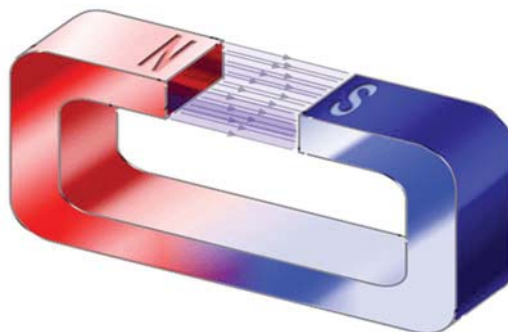
Referência: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 2007. Disponível em: <[www.efisica.if.usp.br](http://www.efisica.if.usp.br)>. Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 10:** Representação das linhas de força em um ímã.

O campo magnético pode ser uniforme, quando tem o mesmo módulo, mesma direção e mesmo sentido em todos os pontos. Nesse caso as linhas de força desse campo são paralelas e retas. Um ímã que possua os polos planos e paralelos (Fig.11) é um exemplo prático.

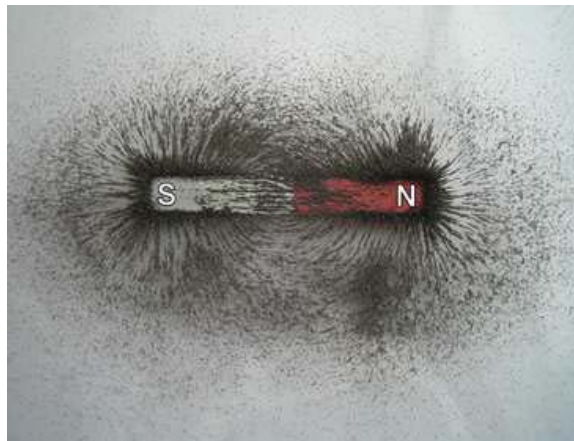
Referência: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 2007. Disponível em: <[www.efisica.if.usp.br](http://www.efisica.if.usp.br)>. Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 11:** Representação das linhas de força em um ímã com campo magnético uniforme.

Pode-se verificar a disposição das linhas de força do campo magnético de um ímã, realizando um procedimento relativamente simples. Sobre um ímã coloca-se uma folha de papel e sobre a folha espalha-se limalha de ferro. Cada pequeno pedaço de ferro se imanta, ou seja, cada um deles se torna um pequeno ímã, formando correntes de ímãs, pois o polo norte de cada pequeno ímã atrai o polo sul de outro e assim sucessivamente. Essas correntes se formam exatamente ao longo das linhas de força, gerando uma figura (Fig.12), conhecida como espectro magnético.

Referência: Mundo educação. Disponível em:<[www.mundoeducacao.com](http://www.mundoeducacao.com)>. Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 12:** Espectro magnético formado com limalha de ferro.

### 2.2.5 Vetor campo magnético $\vec{H}$ , características:

#### Significado físico

O vetor campo magnético,  $\vec{H}$ , é o quociente de uma força por uma massa magnética.

#### Módulo

Assumindo que a massa magnética,  $M$ , responsável pelo campo magnético é puntiforme, e sendo  $d$  a distância de um ponto  $X$  à massa magnética, o módulo do campo magnético no ponto  $X$ , pode ser calculado por:

$$|\vec{H}| = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{|M|}{d^2} \quad (2)$$

E sendo  $\mu$  a permeabilidade magnética do meio em que é produzido o campo magnético

### Direção

O vetor campo magnético,  $\vec{H}$ , tem a mesma direção que a reta que une a massa magnética ao ponto X, reta MX (Fig. 13)

### Sentido

Devido a existência do polo norte (+) e do polo sul (-) o sentido do campo magnético pode mudar. Se a massa magnética for positiva, o sentido é do campo magnético,  $\vec{H}$  é MX, se for negativa, o sentido de  $\vec{H}$  é XM (figura 13).

Referência: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 2007. Disponível em: <[www.efisica.if.usp.br](http://www.efisica.if.usp.br)>. Acesso em: Outubro de 2013.

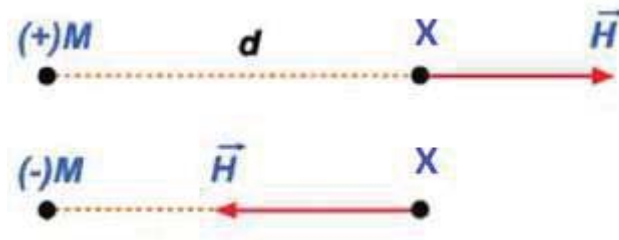


Figura 13: Direção e sentido do vetor campo magnético  $\vec{H}$ .

### 2.2.6 Densidade de fluxo magnético ou indução magnética

No campo magnético existe outra grandeza, de grande importância para descrever fenômenos eletromagnéticos, além do vetor campo magnético  $\vec{H}$ , essa grandeza vetorial é chamada de *densidade de fluxo magnético* ou *indução magnética* é representada por  $\vec{B}$ . E  $\vec{B}$  em um ponto é definido como o produto do vetor campo magnético,  $\vec{H}$ , nesse ponto, pela permeabilidade magnética do meio,  $\mu$ .

$$|\vec{B}| = \mu |\vec{H}| \quad (3)$$

O módulo de  $\vec{B}$  pode ser calculado usando a eq. 3. A direção e o sentido da densidade de fluxo magnético,  $\vec{B}$ , em um respectivo ponto será a mesma direção e sentido do campo magnético nessa mesmo ponto.

Considerando o módulo da vetor campo magnético dado pela eq.2, para uma massa magnética puntiforme. Logo o módulo da densidade de fluxo magnético, pode ser descrito como na eq. 4.

$$\boxed{|\vec{B}| = \frac{|\vec{M}|}{d^2}} \quad (4)$$

Verifica-se, portanto, que quando o campo magnético é gerado por um ímã, a densidade de fluxo magnético,  $\vec{B}$ , num ponto não depende da permeabilidade magnética, ou seja do meio, depende apenas da massa eletromagnética responsável pelo campo e da distância dela ao ponto.

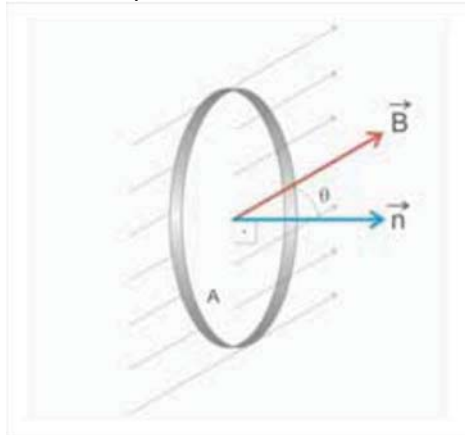
Como visto na seção 2.2.4, para o vetor campo magnético,  $\vec{H}$ , define-se linha de força. Analogamente para o vetor indução magnética tem-se linha de indução. Portanto, usa-se a expressão linha de indução quando se faz referência à indução magnética  $\vec{B}$ , e a expressão linha de força, quando se faz referência ao campo magnético  $\vec{H}$ . As características das linhas de indução são iguais as características das linhas de força.

### 2.2.7 Fluxo magnético

Trata-se de uma grandeza diretamente proporcional ao número de linhas do campo magnético uniforme de indução magnética,  $\vec{B}$ , que atravessam uma dada superfície com área, A. Ou seja, considerando-se que, em um campo magnético uniforme de indução magnética, seja colocada uma superfície plana de área A, sendo  $\mathbf{n}$  a normal à superfície e  $\theta$  o ângulo entre a normal à superfície e a direção do campo, que possui a mesma direção do campo magnético de indução magnética (fig. 14). O fluxo magnético é dado por:

$$\Phi = |\vec{B}| \cdot A \cdot \cos \theta \quad (5)$$

Referência: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 2007. Disponível em: <www.efisica.if.usp.br>. Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 14:** Ilustração do fluxo magnético.

Fluxo magnético é uma grandeza que depende de três fatores:

- Variação da área de superfície;
- Variação da indução magnética;
- Variação da posição da superfície no campo.

A variação do fluxo magnético é de grande importância, porque ele é responsável pelo fenômeno de indução eletromagnética, que será abordado posteriormente.

### 2.3 Eletromagnetismo

O estudo de fenômenos que envolvem campo magnético e corrente elétrica é conhecido com Eletromagnetismo, esses fenômenos podem ser chamados de fenômenos eletromagnéticos. Ou seja, eletromagnetismo é o nome dado a teoria que explica a eletricidade e o magnetismo de maneira unificada.

Os fenômenos eletromagnéticos são:

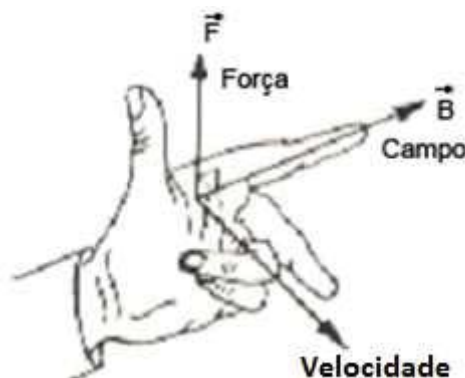
- Um campo magnético é produzido ao redor de um condutor quando o condutor é percorrido por uma corrente elétrica.
- Um condutor percorrido por uma corrente fica sujeito à ação de uma força magnética, quando é colocado em um campo magnético.

- Admitindo que um condutor fechado é colocado em um campo magnético, a superfície determinada pelo condutor é atravessada por um fluxo magnético. Se esse fluxo for variável, uma corrente elétrica aparecerá no condutor, fenômeno chamado de indução eletromagnética.

### 2.3.1 Lei de indução eletromagnética

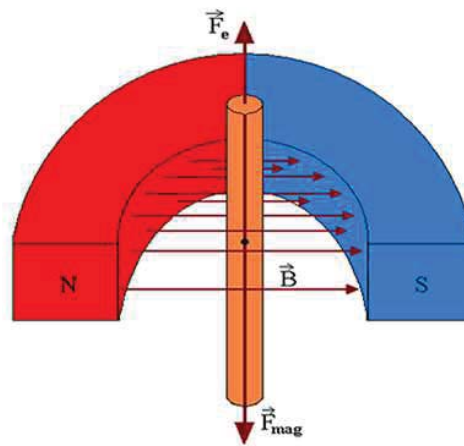
Quando um fio condutor reto é colocado perpendicularmente em um campo magnético uniforme, movendo-se com certa velocidade, perpendicularmente ao campo. Os elétrons livres presentes no fio condutor acompanham o movimento do fio, ganhando velocidade em relação ao campo magnético. Como cargas elétricas em movimento em um campo magnético estão sujeitas a uma força magnética, esta surge no fio perpendicularmente ao campo e ao vetor velocidade do fio, seguindo a regra vetorial conhecida como regra da mão esquerda (Fig. 15). A força magnética atua de maneira a provocar o acúmulo de cargas negativas em uma extremidade do fio, e acúmulo de cargas positivas na extremidade oposta. Essa polarização de cargas induz no fio um campo elétrico, que por sua vez faz surgir uma força elétrica em sentido contrário à força magnética. (Figura 16)

Referência: Mundo educação. Disponível em:<[www.mundoeducacao.com](http://www.mundoeducacao.com)>. Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 15:** Relação vetorial entre campo magnético, velocidade dos elétrons e força magnética.

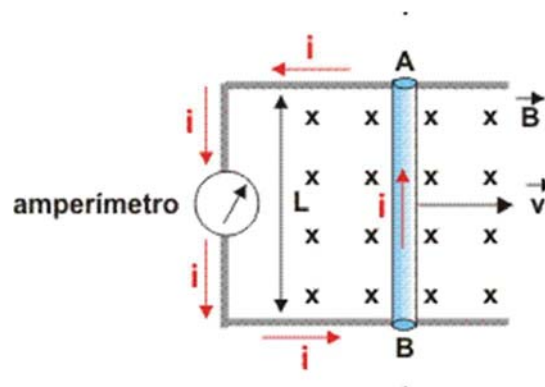
Referência: Mundo educação. Disponível em:<[www.mundoeducacao.com](http://www.mundoeducacao.com)>. Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 16:** Fio condutor reto em movimento dentro de um campo magnético uniforme. Surgimento das forças magnética e elétrica, opostas.

Após algum tempo as forças se equilibram, e surge uma diferença de potencial, ddp, no fio. Essa ddp cria um potencial de geração de uma força eletromotriz induzida capaz de gerar corrente elétrica se o circuito for fechado. Chama-se essa corrente de *corrente elétrica induzida*.

Referência: Mundo educação. Disponível em:<[www.mundoeducacao.com](http://www.mundoeducacao.com)>. Acesso em: Outubro de 2013.



**Figura 17:** Variação do campo magnético gerando em um circuito uma corrente elétrica induzida.

Faraday observou, no entanto, que sempre que uma força eletromotriz induzida aparece, ocorre variação do fluxo magnético no circuito, concluindo que a força eletromotriz é consequência da variação do fluxo magnético no sistema. A lei de Faraday, portanto, depende do movimento relativo entre um ímã e o circuito.

Uma das quatro equações de Maxwell que descreve o eletromagnetismo estabelecendo a relação de indução de corrente elétrica pela variação do campo magnético, é conhecida como Lei de Faraday-Neumann-Lenz, e pode ser escrita na forma diferencial como a equação 6.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6)$$

Onde  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico induzido e  $\mathbf{B}$  o campo magnético.

A grande contribuição de Lenz na Lei foi o sinal negativo, indicando que a corrente induzida tem sentido oposto à variação do campo magnético que a gera. Isso significa que a corrente induzida gera também um campo magnético em oposição ao aumento ou diminuição do fluxo magnético do ímã. Ou seja, existe uma compensação que tende a manter o campo magnético constante.

### 3. EXPERIMENTOS

Neste capítulo discutem-se os dois experimentos que foram realizados para elaboração deste trabalho.

#### 3.1 Frenagem eletromagnética

Verificação da existência de uma outra força, além da força peso, resultado da atração gravitacional exercida pela Terra, agindo no ímã em queda dentro dos tubos condutores.

Para realização deste experimento foi utilizado:

- 1 ímã de neodímio-ferro-boro;
- 1 tubo de cobre com 60 cm de comprimento;
- 1 tubo de cobre com 126 cm de comprimento;
- 1 tubo de alumínio com 60 cm;
- 1 tubo de alumínio com 140 cm;
- 1 tubo de alumínio com 200 cm;
- 1 cronômetro.

A montagem experimental é simples, precisou-se apenas manter o tubo de material condutor na posição vertical e deixar o ímã cair dentro do tubo, mediu-se o tempo que o ímã levou para atravessar todo o condutor, esse processo foi repetido para cada um dos cinco tubos listados. As medidas de tempo foram feitas com um cronômetro manual, portanto, possui uma grande margem de erro, o que implica em uma demonstração mais qualitativa do que quantitativa.

- Verificação da existência de uma outra força, além da força peso, atuando no ímã em queda dentro dos tubos condutores.



**Figura 18:** Ímã utilizado.



**Figura 19:** Tubos de alumínio e cobre utilizados.

Realizando as medidas de tempo de queda do ímã em todos os tubos condutores, obteve-se os seguintes resultados:

**Tabela 1:** Dados obtidos com tubos de cobre.

<b>Tubo de Cobre</b>			
Comprimento (cm)	Tempo de queda Medida 1 (s)	Tempo de queda Medida 2 (s)	Média tempo de queda (s)
60	11,8	11,10	11,9
126	26,3	26,0	26,2

**Tabela 2:** Dados obtidos com tubos de alumínio.

<b>Tubo de Alumínio</b>			
Comprimento (cm)	Tempo de queda Medida 1 (s)	Tempo de queda Medida 2 (s)	Média tempo de queda (s)
60	9,0	9,2	9,1
140	21,0	20,4	20,7
200	30,0	29,0	29,5

Com os dados das tabelas 1 e 2, chegou-se a valores de velocidade escalar média do ímã dentro dos tubos de alumínio e cobre.

**Tabela 3:** Resultados obtidos com tubos de cobre.

<b>Tubo de Cobre</b>		
Comprimento (cm)	Velocidades escalar média (cm/s)	Velocidade escalar média (m/s)
60	5,0	0,05
126	4,8	0,05

**Tabela 4:** Resultados obtidos com tubos de alumínio.

<b>Tubo de Alumínio</b>		
Comprimento (cm)	Velocidades escalar média (cm/s)	Velocidade escalar média (m/s)
60	6,6	0,07
140	6,8	0,07
200	6,8	0,07

- **Conclusão**

Com os resultados das tabelas 3 e 4, percebe-se que a velocidade de queda do ímã dentro dos tubos condutores é aproximadamente igual, para diferentes tamanhos de tubos do mesmo material, ou seja, a velocidade de queda do ímã dentro dos tubos é constante, logo não há aceleração. Mas sabe-se que todo corpo em queda livre está sob a ação da aceleração gravitacional, portanto, conclui-se que a velocidade de queda do ímã é constante, pois ele está sob a ação de uma outra força além da força peso, resultado da atração gravitacional exercida pela Terra. A origem desta outra força será abordada no próximo experimento.

- Verificação da relação entre a velocidade de queda do ímã com o número de elétrons livres no condutor.



**Figura 20:** Tubos de 60 cm de alumínio e cobre utilizados.

Considerando-se apenas as medidas realizadas com os tubos de 60 cm de alumínio e cobre, tem-se:

**Tabela 5:** Resultados obtidos com os tubos de 60 cm de alumínio e cobre.

	<b>Cobre</b>	<b>Alumínio</b>
Tempo médio de queda (s)	11,9	9,1
Velocidades escalar média (cm/s)	5,0	6,6

Com os resultados da tabela 5 percebe-se que mesmo os tubos possuindo o mesmo comprimento as velocidades de queda do ímã dentro dos tubos de alumínio e cobre são diferentes.

Para discutir essa observação, precisa-se listar algumas informações adicionais. A densidade volumétrica,  $\rho$ , que relaciona a quantidade de matéria por

unidade de volume; o número de elétrons livres,  $n$ , para cada átomo presente no corpo; a massa molar,  $MM$ ; constante de Avogadro ( $6,02 \times 10^{23}$ ), número de átomos em um mol de matéria e o volume de cada tubo condutor.

- Alumínio:

$$\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$$

$$n = 3 \text{ elétrons}$$

$$MM = 27 \text{ g/mol}$$

$$\text{Constante de Avogadro} = 6,02 \times 10^{23}$$

Volume =  $96,44 \text{ cm}^3$ , sabendo-se que o raio do cilindro externo é  $0,95 \text{ cm}$  e o raio do cilindro interno, parte oca, é  $0,625 \text{ cm}$ .

- Cobre:

$$\rho = 8,9 \text{ g/cm}^3$$

$$n = 1 \text{ elétrons}$$

$$MM = 63,5 \text{ g/mol}$$

$$\text{Constante de Avogadro} = 6,02 \times 10^{23}$$

Volume =  $64,05 \text{ cm}^3$ , sabendo-se que o raio do cilindro externo é  $0,95 \text{ cm}$  e o raio do cilindro interno, parte oca, é  $0,75 \text{ cm}$ .

Com esses dados é possível determinar o número de átomos no tubo de alumínio e no tubo de cobre, logo é possível determinar também o número de elétrons livres em cada tubo condutor.

- Alumínio

$1 \text{ cm}^3$  de alumínio possui uma massa de  $2,7 \text{ g}$ , logo,  $96,44 \text{ cm}^3$  possui uma massa de  $260,4 \text{ g}$ .

$27 \text{ g}$  de alumínio contém  $6,02 \times 10^{23}$  átomos de alumínio, logo,  $260,4 \text{ g}$  contém  $5,8 \times 10^{24}$  átomos.

1 átomo de alumínio quando ligada para formar o tubo, possui 3 elétrons livres, logo,  $5,8 \times 10^{24}$  átomos possuem  **$1,74 \times 10^{25}$  elétrons livres**.

- Cobre

1 cm<sup>3</sup> de cobre possui uma massa de 8,9 g, logo, 64,05 cm<sup>3</sup> possui uma massa de 570,0 g.

63,5 g de cobre contém  $6,02 \times 10^{23}$  átomos de cobre, logo, 570,0 g contém  $5,4 \times 10^{24}$  átomos.

1 átomo de cobre quando ligada para formar o tubo, possui 1 elétrons livres, logo,  $5,4 \times 10^{24}$  átomos possuem  **$5,4 \times 10^{24}$  elétrons livres**.

**Tabela 6:** Relação entre velocidade de queda do ímã e número de elétrons livres.

	Cobre	Alumínio
Velocidades escalar média (cm/s)	5,0	6,6
Número de elétrons livres	$5,4 \times 10^{24}$	$1,74 \times 10^{25}$

- Conclusão

Analisando os resultados obtidos na tabela 6, referentes à análise das propriedades elétricas do alumínio e do cobre, conclui-se que a velocidade de queda do ímã dentro dos tubos condutores de alumínio e cobre, está diretamente relacionada com o número de elétrons livres no material. Quanto maior o número de elétrons livres no condutor, maior também é a corrente induzida, conseqüentemente a velocidade de queda do ímã será menor. No entanto, o valor obtido foi diferente do esperado, pois não considerou-se a resistividade do material, oposição do material a passagem da corrente elétrica.

### 3.2 Verificação do aparecimento de corrente induzida.

Esse experimento tem como objetivo verificar o surgimento de uma corrente induzida, devido ao movimento relativo entre ímã e bobina.

A corrente produzida na bobina é chamada de corrente induzida, o trabalho realizado para colocar os elétrons livres, responsáveis pela corrente, em movimento é chamado de força eletromotriz induzida. Esse processo de produzir corrente elétrica e força eletromotriz recebe o nome de indução, assunto estudado na seção 2.3.1.

Para realização deste experimento foi utilizado:

- 1 ímã de neodímio-ferro-boro;
- Tubo de acrílico;
- Bobina;
- Circuito externo para armazenamento de energia elétrica (cujo capacitor tem  $2,2 \times 10^{-6}$  faradas de capacitância);
- Multímetro;
- Referencial com divisão de 5 em 5 centímetros anexada ao tubo de acrílico.



**Figura 21:** Aparato experimental.

Para realização do experimento além da montagem experimental foi necessário que o ímã fosse sempre abandonado de uma mesma posição (posição inicial, igual a zero na escala). A bobina iniciou-se na posição igual a 5 centímetros e teve sua posição variada, de modo que, fosse aumentando-se a distância em relação ao ímã a cada medida. Este experimento é semelhante ao da frenagem eletromagnética, um ímã caindo dentro de um tubo condutor, a bobina é representada uma pequena parte do tubo condutor.

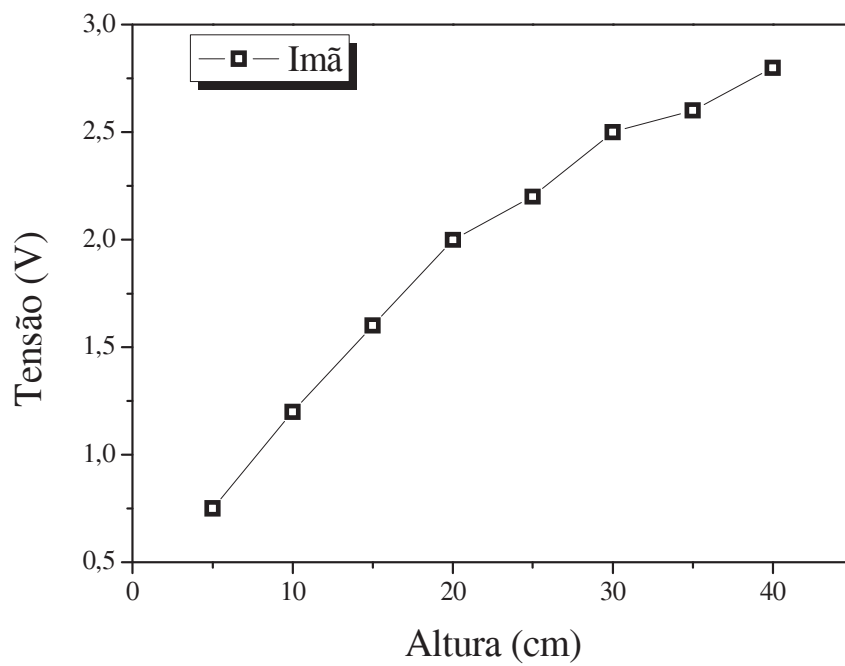


**Figura 22:** Ilustração da variação da posição da bobina.

Realizando as medidas experimentais, obteve-se os seguintes resultados:

**Tabela 7:** Dados experimentais da relação da variação da tensão com a variação de altura.

Altura (do ímã em relação à bobina) (cm)	Tensão (V)
5	0,75
10	1,20
15	1,60
20	2,00
25	2,20
30	2,50
35	2,60
40	2,80

**Figura 23:** Relação entre altura e tensão.

- Conclusão

Analisando os resultados obtidos na tabela 7 e no gráfico 1, chega-se em duas conclusões:

- Mediu-se uma variação de tensão no circuito quando o ímã passou pela bobina, portanto, houve aparecimento de corrente elétrica no circuito, com o movimento relativo entre o ímã e a espira.
- Quanto maior a distância entre o ímã e a bobina maior a tensão marcada, logo, quanto mais rápido o movimento, maior a corrente.

A corrente produzida na bobina é chamada de corrente induzida, o trabalho realizado para colocar os elétrons livres, responsáveis pela corrente, em movimento é chamado de força eletromotriz induzida. Esse processo de produzir corrente elétrica e força eletromotriz recebe o nome de indução, assunto estudado na seção 2.3.1.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso, os objetivos foram estudar, compreender e analisar os fenômenos de forma qualitativa. O estudo teórico abordou assuntos necessários para compreensão e realização dos experimentos, além de uma discussão mais ampla e pontual de alguns assuntos.

O objetivo inicial de verificar a interação entre campo magnético e cargas livres em um condutor, quando um ímã cai dentro do tubo condutor foi alcançado durante a realização dos dois experimentos.

No primeiro experimento verificou-se que existia uma força, além da força peso, atuando no ímã quando ele está caindo dentro do tubo condutor, pois o ímã estava com velocidade constante. Devido à análise das propriedades magnéticas dos tubos condutores de cobre e alumínio verificou-se que a velocidade de queda do ímã dentro do condutor está ligada ao número de elétrons livres no condutor.

No segundo experimento, uma verificação do que acontece na frenagem de um ímã que cai dentro de um tubo de material condutor. Quando um ímã é movimentado nos entornos de um condutor a Lei de Faraday prevê a ocorrência de uma força eletromotriz induzida no condutor, esta força é consequência da variação do fluxo magnético produzido pelo ímã quando está em movimento dentro do tubo. A Lei de Lenz prediz que o ímã sofrerá uma força magnética em oposição ao seu movimento, em consequência da corrente induzida.

Por apresentar uma abordagem mais qualitativa, estes experimentos da forma como foram abordados é uma boa demonstração para alunos do Ensino Médio, tornando possível ao aluno compreender o fenômeno físico.

## REFERÊNCIAS

- [1] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. 9ª edição. LTC, 2007, Volume 3.
- [2] FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R.B., SANDS, M. The Feynman Lectures on Physics. 1ª edição. Addison Wesley, 1966. Volume 2.
- [3] SILVEIRA, F. L. da, LEVIN, Y., RIZZATO, F. B. A Frenagem Eletromagnética de um ímã que cai. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v. 24, n.3: p. 295-318, dez. 2007.
- [4] TIPLER, P. A. Física para Cientistas e Engenheiros: Eletricidade e Magnetismo, Óptica. 6ª edição. LTC, 2009. Volume 2.
- [5] Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, 2007. Disponível em: <[www.efisica.if.usp.br](http://www.efisica.if.usp.br)>. Acesso em: Outubro de 2013.
- [6] Mundo educação. Disponível em:<[www.mundoeducacao.com](http://www.mundoeducacao.com)>. Acesso em: Outubro de 2013
- [7] Laboratório Didático do Instituto de Física, 2003. Disponível em: <[www.if.ufrj.br](http://www.if.ufrj.br)> Acesso em: Outubro de 2013.