

## Desenvolvimento de um experimento de custo reduzido para investigar aspectos da força magnética sobre um

# condutor

## percorrido por corrente elétrica

Esdras Garcia Alves<sup>1,#</sup> , Rejane Bueno de Moraes<sup>2</sup>, Laís Kelly Marques Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Betim, Betim, MG, Brasil.

<sup>2</sup>Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Congonhas, Congonhas, MG, Brasil.

### Palavras-chave

força magnética  
eletromagnetismo  
desenvolvimento de experimentos

### Resumo

A realização de atividades experimentais nas aulas de física é algo considerado relevante por estudantes, professores e pesquisadores. Contudo, as pesquisas mostram que nem sempre as atividades experimentais estão presentes na sala de aula. Um dos motivos para tal ausência é a escassez de recursos financeiros para a aquisição de experimentos para equipar as escolas. No sentido de superar tal dificuldade, a comunidade científica tem se debruçado sobre o desenvolvimento de experimentos a partir de materiais de custo reduzido. Neste trabalho, apresentamos uma proposta de experimento que permite investigar aspectos da força magnética experimentada por um condutor retilíneo, percorrido por uma corrente elétrica contínua, quando imerso em um campo magnético uniforme. O experimento possibilita verificar, quantitativamente, a dependência da força magnética como função da corrente elétrica no condutor, do seu comprimento e do módulo do campo magnético no qual está inserido. Os resultados experimentais mostram boa concordância com os modelos teóricos da física para esse fenômeno, exibindo as relações lineares que se espera encontrar entre a força, a corrente, o comprimento e o módulo do campo magnético.

### 1. Introdução

A realização de experimentos é uma atividade de grande relevância no ensino da física. Diversos autores [1-3] associam a importância atribuída às atividades experimentais no ensino aos grandes projetos de renovação curricular ocorridos na segunda metade do século passado. Desde essa época, diversos trabalhos, sejam artigos publicados em periódicos, sejam dissertações

ou teses produzidas nos programas de pós-graduação, têm se debruçado sobre essa temática a partir de múltiplos olhares. Para citar alguns poucos, uma parte desta literatura tem buscado sugerir propostas de experimentos de custo reduzido, de modo a contribuir com a disseminação da experimentação [4-6]. Com a ampliação do uso do computador e, posteriormente, o surgimento do Arduino, vários trabalhos se voltaram

**A realização de experimentos é uma atividade relevante no ensino da física**

# E-mail: [esdras.alves@ifmg.edu.br](mailto:esdras.alves@ifmg.edu.br)

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Copyright © 2023, Copyright by Sociedade Brasileira de Física. Printed in Brazil.

para a defesa do uso da experimentação assistida por computador e a apresentação de propostas experimentais de baixo custo utilizando essa tecnologia [7-10]. Há também trabalhos que buscam olhar para a experimentação sob uma perspectiva teórica, no sentido de compreender as bases pedagógicas e epistemológicas que sustentam sua implementação nas salas de aula, bem como discutir as formas pelas quais ela pode contribuir para a aprendizagem dos estudantes [11-17].

Se por um lado essa ampla literatura explicita a relevância das atividades experimentais no ensino, por outro também coloca a necessidade de ponderar que a experimentação em si não constitui uma estratégia de ensino privilegiada, capaz de resolver os problemas de aprendizagem. É necessário considerar a forma como se utiliza a experimentação, de modo a aproveitar o potencial desta estratégia para colocar o estudante como sujeito ativo de sua aprendizagem [18-20].

A despeito da importância que a experimentação adquiriu junto a professores e estudantes, Laburú e cols. [21] mostram que nem sempre ela está presente nas salas de aula. Entre os muitos fatores que esses autores elencam para a não utilização das atividades experimentais estão a falta de equipamentos e a falta de tempo para o professor elaborar seus materiais.

O problema da falta de equipamentos está se tornando cada vez mais crítico, uma vez que os recursos destinados às instituições de ensino diminuem ano após ano, e, ao mesmo tempo, os preços dos experimentos produzidos por empresas especializadas são muito altos. No sentido de oferecer alternativas a esses problemas, a comunidade científica envolvida com o ensino da física tem procurado elaborar e compartilhar, por meio da publicação de trabalhos nos principais periódicos dedicados ao ensino da física no Brasil e no exterior, propostas de experimentos utilizando materiais de custo reduzido. Em parte, muitos destes trabalhos auxiliam o professor também na questão do tempo, uma vez que vários deles oferecem descrições detalhadas das montagens dos experimentos sugeridos, o que facilita sua reprodução por parte dos leitores interessados.

Neste trabalho nos alinhamos com essa perspectiva da comunidade, oferecendo uma proposta de experimento para a investigação de aspectos da força magnética que atua sobre um condutor retilíneo, percorrido por uma corrente elétrica contínua, quando tal condutor se encontra imerso em um campo magnético uniforme. Por meio da utilização de uma montagem que emprega materiais de custo reduzido, mostramos que é possível verificar, quantitativamente, a dependência da força magnética em função do comprimento do condutor, da intensidade da corrente elétrica que o

percorre e do módulo do campo magnético no qual está imerso. A montagem permite, ainda, verificar que o sentido da força magnética depende dos sentidos da corrente e do campo, bem como determinar o módulo do campo magnético que interage com o condutor. No sentido de oferecer um parâmetro para avaliar a qualidade desta última medida, empregamos um sensor Hall de baixo custo para determinar o valor do campo magnético empregado no experimento. Em nossa avaliação, os resultados quantitativos encontrados se mostraram muito coerentes com o que esperávamos com base nos modelos teóricos.

A montagem proposta neste trabalho é um dos resultados da realização de um projeto de pesquisa que visa ao desenvolvimento de aparatos experimentais de custo reduzido para a realização de experimentos quantitativos de física. Temos vivenciado, na instituição onde atuamos, a dificuldade em equipar o laboratório didático de física devido a problemas como falta de verbas e alto custo dos experi-

mentos comercializados por empresas especializadas. Utilizando a infraestrutura de oficinas e laboratórios da instituição, temos conseguido desenvolver experimentos para equipar o laboratório didático, que atende a estudantes do Ensino Médio e do curso de licenciatura em física. Em um primeiro esforço, dadas nossas maiores limitações, temos buscado desenvolver experimentos nas áreas do eletromagnetismo e da física moderna. Os bons resultados quantitativos obtidos com os experimentos desenvolvidos nos encorajam a continuar nesta tarefa, bem como a incentivar outros pesquisadores a envidar esforços para desenvolver outros experimentos com materiais de custo reduzido, uma vez que são grandes os desafios da educação pública no sentido de equipar as escolas.

## 2. A balança de corrente na literatura

Como orientação metodológica para a realização do projeto, iniciamos sempre por uma varredura na literatura a fim de verificar as propostas experimentais publicadas a respeito dos experimentos que desejamos desenvolver. Esse movimento nos permite conhecer materiais e métodos utilizados por outros autores, bem como nos aponta novas possibilidades e novas estratégias que podemos seguir, tendo em vista nossas necessidades e recursos. Em particular, empreender o trabalho de revisão apresentado a seguir foi decisivo para escolhermos uma balança digital como forma de medir a força magnética, bem como optarmos por utilizar ímãs de neodímio para produzir um campo magnético aproximadamente uniforme na região onde será colocado o condutor percorrido por corrente elétrica.

**O desenvolvimento e a publicação de experimentos de custo reduzido nos periódicos dedicados ao ensino refletem um esforço da comunidade científica para ampliar o acesso à experimentação**

Para o caso particular de um condutor retilíneo de comprimento  $L$ , percorrido por uma corrente elétrica contínua de intensidade  $I$ , que se encontra imerso em um campo magnético uniforme de módulo  $B$ , há uma força magnética de módulo  $F_m$  atuando sobre ele. A direção desta força magnética é perpendicular ao plano formado pelo vetor campo magnético  $B$  e pelo condutor. Seu sentido pode ser obtido pela aplicação da regra da mão direita (ou regra do tapa), e seu módulo pela Eq. (1):

$$F_m = ILB\text{sen}\phi, \quad (1)$$

em que  $\phi$  é o ângulo entre a direção da corrente no condutor e a direção do vetor campo magnético (Fig. 1).

Um problema comumente encontrado na demonstração da atuação dessa força sobre um único condutor, principalmente quando se deseja realizar uma atividade quantitativa, advém da necessidade de utilizar correntes elétricas muito altas. Isso decorre do fato de que a força que surge em um condutor devido à interação com campos magnéticos ordinários é muito pequena. Uma forma de superar essa dificuldade consiste em utilizar aparelhos específicos para a medição dessa força, como as balanças de corrente.

Tradicionalmente, uma balança de corrente é utilizada em uma configuração destinada a determinar a força entre dois condutores paralelos [22-23]. Nesse aparato experimental, um dos condutores é fixado em uma base e o outro, posicionado paralelamente sobre o primeiro, pode girar facilmente em torno de um ponto de rotação se sofrer um torque. Um contrapeso mantém o condutor móvel afastado do condutor fixo e em equilíbrio. Quando circula corrente pelos dois condutores, os campos magnéticos gerados interagem

**A balança de corrente pode ser usada para determinar o módulo da força magnética que atua sobre um condutor percorrido por corrente elétrica que se encontra imerso em um campo magnético**

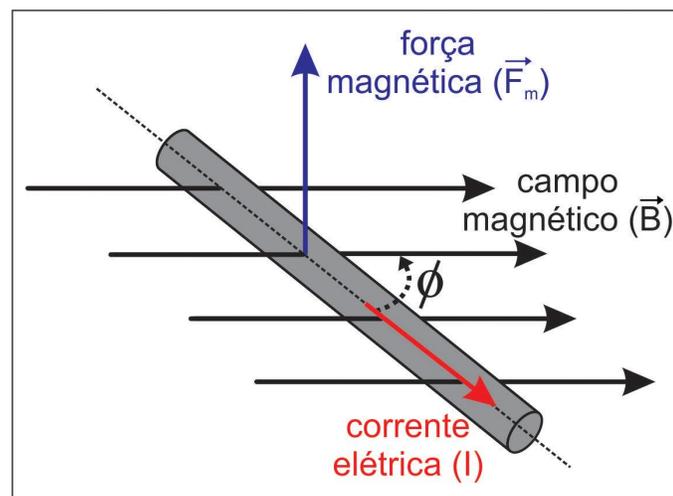


Figura 1 - Representação da força magnética sobre um condutor percorrido por corrente elétrica que se encontra imerso em um campo magnético uniforme.

entre si e pode surgir entre eles uma força de atração ou repulsão, dependendo do sentido das correntes. A intensidade da força magnética que surge nessa interação pode ser determinada com base no torque necessário para que o condutor móvel retorne à posição inicial. Como as forças magnéticas não são grandes, geralmente os braços destas balanças possuem entre 15 cm e 30 cm para que os torques sejam suficientes para mover o condutor móvel em uma quantidade mensurável. Esse tipo de balança tem um processo de construção sofisticado, uma vez que o condutor móvel deve oferecer pouquíssimo atrito e, ao mesmo tempo, permitir um bom contato elétrico com o mancal [24].

Modificações na estrutura dessa balança de corrente tradicional permitem verificar o comportamento da força magnética sobre um condutor imerso em um campo magnético produzido por ímãs permanentes ou solenoides. Greenslade Jr., por exemplo, utilizou a montagem de uma balança tradicional, mas substituiu o condutor fixo por dois grandes ímãs paralelos [25]. Mais recentemente, com o surgimento dos ímãs de neodímio, que produzem campos magnéticos bem mais intensos, versões da balança com braços menores puderam ser construídas [26-27]. Um sistema, em particular, nos chamou a atenção por ser diferente da maioria das propostas encontradas na literatura [28]. Os autores deste trabalho construíram uma balança de “dois pratos”, toda em acrílico, sendo um dos “pratos” um condutor em forma de U, posicionado entre dois ímãs retangulares de neodímio. O sistema é bastante engenhoso e permite a medição de forças magnéticas de pequena intensidade, mas requer a utilização de pequeninas massas de valor conhecido para restituir o equilíbrio da balança quando passa corrente pelo condutor.

Encontramos duas propostas em que o braço condutor móvel da balança foi colocado no interior de um solenoide, em vez de ser inserido entre ímãs permanentes [29-30]. Nesses dois casos, as montagens experimentais se destinam à determinação do módulo do campo magnético no interior dos solenoides.

Vale registrar que em todos os modelos de balanças citados anteriormente há o problema com o atrito e o contato elétrico entre os mancais e o condutor móvel da balança. O atrito precisa ser o mínimo possível para não interferir em demasia nas medições [31] e o contato elétrico não pode ser rompido e estabelecido com o movimento do mancal. Uma forma de evitar esses problemas consiste em utilizar montagens em que as partes praticamente não se movem. Kraftmakher, por exemplo, utilizou um sensor de força produzido pela empresa americana PASCO para realizar a medição da força. Ele posicionou um condutor em forma de U, preso ao gancho do sensor de força, entre dois ímãs pa-

ralelos. Ao passar corrente pelo condutor, o sensor indica a força experimentada por ele [32]. Infelizmente, conforme já apontamos, a utilização de sensores comercializados por empresas que produzem materiais para laboratório não é uma opção viável dado o alto custo desses equipamentos.

Uma alternativa à utilização de sensores de força envolve o emprego de uma balança digital para mensurar o valor da força magnética sobre um condutor. Em uma das aplicações mais simples desta estratégia, dois ímãs em forma de barra foram fixados em um suporte de madeira, um paralelo ao outro. O conjunto dos ímãs com o suporte foi colocado sobre o prato de uma balança digital com resolução de 0,01 g. Um condutor transportando corrente foi posicionado entre os ímãs e a reação à força exercida sobre o condutor foi medida pela balança [33]. Em uma montagem mais complexa, uma bobina quadrada foi posicionada no centro de uma bobina de Helmholtz e o contrapeso que segura a bobina quadrada foi apoiado sobre uma balança. Nesse caso, a força sobre a bobina quadrada é bem maior e mais fácil de ser medida, uma vez que vários condutores experimentam a força magnética [34]. Algo semelhante foi feito utilizando um ímã de neodímio em forma de disco e uma bobina de formato circular [35]. A bobina, colocada sobre uma balança digital, recebe uma força devido à interação com o campo magnético do ímã posicionado na direção de seu eixo central e fixado em um suporte suspenso.

Há dois pontos que merecem algum comentário acerca dos trabalhos citados no parágrafo anterior. O primeiro é o fato de os trabalhos mais antigos utilizarem balanças analíticas nos experimentos. Essas balanças têm um custo bastante alto e não são facilmente encontradas na maioria das escolas. Felizmente, com o desenvolvimento da tecnologia, balanças de precisão de baixo custo estão atualmente disponíveis em diversas lojas na internet. Embora haja limitações quanto à precisão dessas balanças, é importante ressaltar que, para fins didáticos, os resultados são altamente satisfatórios, como mostraremos na seção dos resultados. O segundo é o fato de que nestes trabalhos não são fornecidos detalhes da construção dos aparatos. Em geral, uma única fotografia da montagem, ou mesmo um desenho, é apresentado, e o esforço para decifrar os detalhes construtivos fica por conta do leitor que deseja reproduzir o experimento. No sentido de auxiliar professores e estudantes a reproduzirem o experimento aqui proposto, oferecemos informações detalhadas sobre o processo de construção do aparato na seção que se segue.

### 3. Nossa proposta experimental

A Fig. 2 mostra uma visão geral da nossa versão da balança de corrente. Um suporte de madeira com uma

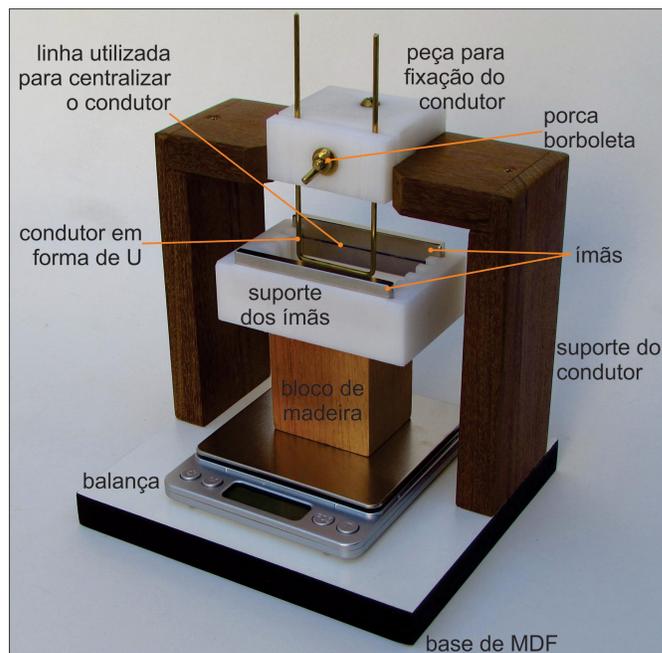


Figura 2 - Visão geral da nossa versão da balança de corrente.

peça plástica ao centro permite a fixação de um fio condutor em forma de U. A parte horizontal desse fio fica entre dois ímãs em forma de barra, inseridos nos sulcos de um suporte plástico. O suporte plástico dos ímãs, por sua vez, está apoiado sobre um bloco de madeira colocado em cima do prato de uma pequena balança digital.

A base do experimento é uma placa de MDF de dimensões  $180 \times 160 \times 18$  mm. As duas hastes de madeira, verticais, que formam o suporte da peça onde é fixado o condutor, têm dimensões  $130 \times 60 \times 18$  mm; a haste horizontal desse mesmo suporte tem dimensões  $180 \times 60 \times 18$  mm. Na metade da haste horizontal, foram feitos um furo e um encaixe para a peça de fixação do condutor (veja a Fig. 3 - nas imagens, as dimensões estão em milímetro, exceto quando indicado em outra unidade). O encaixe tem  $62 \times 33$  mm e teve os cantos internos chanfrados para melhor visualização da posição do condutor entre os ímãs no momento da realização das medidas. O furo tem diâmetro de 5 mm e foi feito a 18 mm da borda da haste (Fig. 3).

Neste encaixe é colocada uma peça de polietileno (material plástico) que serve para a fixação do fio condutor em forma de U. Essa peça tem as dimensões indicadas na Fig. 3 e é fixada na haste de madeira horizontal por meio de um parafuso de latão, com diâmetro de  $3/16$ " e comprimento de  $1\frac{1}{2}$ ", que atravessa o furo de 5 mm (optamos por deixar as dimensões desses parafusos em polegadas pois eles não são encontrados em milímetros nas lojas). No centro da parte frontal dessa peça, há outro parafuso de latão, com diâmetro de

**Com ímãs de neodímio e uma balança digital de baixo custo é possível medir o valor da força magnética sobre um único condutor com facilidade**

3/16" e comprimento de 1/4", que serve para fixar uma peça retangular de polietileno com uma porca borboleta. Optamos por utilizar parafusos e porcas de latão para evitar sua interação com o campo magnético dos ímãs (ressaltamos, contudo, que na primeira versão da montagem utilizamos parafusos de aço e os resultados foram os mesmos; o único problema com o aço era uma atração indesejada no momento de mover o suporte com os ímãs durante as trocas do fio condutor, ou do reposicionamento dos ímãs).

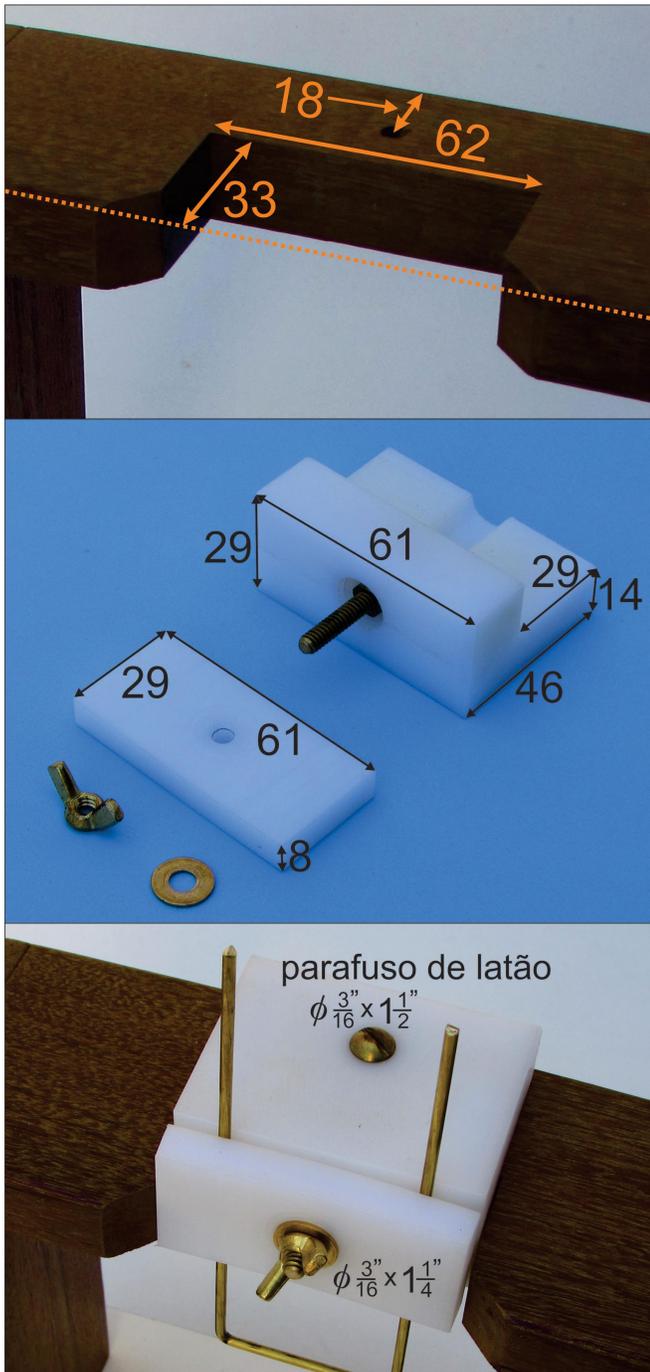


Figura 3 - Detalhes do encaixe e da peça de polietileno onde é fixado o condutor em forma de U.

A utilização dessa peça de polietileno garante que o condutor fique perpendicular ao suporte e possibilita a troca fácil do condutor no momento de realizar as explorações que o experimento permite. Basta afrouxar a porca borboleta para retirar um condutor e inserir outro.

O bloco de madeira, que tem dimensões 55 × 45 × 55 mm e pode ser visto na Fig. 2, é empregado para manter os ímãs mais afastados do prato da balança. Na balança, há materiais ferromagnéticos que são atraídos pelo ímã. Com o uso do bloco de madeira, há uma redução dessa atração, pois o suporte dos ímãs, apoiado sobre o bloco, fica mais afastado da balança. Como o campo magnético diminui rapidamente com a distância, a atração é bem menor. Se o suporte for colocado diretamente sobre a balança, é possível verificar a forte atração dos ímãs sobre ela.

O suporte dos ímãs foi confeccionado a partir da usinagem de um bloco de polietileno de dimensões externas de 98 × 61 × 30 mm conforme as indicações da Fig. 4. Inicialmente, no centro desse bloco, foi escavado um retângulo interno de dimensões 70 × 55 × 23 mm. Esse procedimento foi realizado com uma ferramenta denominada fresadora. Em seguida, foram feitos seis sulcos em cada uma das laterais menores desse retângulo utilizando uma fresa de 5 mm de diâmetro, de modo que cada sulco ficou com 5 mm de largura. A distância entre dois sulcos vizinhos é também de 5 mm e eles têm 14 mm de profundidade em relação à face superior do suporte. A utilização desse suporte permite variar a distância entre os ímãs mudando-os de sulco, de aproximadamente 5 a 45 mm. Esse procedimento torna possível alterar o módulo do campo magnético na região entre os ímãs.

Na Fig. 4 é possível ver os dois ímãs utilizados no experimento, inseridos nos sulcos mais externos do

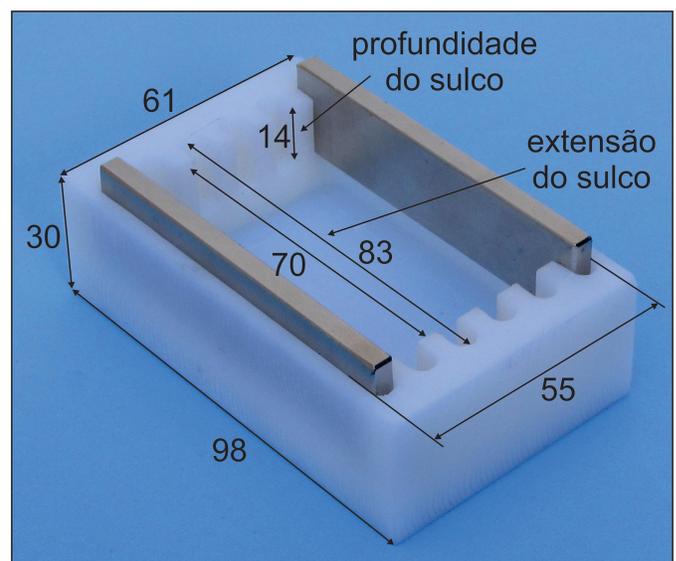


Figura 4 - Suporte dos ímãs.

suporte. Foram utilizados ímãs de neodímio de dimensões  $80 \times 20 \times 5$  mm, adquiridos em lojas na internet. Estes ímãs têm os polos em suas faces maiores, e são posicionados de modo que o polo Sul de um esteja voltado para o polo Norte do outro, produzindo um campo aproximadamente uniforme entre eles. Optamos por fazer este suporte em polietileno para que ele ficasse mecanicamente resistente e durável. O suporte precisa ser resistente para manter os ímãs no lugar, pois, como estão com os polos opostos direcionados um para o outro, há uma enorme força de atração entre eles. No entanto, como alternativa a este suporte de polietileno, é possível construir uma estrutura com pequenos pedaços de madeira, de larguras variadas, para manter os ímãs afastados.

Note que o ímã não fica totalmente inserido no sulco. Como sua largura (20 mm) é maior que a profundidade do sulco (14 mm), há um pequeno espaço entre o ímã e o fundo do suporte. Isso facilita a retirada do ímã no momento de trocá-lo de sulco.

Para tornar as explorações mais ricas, produzimos condutores com três comprimentos distintos: 25,4 mm, 39,3 mm e 51,6 mm. Os condutores foram confeccionados com arame de latão de diâmetro  $3/32$ " e todos têm a mesma altura de 100 mm (Fig. 5). Ressaltamos que o condutor deve ser de latão, cobre ou alumínio, para não interagir com o ímã quando não houver corrente transportada por ele, e deve ter um diâmetro que permita conduzir correntes elétricas de intensidades de até 4 A sem se aquecer em demasia.

Para finalizar essa descrição do aparato experimental, utilizamos uma pequena balança digital comprada em lojas na internet. Ela possui resolução de 0,01 g e seu limite de massa é 500 g. Esteja atento ao limite máximo da balança, pois a massa do suporte com os ímãs e o bloco de madeira não pode se aproximar muito desse valor.

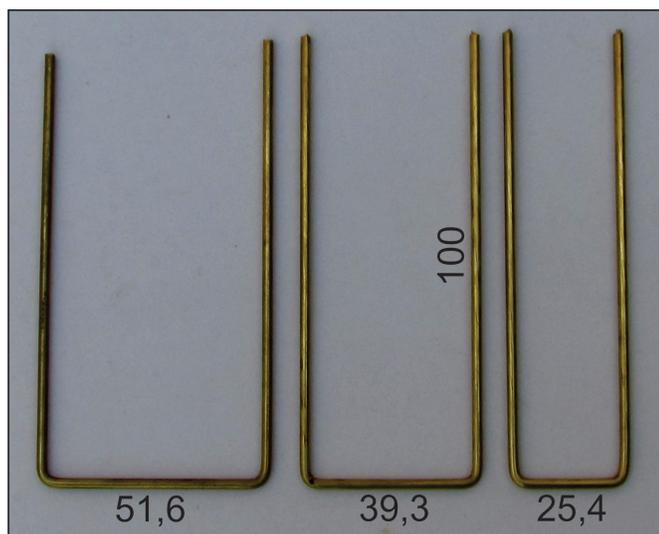


Figura 5 - Condutores em forma de U.

#### 4. Resultados e discussões

Para a realização dos experimentos, colocamos o bloco de madeira sobre o centro do prato da balança e o suporte dos ímãs apoiado sobre ele (não é necessário fixar o suporte no bloco; basta apoiá-lo sobre o bloco). Em seguida, posicionamos o condutor na região central entre os ímãs, tanto vertical quanto horizontalmente. Uma linha traçada com caneta, ao longo do centro de um dos ímãs (Fig. 2), nos ajuda a posicionar o condutor verticalmente. Para tal, movemos a balança para aproximar o condutor da linha traçada no ímã, ajustamos a altura e a inclinação do condutor paralelamente à linha, e apertamos a porca borboleta para fixar o condutor na posição desejada. Uma pequena régua plástica foi usada para medir as distâncias do condutor às bordas do suporte e, assim, posicioná-lo no centro dos ímãs, horizontalmente. Esse passo é importante pois o campo magnético é mais uniforme na região central entre os ímãs.

Uma vez posicionado corretamente, ligamos as extremidades do condutor a uma fonte de tensão DC, variável, e a um amperímetro para medir a corrente elétrica transportada por ele. A fonte deve ser capaz de fornecer correntes elétricas com intensidades de até 4 A. Os condutores em forma de U usados no experimento apresentam resistências elétricas muito baixas, da ordem de  $0,1 \Omega$ , logo tensões da ordem de 0,4 V produzem correntes que chegam aos 4 A. Nossa sugestão para usar correntes até 4 A é para que seja possível obter uma ampla faixa de pares de valores corrente/força para traçar o gráfico. É possível usar correntes menores, mas, neste caso, a extensão da faixa de valores ficará menor, pois a balança será empurrada por uma força menor.

Como próximo passo, ligamos a balança e apertamos a tecla tara, de modo a zerar sua leitura. Ressaltamos que a tara deve ser realizada com o bloco de madeira sobre a balança e o suporte com os ímãs sobre ele. Em seguida, aumentamos a tensão da fonte para produzir uma corrente no condutor. Ao ser percorrido por uma corrente elétrica, o condutor experimenta uma força magnética devido à sua interação com o campo na região entre os ímãs. A reação a essa força atua sobre os ímãs e, portanto, sobre a balança. Como a balança exibe o valor da massa em gramas, podemos obter o valor da força magnética em newtons dividindo a leitura da balança por 1000 e multiplicando o resultado por 9,8.

Uma primeira exploração possível de ser realizada com esta montagem consiste em mostrar que a força magnética atua em sentidos diferentes dependendo dos sentidos da corrente elétrica ou do campo magnético. Balanças digitais, como a que utilizamos, apresentam leituras positivas quando seu prato é pressionado e negativas quando ele é puxado. Desse modo, quando a corrente elétrica é estabelecida em um sentido no condutor, a balança apresenta leituras positivas (o su-

porte dos ímãs é pressionado contra o prato da balança). Se o sentido da corrente for invertido, suas leituras se tornam negativas (o suporte está sendo puxado para cima, pressionando menos o prato). A percepção de valores negativos só é possível, naturalmente, se for realizada a tara da balança com o bloco e o suporte dos ímãs sobre ela.

Algo semelhante é observado quando o suporte dos ímãs é girado por 180°, horizontalmente. Ao proceder desta forma, o campo magnético tem seu sentido invertido. Como consequência, a força magnética também tem seu sentido invertido e a balança indica essa inversão com a mudança do sinal da leitura.

Uma segunda exploração envolve investigar como varia a força magnética em função da corrente que circula pelo condutor. Para realizar essa investigação, variamos a tensão aplicada ao condutor, o que produz uma variação da corrente que passa por ele, e anotamos as respectivas leituras da balança, que posteriormente foram convertidas em valores de força. Executamos esses procedimentos utilizando uma distância entre os ímãs de 44,9 mm e os três diferentes condutores. Ressaltamos que nesta exploração o módulo do campo magnético foi mantido constante, pois não variamos a distância entre os ímãs. Os resultados podem ser vistos no gráfico da Fig. 6, que exibe uma relação linear entre a força magnética e a corrente que circula pelo condutor, como era de se esperar pela Eq. (1). Os gráficos apresentados neste trabalho foram elaborados por meio do software gratuito SciDAVis [36].

A partir dos dados do gráfico da Fig. 6, utilizamos a ferramenta *regressão linear*, do software SciDAVis, para obter as equações das retas do gráfico e seus respectivos coeficientes angulares. Para esta situação, com base na Eq. (1), o coeficiente angular de cada reta é igual ao

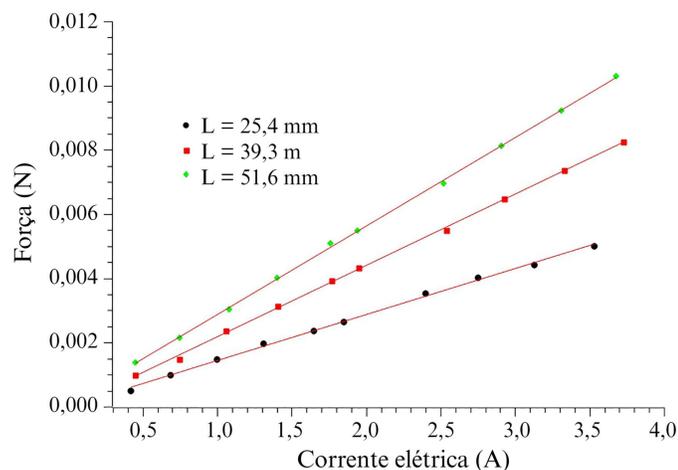


Figura 6 - Gráfico da força magnética em função da corrente para diferentes valores do comprimento do condutor e para uma distância entre os ímãs de 44,9 mm.

produto do comprimento do condutor ( $L$ ) pelo módulo do campo magnético ( $B$ ). Resolvendo para isolar  $B$ , determinamos o módulo do campo magnético entre os ímãs para cada reta. Os resultados encontrados podem ser vistos na Tabela 1.

Considerando os condutores de menor comprimento, os dados da Tabela 1 mostram o mesmo valor para o módulo do campo magnético. Por outro lado, o condutor de maior comprimento apresentou um resultado discrepante. A fim de estabelecer algum parâmetro de avaliação para esses valores, inclusive para entender a discrepância, e na falta de um teslâmetro comercial em nossa instituição, recorreremos a um medidor de campo magnético de baixo custo, produzido com um sensor de efeito Hall 49E (Fig. 7B).

O sensor 49E é um circuito integrado cuja tensão de saída é proporcional ao campo magnético a que ele está submetido. Desde que seja apropriadamente calibrado, ele pode ser usado como um medidor de campo

magnético [37]. Contudo, em vez de utilizar o circuito tal como proposto pelos autores da referência anterior, que oferece diversos outros recursos, utilizamos a versão mais simples possível, com base nas informações do fabricante [38]. Uma bateria de 9 V foi usada como fonte de tensão estável para alimentar o sensor (Fig. 7). Para reduzir a tensão para 5 V, valor indicado na folha de dados do fabricante, empregamos um

circuito regulador de tensão 7805 (Fig. 7C). Para melhorar a estabilidade da tensão, o fabricante do 7805 sugere a utilização de dois capacitores: um de 330 nF ligado entre o pino 1 do regulador de tensão e o terminal negativo da bateria, e outro, de 100 nF, ligado entre o pino 3 e o negativo da bateria, conforme mostra o diagrama do circuito na Fig. 7D. Elaboramos uma pequena placa de circuito impresso para fixar os componentes eletrônicos. Também soldamos o sensor em uma tira, feita com placa para circuito impresso, para facilitar seu manuseio. Note que, na placa onde está soldado o sensor, há três trilhas de cobre: uma delas está conectada à tensão de 5 V, a outra, conectada ao terminal negativo da bateria, e a última é a saída de tensão do sensor. Essa saída de tensão está conectada ao borne vermelho, e o negativo da bateria ao borne preto. Dessa forma, basta conectar um voltímetro aos bornes para monitorar a tensão de saída do sensor.

Tabela 1: Módulo do campo magnético entre os ímãs, calculados para cada reta do gráfico da Fig. 6.

Comprimento do condutor (mm)	Campo magnético (mT)
25,4	56,5 ± 0,7
39,3	56,5 ± 0,4
51,6	53,3 ± 0,3

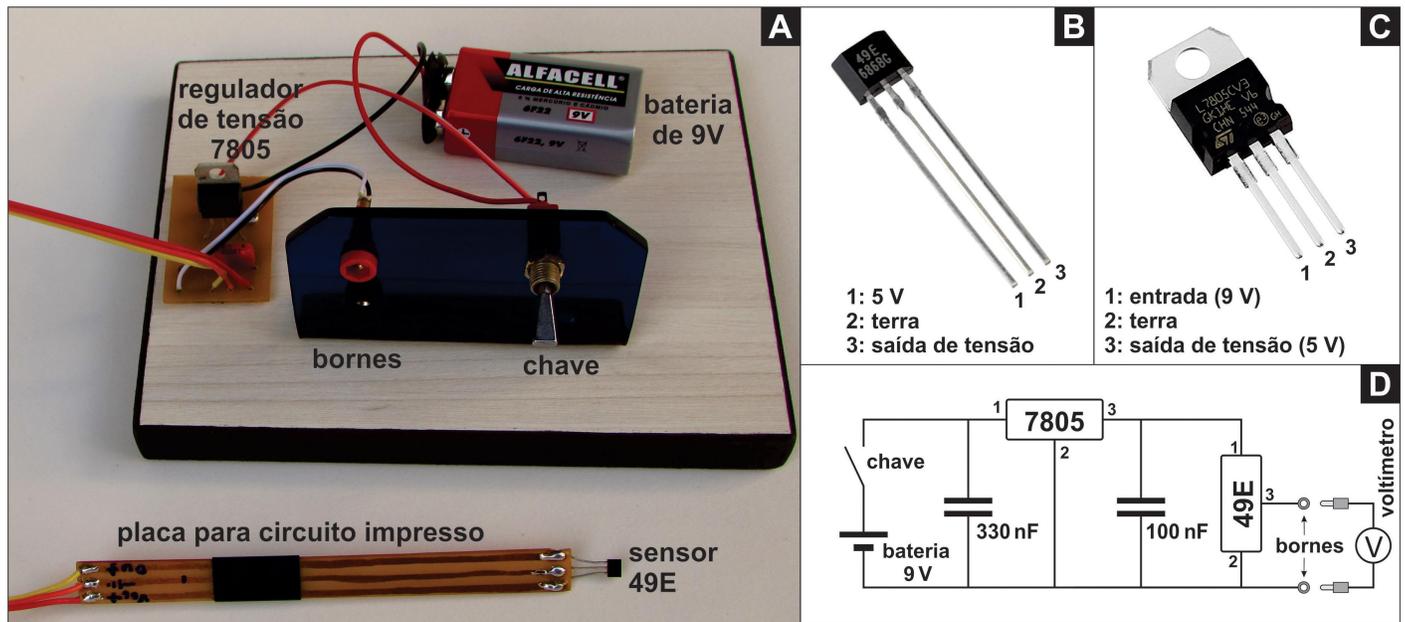


Figura 7 - Em A, fotografia do circuito do teslâmetro, em B, aspecto físico do sensor 49E, em C, aspecto físico do regulador 7805, e, em D, diagrama esquemático do circuito.

Para utilizar esse sensor é necessário calibrá-lo com um campo magnético conhecido. Nós realizamos essa calibração por meio de dois métodos diferentes. No primeiro, construímos uma bobina de Helmholtz [39-40], com diâmetro interno de 38 mm e externo de 50 mm, com 214 espiras em cada uma das bobinas, com fio de cobre esmaltado 17 AWG. Posicionamos o sensor no centro das bobinas e variamos a corrente elétrica que circulava por elas. O módulo do campo magnético no centro de uma bobina de Helmholtz pode ser calculado por meio da equação

$$B = \frac{8\mu_0 NI}{5^{\frac{3}{2}}R},$$

em que  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo, quase idêntica à do ar,  $N$  o número de espiras em cada bobina,  $I$  a corrente elétrica que circula por elas e  $R$  o raio das bobinas e a separação entre elas. Portanto, para cada intensidade da corrente nas bobinas, calculamos o módulo do campo magnético e medimos a respectiva tensão de saída do sensor 49E. Desta forma, obtivemos uma série de pares de valores de tensão e campo magnético que utilizamos para fazer um gráfico e obter a curva de calibração do sensor (Fig. 8). A equação da reta,  $V = 0,0277B + 2,48$ , foi obtida por meio de uma regressão linear utilizando o software SciDAVis. Esta equação relaciona a tensão de saída do sensor ( $V$ ), em Volt, com o campo magnético a que ele está submetido ( $B$ ), em militesla (para obter os valores negativos do campo magnético invertemos o sentido da corrente elétrica nas bobinas).

No segundo método, utilizamos um solenoide, disponível na instituição, que possui junto a si a equação

de calibração que relaciona o módulo do campo magnético em seu centro com a corrente elétrica em suas espiras (não há o número de espiras neste solenoide, mas ele tem diâmetro interno de 26 mm, diâmetro externo de 56 mm, comprimento de 153 mm e espiras de fio 17AWG; este solenoide teve sua equação de calibração levantada em outra instituição, que dispunha de um teslâmetro comercial da marca Phywe). Posicionamos o sensor no centro do solenoide, variamos a intensidade da corrente elétrica em suas bobinas, calculamos o módulo do campo magnético e medimos o valor da tensão de saída do 49E (esse método é muito semelhante àquele utilizado pelos autores da Ref. [37]). Os resultados nos permitiram elaborar o gráfico da Fig. 9 e obter a equação de calibração a partir de uma

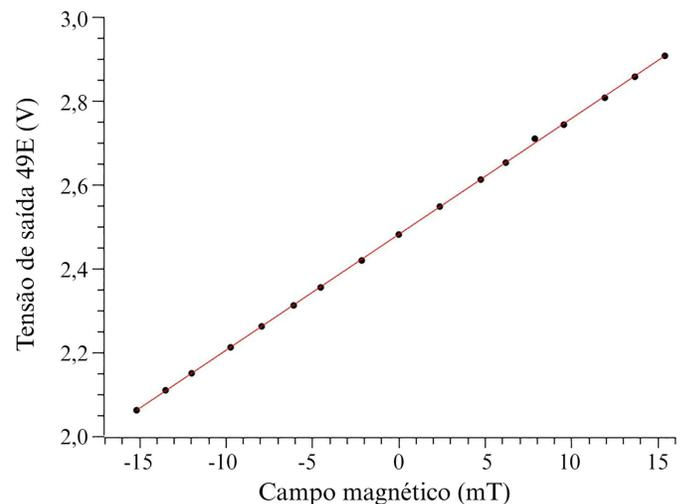


Figura 8 - Curva de calibração do sensor utilizando as bobinas de Helmholtz.

regressão linear utilizando o software SciDAVis:  $V = 0,0281B + 2,47$ . Assim, utilizando métodos distintos, obtivemos curvas de calibração com coeficientes muito semelhantes.

Após o processo de calibração do sensor, nós o utilizamos para medir o campo magnético no centro dos ímãs na condição em que foram obtidos os dados do gráfico da Fig. 6, isto é, para uma distância entre os ímãs de 44,9 mm. Posicionamos o sensor na região central entre os ímãs, medimos a tensão de saída com um voltímetro e calculamos o campo utilizando as equações de calibração. O valor encontrado foi  $B = (55 \pm 2)$  mT.

Portanto, comparando os módulos do campo magnético entre os ímãs obtidos pelos diferentes métodos utilizados (calculado a partir da força magnética sobre o condutor e medido com o teslâmetro de baixo custo), vemos que os valores estão bastante próximos, considerando a margem de erro das medidas realizadas. Cabe um comentário adicional a respeito do módulo do campo obtido para o condutor de maior comprimento (o valor discrepante na Tabela 1).

Com o teslâmetro de baixo custo, foi possível perceber que há uma grande variação no módulo do campo magnético quando realizamos a medida nas proximidades das bordas dos ímãs em comparação com medidas realizadas no centro. O campo é praticamente uniforme na região central, mas decai quando nos aproximamos das bordas. Nossa hipótese é que o condutor maior, para uma distância de 44,9 mm entre os ímãs, experimenta uma força magnética um pouco menor nas bordas, o que contribui para uma força total menor sobre o condutor. Por esse motivo, o valor do campo magnético encontrado para esse condutor, exibido na Tabela 1, foi um pouco menor que para os demais.

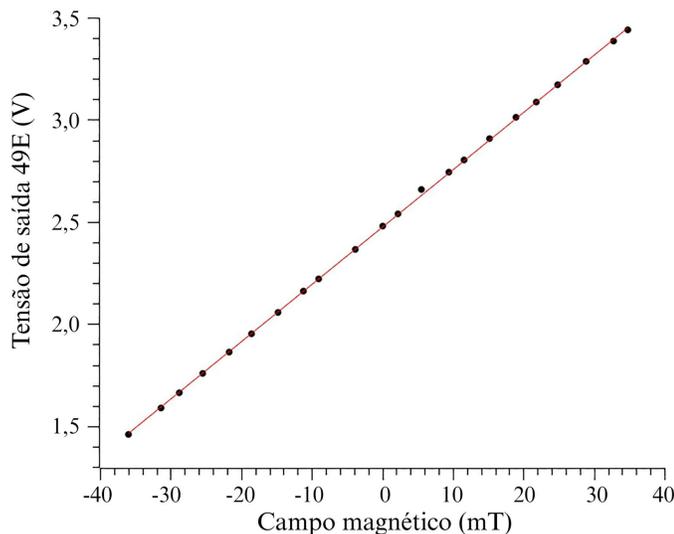


Figura 9 - Curva de calibração do sensor utilizando o solenoide.

Infelizmente, não foi possível medir o módulo do campo entre os ímãs para distâncias menores, pois na medida em que os ímãs são aproximados um do outro, o campo aumenta, e o valor extrapola o limite de medição do teslâmetro de baixo custo. De acordo com o fabricante [38], o sensor Hall 49E é apropriado para medir campos magnéticos entre -100 mT e + 100 mT. Contudo, o método de variar a corrente e medir a força pode ainda ser usado para essa determinação, conforme pudemos constatar ao comparar os dados da Tabela 1 com o valor do campo medido pelo teslâmetro para os condutores menores.

Outro resultado importante, exibido pelo gráfico da Fig. 6, é o fato de a força magnética depender do comprimento do condutor. Para um mesmo valor de corrente, podemos perceber que a força magnética é maior para o condutor de maior comprimento. Embora tenhamos produzido apenas três condutores com comprimentos diferentes, o que nos permite obter poucos dados, podemos ver pelo gráfico da Fig. 10 que a força varia linearmente com o comprimento do condutor (lembramos ao leitor, pelo argumento apresentado dois parágrafos atrás, que os dados do último ponto podem estar um pouco menores do que deveriam; isso pode explicar o fato de os pontos experimentais não estarem mais alinhados com a curva da regressão). Para obter os dados da Fig. 10, aplicamos uma corrente de 2,00 A aos diferentes condutores e determinamos a força magnética que eles experimentaram. Esse procedimento foi feito para duas diferentes distâncias entre os ímãs (24,9 mm e 44,9 mm), o que significa diferentes valores do campo magnético entre eles. Novamente, os dados se mostram em bom acordo com a Eq. (1).

Outra exploração possível é a verificação de como varia a força magnética em função do módulo do campo magnético a que está sujeito o condutor. O suporte com sulcos permite que seja variada a distância entre os ímãs em valores aproximados de 5, 15, 25, 35 e

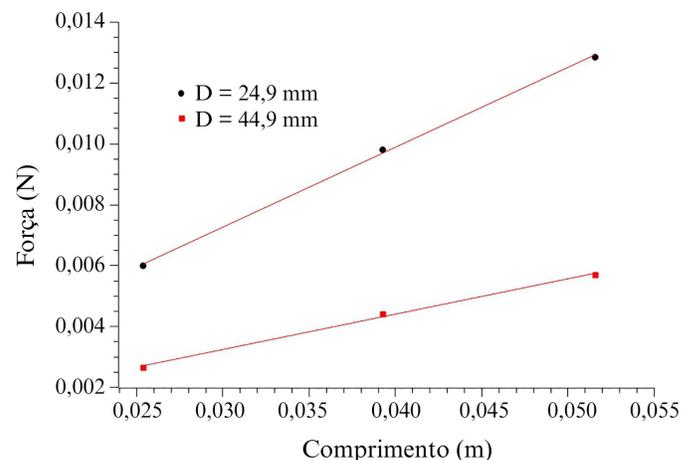


Figura 10 - Gráfico da força magnética em função do comprimento do condutor para duas diferentes distâncias entre os ímãs e uma corrente de 2,00 A.

45 mm. Variando a distância entre os ímãs, ocorre uma mudança no módulo do campo magnético na região entre eles.

Como não dispúnhamos de um teslâmetro apropriado para medir o módulo do campo magnético para as distâncias menores que 45 mm, conforme apontamos em parágrafos anteriores, utilizamos a estratégia da segunda exploração para determiná-lo. Posicionamos o condutor de comprimento 39,3 mm entre os ímãs e, para cada uma das distâncias entre os ímãs, medimos a força magnética em função da corrente. O gráfico da Fig. 11 mostra os resultados. Por meio desse gráfico, já é possível notar que a força aumenta conforme aumenta o campo, isto é, conforme a distância entre os ímãs é reduzida.

Por meio de regressões lineares das retas do gráfico da Fig. 11, determinamos o módulo do campo magnético para cada distância entre os ímãs. Os resultados podem ser vistos na Tabela 2.

A partir dos dados da Tabela 2, elaboramos o gráfico da força em função do campo magnético (Fig. 12). Para compor esse gráfico, utilizamos o condutor de 39,3 mm de comprimento, percorrido por uma corrente de 2,00 A. Para cada distância entre os ímãs, posicionamos o condutor entre eles e medimos o valor da força.

Como podemos notar, o gráfico exibe uma relação linear entre o módulo do campo magnético e a força

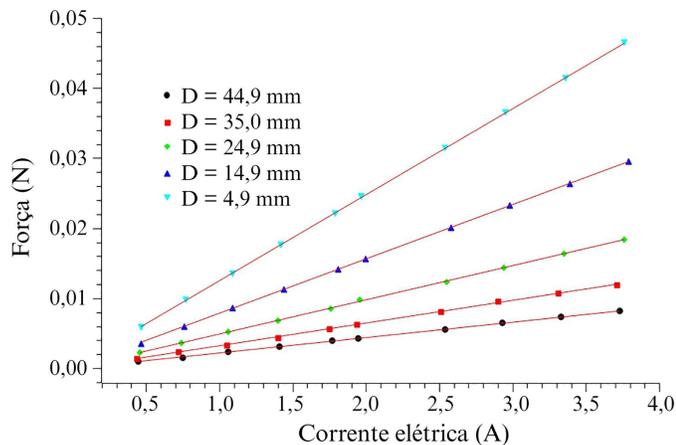


Figura 11 - Gráfico da força magnética em função da corrente para diferentes valores da distância entre os ímãs, para o condutor de 39,3 mm de comprimento.

Tabela 2: Módulo do campo magnético entre os ímãs para as diferentes distâncias.

Distância entre os ímãs (mm)	Campo magnético (mT)
44,9	$56,5 \pm 0,4$
35,0	$82,4 \pm 0,6$
24,9	$123,8 \pm 0,6$
14,9	$197,9 \pm 0,6$
4,9	$312,9 \pm 0,9$

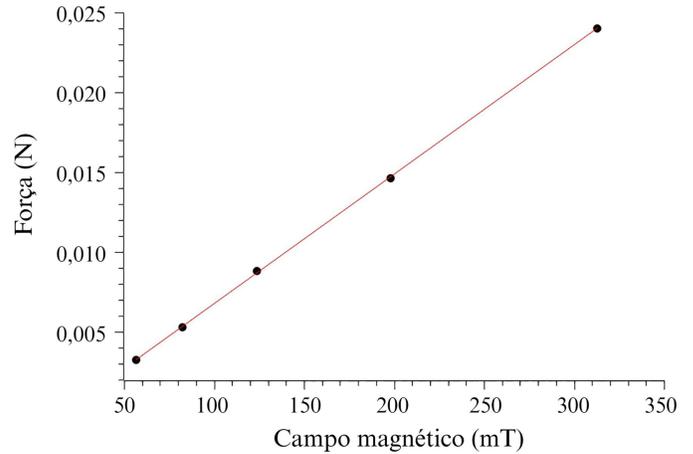


Figura 12 - Gráfico da força magnética em função do campo magnético para o condutor de 39,3 mm de comprimento, sob uma corrente de 2,00 A.

magnética experimentada pelo condutor, em conformidade com a Eq. (1).

## 5. Considerações finais

Neste trabalho, apresentamos um experimento desenvolvido para possibilitar explorações envolvendo a força magnética sobre um condutor retilíneo, percorrido por corrente elétrica, que se encontra imerso em um campo magnético uniforme.

A montagem experimental foi elaborada utilizando materiais de custo reduzido, como pedaços de madeira, MDF, polietileno e uma pequena balança digital. Há alguma dificuldade concernente à produção das peças caso não se disponha das ferramentas apropriadas. Por exemplo, a confecção do suporte dos ímãs foi muito fácil pela disponibilidade de uma fresadora. Contudo, é possível elaborar estruturas semelhantes utilizando outros materiais e ferramentas.

O aparato experimental que apresentamos neste trabalho permitiu investigar o comportamento da força magnética em função do comprimento do condutor, da intensidade da corrente elétrica que o percorre, do módulo do campo magnético a que está submetido, bem como dos sentidos da corrente e do campo. Procuramos apresentar, de modo evidente, que os resultados experimentais encontrados com as medidas concordam quantitativamente com a equação  $F_m = ILB\text{sen}\phi$ . Portanto, embora tenhamos utilizado materiais de custo reduzido, a obtenção de boa concordância com os modelos teóricos da física é um resultado relevante, no sentido de apontar positivamente para esse tipo de iniciativa.

Verificamos que é necessário o desenvolvimento de atividades experimentais de custo reduzido que possam ser usados para evidenciar o aspecto quantitativo dos modelos teóricos da física. Em geral, muitas sugestões de experimentos de baixo custo se prestam a explorações qualitativas, pelas limitações do material

ou da proposta. Contudo, imaginamos que outras instituições, assim como a nossa, carecem de montagens experimentais que permitam investigações quantitativas dos fenômenos. Em geral, os experimentos comercializados por empresas que produzem materiais para laboratório possibilitam esse tipo de investigação, porém apresentam um preço proibitivo para grande parte das escolas públicas. Esperamos que mais professores busquem o desenvolvimento de recursos como o que propusemos aqui, no sentido de oferecer possibilidades e alternativas para que instituições que têm enfrentado dificuldades para equipar seus laboratórios didáticos possam ter condições de fazê-lo.

O próximo passo a ser seguido é a utilização deste experimento como parte das atividades da disciplina

de física experimental, de modo a avaliar a interação dos estudantes com o material.

### Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao Instituto Federal de Minas Gerais – *campus* Congonhas, pelo apoio ao projeto com a disponibilização de uma bolsa de pesquisa, bem como ao professor Elmo Salomão Alves, do Departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais, pelas valiosas contribuições para a realização deste trabalho.

Recebido em: 13 de Março de 2023

Aceito em: 1 de Setembro de 2023

### Referências

- [1] S. Holz, O. Battistel, I. Sauerwein, *Ensino e Pesquisa* **18**, 136 (2020). [doi](#)
- [2] M. Pereira, M. Moreira, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **34**, 265 (2017). [doi](#)
- [3] J. Alves Filho, *Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- [4] J. Pimentel, V. Zumpano, L. Yaginuma, *Revista de Ensino de Física* **11**, 15 (1989).
- [5] E. Alves, A. Silva, *A Física na Escola* **9**(1), 26 (2008).
- [6] H. Morishige, T. Kato, *The Physics Teacher* **60**, 667 (2022). [doi](#)
- [7] P. Rosa, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **17**, 182 (1995).
- [8] D. Sias, R. Ribeiro-Teixeira, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **23**, 360 (2006).
- [9] M. Cavalcante, T. Rodrigues, D. Bueno, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **31**, 614 (2014). [doi](#)
- [10] O. Silva, L. Schmidt, C. Laburú, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **38**, 446 (2021). [doi](#)
- [11] D. Delizoicov. *Conhecimento, Tensões e Transições*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1991.
- [12] M. Giordan, *Química Nova na Escola* **10**, 43 (1999).
- [13] D. Hodson, *Educational Philosophy and Theory* **20**, 53 (1988). [doi](#)
- [14] F. Wesendonk, L. Prado, *Experiências em Ensino de Ciências* **10**, 54 (2015).
- [15] A. Hofstein, V. Luneta, *Science Education* **88**, 28 (2003). [doi](#)
- [16] R. Gonçalves, M. Goi. *Revista Debates em Ensino de Química* **6**, 136 (2021). [doi](#)
- [17] I. Higa, O. Oliveira, *Educar em Revista* **44**, 75 (2012). [doi](#)
- [18] A. Borges, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19**, 291 (2002).
- [19] M. Araújo, M. Abib, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 176 (2003). [doi](#)
- [20] M. Séré, S. Coelho, A. Nunes, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **20**, 30 (2003).
- [21] C. Laburú, M. Barros, B. Kanbach, *Investigações em Ensino de Ciências* **12**, 305 (2007).
- [22] D. Ainslie. *The Physics Teacher* **2**, 128 (1964). [doi](#)
- [23] K. Fletcher, K. Kinsey, *The Physics Teacher* **41**, 280 (2003). [doi](#)
- [24] J. Vuolo, C. Furukawa, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **14**, 51 (1992).
- [25] T. Greenslade Jr., *The Physics Teacher* **22**, 540 (1984). [doi](#)
- [26] B. Oostra, *The Physics Teacher* **54**, 560 (2016). [doi](#)
- [27] J. Molina-Bolívar, A. Abella-Palacios, *Physics Education* **46**, 517 (2011). [doi](#)
- [28] A. Sankote, K. Thamaphat, S. Limsuwan, *Advanced Materials Research* **770**, 374 (2013). [doi](#)
- [29] A. Campos, E. Alves, N. Speziali, *Física Experimental Básica Na Universidade* (Editora UFMG, Belo Horizonte, 2007).
- [30] PSSC, *Física: Parte IV* (Editora Universidade de Brasília, São Paulo, 1964).
- [31] J. Fernandes, *Balança De Ampère-Faraday: Uma Estratégia Para Discutir Campo Magnético E Força Magnética*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, 2015.
- [32] Y. Kraftmakher, *The Physics Teacher* **42**, 500 (2004). [doi](#)
- [33] W. Herreman, R. Huysentruyt, *The Physics Teacher* **33**, 288 (1995). [doi](#)
- [34] J. Sinacore, E. Graf, *The Physics Teacher* **38**, 296 (2000). [doi](#)
- [35] M. González, *Physics Education* **54**, 055025 (2019). [doi](#)
- [36] SciDAVis software. <http://https://scidavis.sourceforge.net/index.html>. Acesso em 22/08/2023.
- [37] W. Silva, J. Fonseca, *A Física na Escola* **19**(2), 52 (2021).
- [38] [http://www.secsemi.com/ckfinder/userfiles/files/SS49E\\_LI\\_N.pdf](http://www.secsemi.com/ckfinder/userfiles/files/SS49E_LI_N.pdf). Acesso em 22/08/2023.
- [39] R. Robert, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 40 (2003). [doi](#)
- [40] W. Magno, M. Andrade, A. Araújo, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **32**, 3403 (2010). [doi](#)