

Prego voador: Um desafio para estudantes de eletromagnetismo

(*Flying nail: A challenge to eletromagnetism students*)

Sonia Krapas¹, Luiz Cláudio Rodrigues, Álvaro Vieira de Miranda Neto
e Gildo de Holanda Cavalcanti

Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Recebido em 10/5/2005; Revisado em 23/9/2005; Aceito em 26/9/2005

Neste trabalho apresentamos um experimento didático de baixo custo, produzido por um aluno de uma disciplina do curso de licenciatura em Física da Universidade Federal Fluminense, que tem sua ênfase no estudo dos movimentos – inesperados – de materiais ferromagnéticos sob a ação de campos magnéticos produzidos por um solenóide. O experimento, incluindo material utilizado, montagem e procedimentos, é mostrado em detalhe. São apresentadas, na forma de uma discussão, as várias tentativas de explicação para os movimentos obtidos. Objetiva-se a capacitação de professores em sustentar uma discussão com seus alunos.

Palavras-chave: experimento didático, eletromagnetismo, explicações de alunos.

In this work we present a low cost didactic experiment – designed by a student in a course for undergraduate students of Physics at Universidade Federal Fluminense. The emphasis of the experiment is on the study of the unexpected motion of ferromagnetic materials under the action of magnetic fields produced by a solenoid. The experiment is described in details, including the material, the steps and procedures. The attempts for explanation for such movements are presented in the discussion. This paper aims to provide teachers with some ideas of how to sustain a discussion with their students.

Keywords: didactic experiment, electromagnetism, student's explanation.

1. Introdução

Muitos são os experimentos didáticos utilizados para evidenciar a interação eletromagnética. Além do clássico experimento de Oersted, há os que mostram a orientação de limalha de ferro e os que mostram aplicações práticas de um eletroímã. Em geral esses efeitos são explicados pela ação do campo magnético sobre os pólos de ímãs naturais ou temporários (agulha da bússola, limalha de ferro e objetos ferromagnéticos). Essas ações provocam rotações (da agulha da bússola e da limalha de ferro) ou atrações (dos materiais ferro magnéticos). Neste trabalho apresentamos um experimento didático de baixo custo que tem sua ênfase no estudo do movimento de materiais ferromagnéticos sob a ação de uma corrente elétrica. Trata-se de um solenóide dentro do qual é possível se observar o movimento de objetos tais como pregos. Esse experimento foi planejado por um aluno do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal Fluminense (e técnico em eletrônica) – segundo autor deste trabalho –, como parte da produção de materiais didáticos de uma disciplina ministrada pela primeira autora do trabalho.

¹E-mail: sonia@if.uff.br.

No desenrolar desta disciplina – e depois dela –, foram feitas várias tentativas para explicar os movimentos adquiridos pelo prego. A mais simplória delas se reduziu à “ação do campo magnético”. No entanto, o comportamento surpreendente do prego exigiu maiores aprofundamentos, que incluíram contribuições importantes de outro aluno da disciplina (terceiro autor do trabalho) e de outro professor (último autor).

No que se segue apresentamos o experimento – material utilizado, montagem e procedimentos –, e a recuperação das discussões sobre as várias tentativas de explicação para o comportamento do prego.

2. O experimento

A idéia do experimento foi inspirada no funcionamento de certas campanhas e alguns componentes de máquinas de lavar cujos eletroímãs comportam um núcleo móvel. Há, no entanto, outras montagens semelhantes, porém com funções diferentes: sistemas de partida [1] e medida de força magnética sobre amostras de substâncias diamagnéticas, paramagnéticas e ferromagnéticas [2].

O presente experimento difere dos demais na medida em que o foco se encontra na explicação do movimento do núcleo.

2.1. Material utilizado, montagem e procedimentos

Os materiais utilizados no experimento foram: 1 tábua de 20 cm x 30 cm; 1 interruptor de campainha; 1 tomada fêmea com parafusos para madeira; 1 tomada macho p/ fio; 2 m de fio paralelo de 1,0 mm ou 1,5 mm; 33 m (aproximadamente 30 g) de fio 30; 3 fixa fio paralelo 1,0 mm ou 1,5 mm; 2 parafusos com porcas (3/16 x 11/4); 2 garras jacaré pequenas; 1 tubo transparente de caneta tipo *Bic*; 1 lâmpada de 100 W; 1 bocal com pino; 2 pregos grandes (sem cabeça) de espessuras variadas (que passem no diâmetro da caneta); 2 pregadores de roupa.

A montagem do experimento seguiu alguns passos. O fio paralelo foi cortado em dois pedaços tendo um deles aproximadamente 20 cm. Este pedaço foi separado, obtendo-se dois fios. Foram feitas as conexões indicadas na Fig. 1. O interruptor e a tomada fêmea foram aparafusados na madeira.

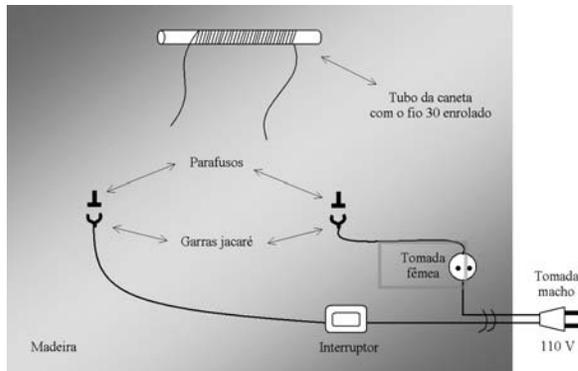


Figura 1 - Esboço do experimento.

Aproximadamente numa linha imaginária que divide ao meio o lado menor da madeira, foram feitos dois furos equidistantes uns 12 cm e colocados dois parafusos neles, de baixo para cima, fixando-os com as porcas. Foram enrolados 25 m de fio 30 em aproximadamente 8 cm centralizados do tubo de caneta, deixando como sobra 20 cm em cada uma das extremidades do fio. Os pregadores de roupa foram usados para sustentar o tubo. Cada garra de jacaré e cada extremidade do fio 30 foram conectadas a cada um dos parafusos. A lâmpada de 100 W foi plugada à tomada fêmea.

Inserido o prego numa das extremidades do tubo da caneta e acionado o interruptor, observa-se a ejeção do prego pela outra extremidade do tubo. Outras vezes o prego adquire comportamento diferente: oscila dentro do tubo até parar no seu centro. Algumas vezes outro efeito pode ser observado: o prego vai até a outra extremidade, retorna e é ejetado na extremidade ini-

cial. É possível verificar ainda a imobilidade do prego no caso em que ele é inicialmente colocado no centro do tubo. Este efeito se torna mais notável quando o tubo é colocado na vertical.

2.2. Explicações

Antes de prosseguir com o texto, convidamos o leitor a realizar o experimento e então propor uma explicação para ele.

Respostas para além de “a ação do campo” surgiram, levantando algumas hipóteses. O prego oscila porque a corrente é alternada, sendo que a oscilação corresponde à da rede. O prego é ejetado para fora porque consegue vencer a barreira de potencial produzida pelo solenóide. O prego ora é ejetado, ora sofre uma oscilação devido ao uso continuado do mesmo prego, o que provocaria uma imantação residual neste.

A primeira hipótese foi descartada experimentalmente: testando o material com corrente contínua, a oscilação também acontece. A explicação da barreira de potencial, possivelmente em analogia com o potencial eletrostático, foi logo descartada: não se pode falar propriamente de um potencial magnético, já que não existe o monopolo magnético. A explicação da imantação residual do prego não se manteve, uma vez que pregos sem uso se comportavam do mesmo modo.

2.2.1. Oscilação do prego

Para compreender a oscilação do prego surgiu a ideia de compará-la com a oscilação de uma bilha sobre um ímã de barra: quando a bilha se aproxima do pólo norte do ímã, este age mais intensamente sobre o pólo mais próximo da bilha, o norte, repelindo a bilha em direção ao pólo sul do ímã; da mesma forma, o pólo sul do ímã age mais intensamente sobre o pólo mais próximo da bilha, o sul, repelindo a bilha em direção ao pólo norte do ímã, e assim sucessivamente.

Foi-se então à busca da configuração do campo magnético produzido por um solenóide. A maioria dos livros universitários de Física apresentam um gráfico mostrando a dependência com a distância da componente do campo na direção do eixo da bobina. O campo admite valor máximo praticamente constante no centro da bobina, decaindo para zero nas suas extremidades. Como explicar então a oscilação, que demanda força máxima nas extremidades e nula no centro? De fato, sobre as medições referidas em Purcell ([2], p. 327) afirma-se: “Logo descobrimos que a força é mais intensa, não quando nossa amostra está no centro da bobina, onde o campo B_z é mais intenso, mas quando ela está próxima da extremidade, onde o gradiente dB_z/dz é grande”. Temos, portanto, uma força restauradora, que é responsável pela oscilação do prego. Caso a bobina fosse infinita, o campo seria constante e o prego ficaria em repouso. São os efeitos de borda que explicam a oscilação do prego.

Nas discussões foi lembrada uma situação semelhante, o caso de um dielétrico dentro de um capacitor ([3], p. 194):

Nós sempre supomos que o campo é uniforme dentro de um capacitor de placas paralelas e nulo fora. Se isso fosse literalmente verdade, não haveria força resultante sobre o dielétrico como um todo, uma vez que o campo seria perpendicular às placas em toda sua extensão. Entretanto, há realmente um campo de franjas em torno das bordas, que para muitos propósitos pode ser ignorado mas neste caso é responsável por todo o efeito. [...] É o campo de franjas não uniforme que arrasta o dielétrico para dentro do capacitor.

O caso magnético pode ser melhor entendido quando se focaliza a situação do ponto de vista microscópico, isto é, quando se estuda os efeitos do campo do solenóide sobre os elétrons do prego, que giram em torno do núcleo. Considerando-se o campo do solenóide constante, e a situação em que os momentos de dipolo já se encontram alinhados com este, é fácil ver que a força que atua sobre os elétrons, resultado do produto vetorial da velocidade pelo campo, é de natureza centrípeta. Portanto, não podem ser responsáveis pela aceleração do prego no tubo. Esta aceleração é devida aos efeitos de borda do campo do solenóide: nessa região o campo do solenóide possui componentes em direções tais que produzem acelerações não centrípetas.

2.2.2. Sustentação do prego

A sustentação do prego quando o tubo está na vertical facilmente se explica: pela ação da gravidade, o prego sai levemente do centro, posição em que passa a atuar uma força de natureza magnética de igual valor ao da gravitacional.

2.2.3. Ejeção do prego

Mas como explicar o efeito mais freqüente e o que mais chama a atenção, a expulsão do prego para fora do tubo? Apenas com argumentos de simetria seria impossível, pois como explicar que a energia cinética adquirida numa das extremidades não é totalmente perdida na outra? Num primeiro momento levantou-se a suspeita de que esse efeito era devido ao tempo de voo do prego dentro do tubo ser da ordem do período de oscilação do módulo do campo magnético. Nestas condições, a fase inicial de lançamento seria determinante para um comportamento caótico do prego, que ora oscilaria, ora seria ejetado por *qualquer* dos lados do tubo. Um dado experimental, no entanto, tirou o foco desse aspecto do fenômeno: na situação de corrente contínua o prego também era ejetado.

Uma nova hipótese foi aventada: o prego ganhava energia durante o período de transiente da corrente, seja ela DC ou AC. Para verificar esta hipótese, testamos a seguinte situação: o prego foi colocado no tubo depois de acionado o interruptor, isto é, depois de a corrente

atingir uma condição estacionária. Nesse caso, *sempre* ocorria a oscilação. Portanto, a ejeção do prego deveria ser atribuída ao processo transiente, durante o qual a corrente elétrica do circuito pode atingir um pico que fornece ao prego uma energia cinética adicional, energia que possibilita que ele escape do tubo. Medições dessa corrente transiente através da tensão entre os terminais da bobina, apresentada na Fig. 2, confirmaram tal hipótese. Um bom argumento didático resulta na observação de uma maior velocidade de giro de um medidor doméstico de consumo de energia elétrica quando um aparelho é colocado para funcionar.

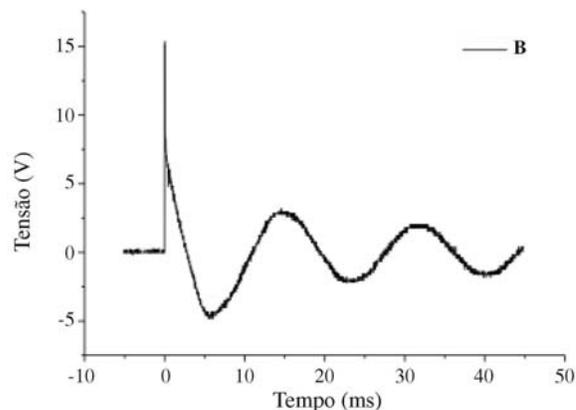


Figura 2 - Tensão nos terminais da bobina em função do tempo.

A ejeção do prego pela extremidade de entrada tem a ver com “defeitos” do tubo de caneta. Em geral esses tubos não têm o mesmo diâmetro interno nas duas extremidades. A extremidade com diâmetro menor pode funcionar como um obstáculo que faz variar em sentido a quantidade de movimento do prego. Assim, a energia que o prego ganhou no período transiente fará com que o prego seja ejetado pela extremidade de entrada.

2.3. Dicas para melhor explorar o experimento

Para o professor que pretenda explorar esse experimento com seus alunos, algumas dicas são importantes.

Como já foi apontado, para se garantir a oscilação, é necessário que o prego seja colocado no tubo depois de acionado o interruptor.

Para se obter a ejeção pela outra extremidade, o prego deve ser colocado com meio corpo para fora do solenóide. Se o prego for colocado inteiramente dentro do solenóide, é possível observar, na outra extremidade, que parte do corpo do prego sai do solenóide, mas ele não chega a ser ejetado. Isso acontece porque a energia adquirida no período transiente não é suficiente para que o prego todo saia do solenóide, escapando de sua ação.

É importante notar que o objeto a ser ejetado deve ser constituído de ferro. Bilhas de aço, por exemplo, apresentam velocidade de ejeção muito baixa, quando comparada com a velocidade de pregos ordinários.

No experimento utilizamos um prego de aproximadamente 35 mm de comprimento e 2 mm de diâmetro. Com essa dimensão obtivemos um velocidade de ejeção de aproximadamente 181 cm/s². Se mantivermos a massa e reduzirmos o comprimento do prego à metade, a velocidade cai para 93 cm/s. Isso se deve ao fato de que com a diminuição do prego, este sente menos a ação dos efeitos de borda do campo magnético (numa extensão pequena as linhas de força variam muito pouco). Esse pode ser outro fator que explica a diminuição da velocidade da bilha.

Os “defeitos” no tubo acarretam uma dificuldade adicional no entendimento do comportamento do prego: explicar a sua ejeção pela extremidade de entrada. Essa é a situação mais desafiadora. Caso deseje eliminar essa dificuldade, o professor pode optar por uma situação simplificada, que consiste em serrar a parte do tubo com “defeito” ou, melhor ainda, usar um tubo de vidro.

Vale acrescentar outra recomendação: não realizar repetidas vezes o experimento, pois com isso o fio se aquece a ponto de deformar o tubo de plástico, o que pode provocar efeitos aleatórios, portanto sem previsi-

bilidade.

3. Projeções para o ensino

Com este trabalho pretendemos mostrar como um experimento aparentemente simples pode acionar em alunos com certa experiência em física uma gama tão variada de explicações. É claro que no ensino médio muitas dessas explicações não apareceriam, o que não invalida sua apresentação neste nível de ensino, uma vez que outras explicações seguramente garantiriam o diálogo com o experimento.

Referências

- [1] M.A. Zaro, R.L.D. Blanco e C.A.K. Thomas, *Rev. Ens. Fís.* **11**, 88 (1989).
- [2] E.M. Purcell, *Curso de Física de Berkeley* (Edgard Blücher, São Paulo, 1973), v. 2.
- [3] D.J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics* (Prentice Hall, New Jersey, 1999).

² Esta velocidade foi obtida a partir de 30 medições de tempo com um cronômetro digital.