

# Força Magnética

Leandro Manoel, R. R. 15/0135319, Ranier Menote; 15/0020864, Tábata  
Luiza S. Alves; 15/0148828, and Lucas Pereira de Oliveira; 150137419  
*IF-UnB*

(Data: setembro de 2017)

Este trabalho se ocupa em analisar as dependências funcionais da força magnética sobre espiras, com correntes estacionárias, submetidas em um campo magnético aproximadamente homogêneo e constante no tempo.

## INTRODUÇÃO

As forças elétrica e magnética são há milênios fenômenos conhecidos, com relatos da sua existência que datam da antiguidade, na Grécia. Até o século XIX estes eram fenômenos tratados de maneira independente, de fato dois ramos independentes da física entre os quais não se via relação. Foi em 1820 que Hans Christian Oersted observou, aproximando uma bússola de um fio condutor portador de corrente, a existência de um campo magnético ao redor deste através do desvio sofrido pelo ponteiro da bússola durante a aproximação. Constatou-se então que campos magnéticos são um efeito cinemático de cargas elétricas em movimento. A relação empírica entre a corrente  $I$  e o campo  $B$  gerado por esta é dada pela lei de Ampère.

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (1)$$

Utilizando a eq. (1) para o cálculo do campo fora do fio, considerando a lei de Gauss para o magnetismo dada por

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

somadas às condições de contorno que impõem que para  $d \rightarrow \infty$   $\mathbf{B}$  deve tender a 0, temos que o campo gerado pelo fio é dado por

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \hat{s} \quad (3)$$

Onde  $\hat{s}$  é o versor radial das coordenadas cilíndricas. Por sua vez, também é possível observar empiricamente a ação de uma força magnética sobre cargas em movimento quando submetidas a um campo magnético, esta é dada pela seguinte relação.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4)$$

Reescrevendo a equação anterior em termos da densidade de força atuante em uma distribuição contínua de

cargas com densidade  $\rho$  se movimentando a uma velocidade  $\mathbf{v}$ , temos.

$$\mathbf{f} = \rho(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (5)$$

Onde  $\mathbf{J}$  é a densidade de corrente gerada pela movimentação da distribuição de cargas. Integrando a eq. (5) em um fio de comprimento  $L$  assumindo que o fio se encontra na direção  $\hat{l}$  e mantendo o campo magnético uniforme temos.

$$\mathbf{F} = IL(\hat{l} \times \mathbf{B}) \quad (6)$$

Assim, o módulo da força magnética pode ser obtido a partir de.

$$F = ILB \sin \theta \quad (7)$$

## Eletroímã

Em geral, materiais condutores possuem em seu interior milhões de coleções de pequenas correntes circulares, essas correntes geram dipolos magnéticos de intensidade  $\mu_i \propto I_i A_i$ . Ao imergir certos materiais em um campo magnético  $\mathbf{B}$  a orientação das o que faz com que estes produzam um campo magnético induzido  $\mathbf{H}$ ,

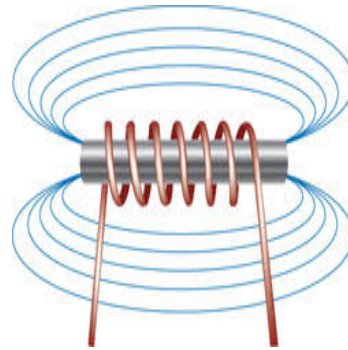


Fig. 01

A intensidade desse ímã depende do quão forte for o campo criado pela bobina, que por sua vez depende da corrente que passa por ela. Esse ímã criado a partir de um material condutor e uma bobina é chamado de eletroímã

## OBJETIVOS

Verificar as relações funcionais entre a força magnética e o campo, corrente e inclinação entre eles.

## MATERIAIS

- Balança de precisão: utilizada para medir a diferença da força pelos efeitos da força magnética. Erro  $\pm 0,005g$
- Bobina com núcleo de ferro: Geradores de campo magnético para produzir a força que trabalharemos
- Teslametro: Medidor de campo magnético Erro  $\pm 0,05mT$
- Fontes: gerador de tensão para produzir corrente elétrica.
- Amperímetro: medidor de corrente. Erro  $\pm 0,05A$
- Espira em U (12,5 mm; 25 mm e 50 mm): Espira que sofre influência da força

## METODOLOGIA

Este experimento foi dividido em quatro procedimentos.

Para verificar o efeito da ação de um campo magnético sobre um segmento de uma espira com corrente constante  $i_e$ , é necessário primeiramente ser capaz mensurar o campo gerado e, para simplificar a análise, relacioná-lo com a corrente indutora denominada  $i_b$ . Assim, na primeira parte do experimento visou-se estabelecer esta relação para que nas partes posteriores fosse possível utilizar os valores da corrente  $i_b$  para se referir ao campo.

Após calibrar a balança, e medir a massa das espiras longe de quaisquer influências de forças externas, a força magnética será determinada então como uma alteração na medida do peso aparente da espira submetida a um campo magnético gerado pelo par de bobinas.

Dessa forma, dependendo da orientação da corrente da espira  $i_e$  ou do campo das bobinas  $B_b$  haverá um aumento ou diminuição da massa aparente.

Calculando essa alteração nas medidas, procuraremos verificar as expressões para a força de Lorentz.

## ANÁLISE DE DADOS

Sabemos que o campo magnético do eletroímã depende da intensidade da corrente que passar pela bobina. Dessa maneira, utilizamos um par de eletroímãs conectados pelo mesmo circuito como mostra a imagem:

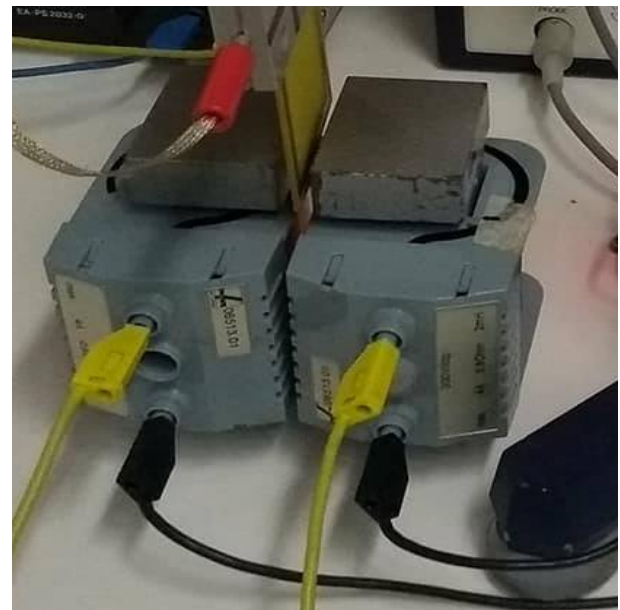


Fig. 02

Com o teslâmetro medimos o campo magnético entre os eletroímãs para vários valores de correntes. É esperado que o campo entre os eletroímãs dependam também da distância entre eles, por conta disso, analisaremos duas situações distintas que correspondem a distâncias diferentes.

Abaixo o dependência do campo magnético com a corrente da bobina( $i_b$ ) :

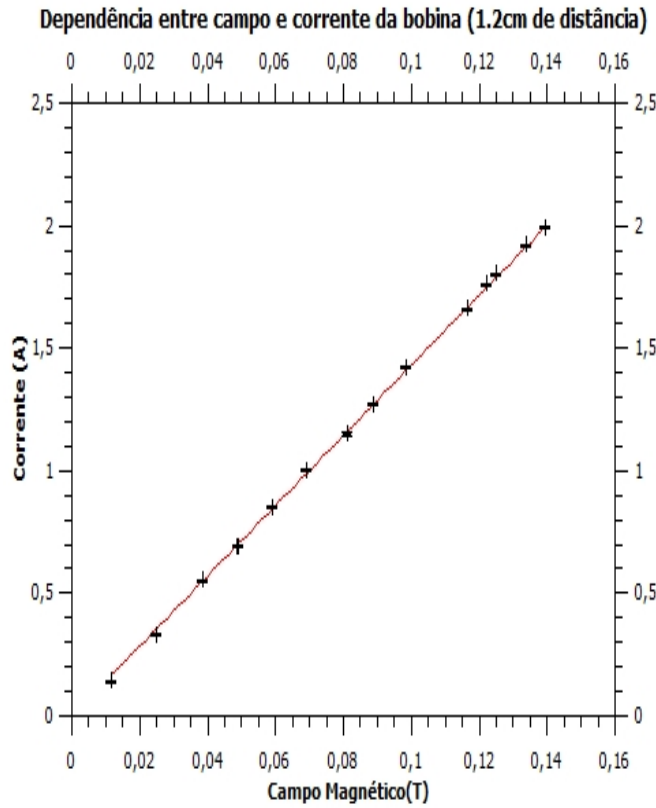


Gráfico 01

O gráfico mostra que a dependência do campo magnético da bobina com a corrente que passa por ela é linear, passando aproximadamente pelo zero.

O primeiro gráfico, referente as bobinas separadas por uma distância de 1.2cm teve o coeficiente angular calculado( $K$ ):

$$K_1 = 14,4913 + / - 0,0384(A/T)$$

(8)

Este parâmetro, e sua incerteza, foi calculado através do programa QtiPlot

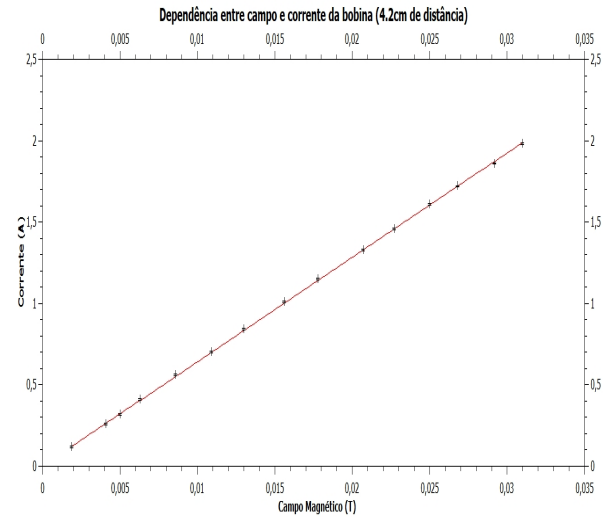


Gráfico 02

O segundo gráfico apresenta a mesma relação linear mas com o coeficiente angular diferente devido a separação entre os eletroímãs ser de 4.2cm, aproximadamente.

$$K_2 = 63,9517 + / - 0,0923(A/T)$$

(9)

Note que o coeficiente angular da segunda situação é consideravelmente maior que a primeira situação. Isto pode ser explicado pelo fato do campo magnético ser menor, para o mesmo valor de corrente, caso os eletroímãs estejam mais afastados. Isto porque o campo de cada um dos eletroímãs se superpõem aumentando a intensidade. Porém eles ficam mais fracos com a distância. Dessa forma, para uma distância de 4.2cm é necessário uma corrente maior para se obter o mesmo campo magnético resultante, justificando o valor do coeficiente angular maior.

Com tais parâmetros podemos determinar o campo a partir das relações inversas mostradas. Para afastamento de 1.2cm:

$$B_b \approx 0.069i_b$$

(10)

Onde  $B_b$  é o campo criado pelo sistema das bobinas e  $i_b$  a corrente que passa por elas.

Para afastamento de 4.2cm:

$$B_b \approx 0.016i_b$$

(11)

Depois de obtermos essa relação, vamos verificar como se comporta uma espira inserida nesse campo magnético.

Para detectarmos algum efeito do campo magnético corretamente tivemos de calibrar a balança de acordo com o peso de cada espira. Longe de qualquer fonte de campo magnético medimos a massa da espira por meio da balança de precisão como mostra a figura:

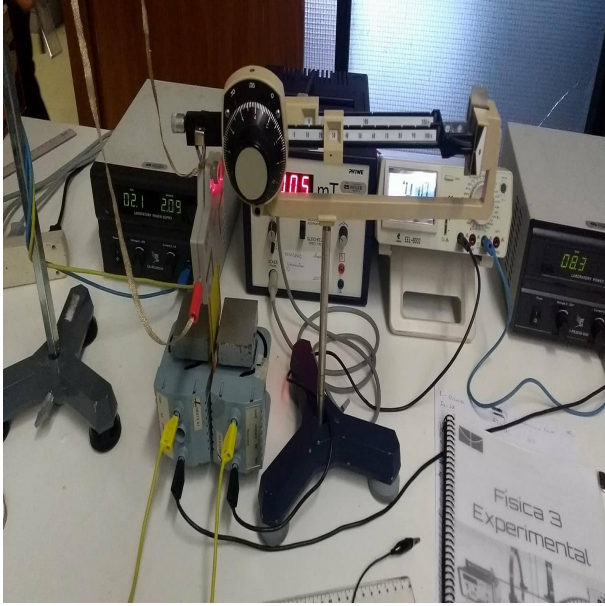


Fig. 03

Se houver algum efeito entre o campo magnético e a corrente da espira haverá uma alteração no valor da massa medida pela balança (massa aparente) de modo a aumentar ou diminuir dependendo da direção da corrente e do campo.

Foram testados espiras de vários tamanhos (50mm, 25mm, 12.5mm). Apenas o comprimento horizontal é que realmente importa, uma vez que a corrente possui a mesma intensidade e orientações opostas nas direções verticais, fazendo que a força resultante devido as correntes verticais seja nula.

#### Dependência da força magnética com a corrente da espira $i_e$

Verificamos a dependência funcional entre a força magnética e a corrente da espira. Fixamos o valor da corrente da bobina em aproximadamente 2 Amperes, para que variações na força não seja causadas pela variação do campo. Mantive-se as bobinas afastadas por uma distância de aproximadamente 1.2cm.

A força magnética é facilmente calculada a partir da diferença de massas:

$$F_m = (m_i - m_a)g \quad (12)$$

Onde  $m_i$  é a massa inercial, medida sem qualquer força

externa,  $m_a$  é a massa aparente medida quando a espira está sendo influenciada pelo campo magnético das bobinas e  $g$  a aceleração da gravidade (valor utilizado no experimento  $g \approx 9.82 m/s^2$ ).

Dependência da força magnética com a corrente da espira (50mm / distância 1.2cm)

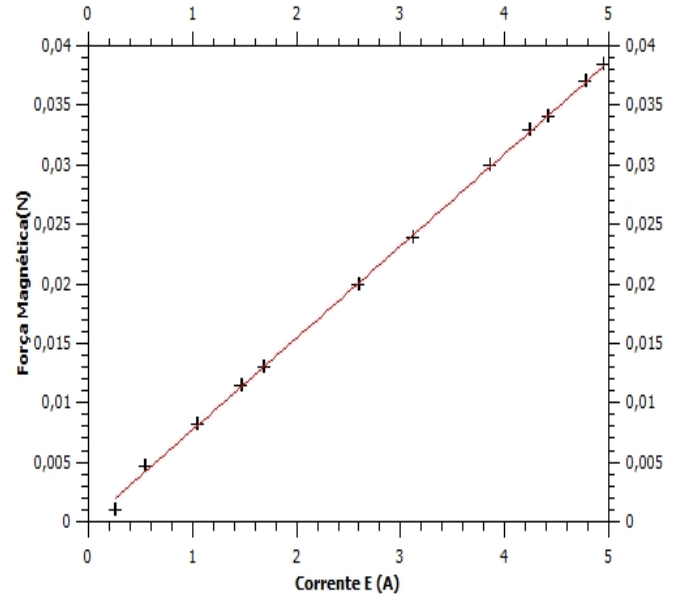


Gráfico 03

O primeiro gráfico, refere-se à espira de maior tamanho (50mm) e consequentemente com maior massa inercial ( $\approx 36,27 \pm 0.005$  gramas). Vemos então que  $F_m \propto i_e$ . Calculando a constante de proporcionalidade:

$$C_1 = 0,00780 + / - 0,00003 (N/A) \quad (13)$$

e portanto,

$$F_m \approx 0,00780 i_e \quad (14)$$

Onde  $i_e$  é a corrente da espira submetida ao campo magnético

Esperamos que a força magnética possua alguma dependência com o comprimento da espira e com o campo magnético. Se calcularmos  $L * B_b \approx 0,00690$  o que sugere que a força magnética também seja proporcional a essas outras grandezas. Mas esta convicção só deve ser verificada com precisão e objetividade.

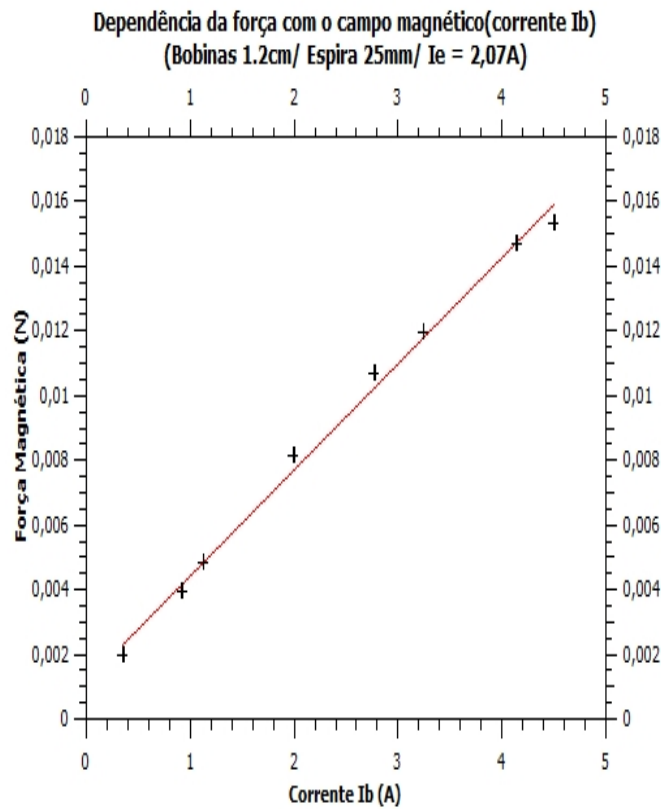


Gráfico 04

Para a espira de 25mm encontramos um coeficiente angular menor:

$$C_2 = 0,00391 + / - 0,00002$$

(15)

Novamente,  $L * B_b \approx 0,00345$ .

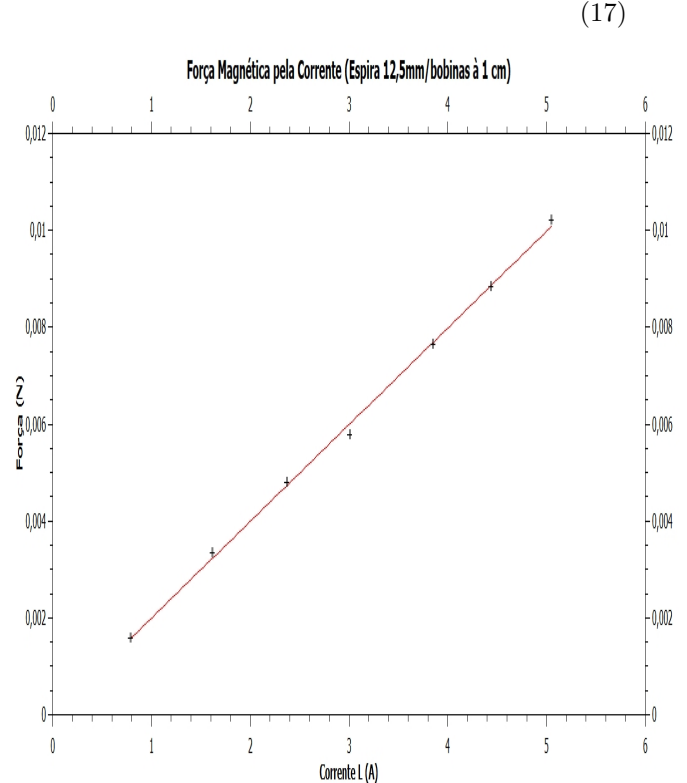


Gráfico 05

Para a espira de 12.5mm encontramos um coeficiente angular ainda menor:

$$C_3 = 0,00200 + / - 0,00001$$

(18)

$$F_m \approx 0,00200i_e$$

Novamente,  $L * B_b \approx 0,00172$ .

Como pode ser observado pelos dados, a constante de proporcionalidade diminui para espiras menores, o que já era esperado considerando que haverá menos interações para espiras menores.

#### Dependência da força magnética com o campo magnético $B_b$

$$F_m \approx 0,00391i_e$$

(16)

Além da intensidade da corrente  $i_e$ , a força magnética deve depender do campo magnético na qual a espira está inserida.

Sabemos que o campo magnético possui uma relação linear com a corrente que passa pelas bobinas. Dessa forma, foi construída a relação entre a força magnética e a corrente das bobinas separadas pela distância de 1.2cm.

A corrente da espira de 50mm foi fixada  $i_e \approx 2,10A$ .

Variando o campo magnético através da corrente das bobinas ( $i_b$  de 0 até  $\approx 5A$ ) temos:

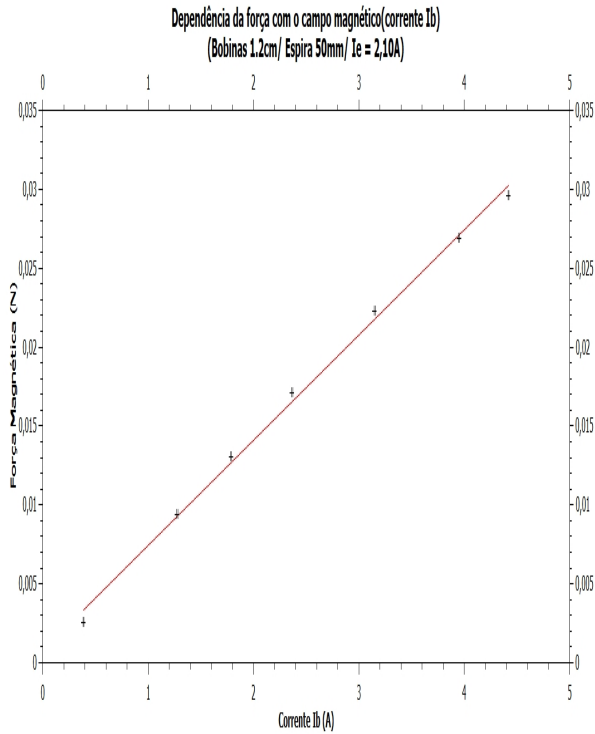


Gráfico 06

A dependência entre a força magnética e a corrente das bobinas é linear, e consequentemente com o campo também deve ser.

a constante de proporcionalidade é:

$$C_4 = 0,00667 \pm 0,00380$$

(19)

Mas considerando que a força já se mostrou proporcional a corrente  $i_e$ , que é constante nessa situação, e que  $i_b$  também é proporcional ao campo  $B_b$ , temos que  $C_4 = C'_4 * i_e B_b$

Portanto considerando os parâmetros acima e a constante de proporcionalidade entre  $i_b$  e  $B_b$ :

$$F_m \approx C_4 i_b \approx C'_4 * i_e B_b \approx 0.04603 i_e B_b$$

(20)

Note que a constante final ( $C'_4$ ) é um valor muito próximo ao comprimento da espira.

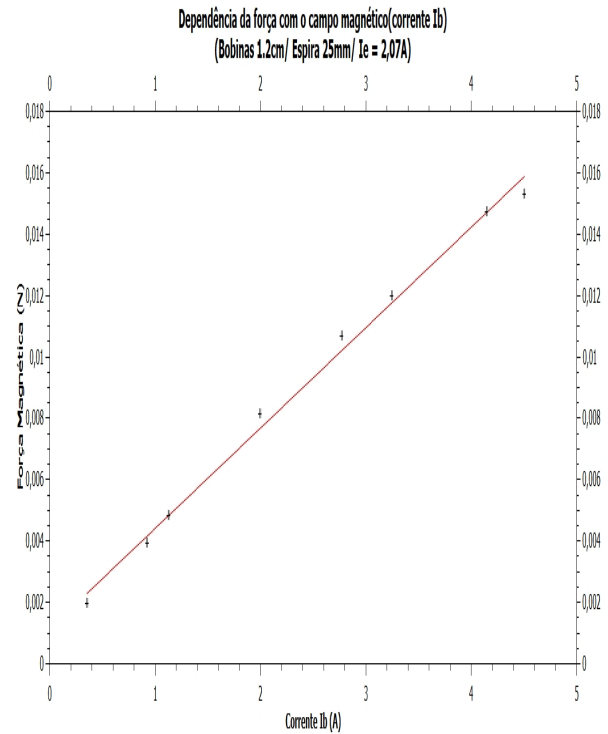


Gráfico 07

O gráfico mostra a dependência da força magnética com a corrente, entre 0 a 5A, das bobinas (separadas à 1.2cm) para uma espira menor, de 25mm de comprimento, e uma corrente fixa de  $i_e \approx 2,07A$

Note novamente a linearidade.

A constante de proporcionalidade agora é:

$$C_5 = 0,00328 + / - 0,00687$$

(21)

Mas considerando, novamente, que a força é proporcional a corrente  $i_e$ , fixada em  $\approx 2,07A$ , temos que  $C_5 = C'_5 * i_e B_b$ , Onde:

$$F_m \approx C_5 i_b \approx C'_5 * i_e B_b \approx 0.02296 i_e B_b$$

(22)

E novamente, vemos que a constante de proporcionalidade final se aproxima do comprimento da espira de 0,025m ou 25mm.



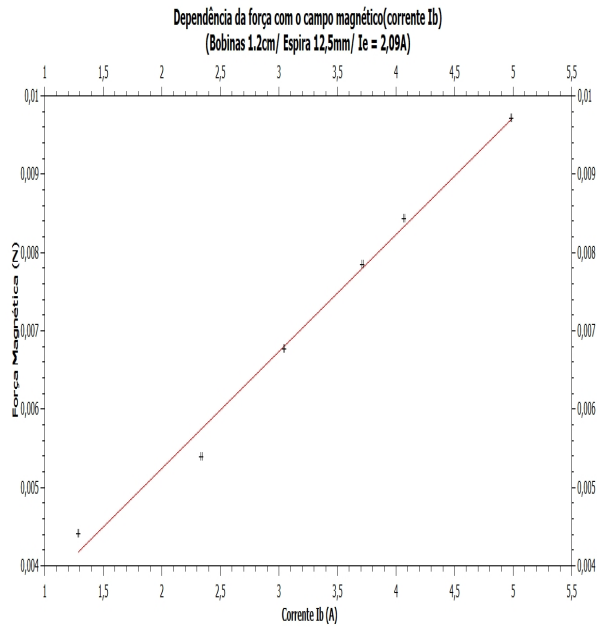


Gráfico 08

A constante de proporcionalidade é:

$$C_6 = 0,00149 + / - 0,00132 \quad (23)$$

Sob os mesmos argumentos usados para as outras espiras podemos escrever  $C_6 = C'_6 * i_e$ , onde fixamos a corrente  $i_e \approx 2,09A$  e as bobinas também separadas a 1,2cm.

Portanto, temos:

$$F_m \approx C_6 i_b \approx C'_6 * i_e B_b \approx 0.01033_e B_b \quad (24)$$

E novamente, vemos que a constante de proporcionalidade final se aproxima do comprimento da espira de 0,0125m ou 12,5mm .

Portanto considerando os parâmetros acima e a constante de proporcionalidade entre  $i_b$  e  $B_b$ :

$$F_m \approx C'_4 * i_e \approx 0.04603 i_e B_b \quad (25)$$

Note que a constante final ( $C'_4$ ) é um valor muito próximo ao comprimento da espira.

Todos esses valores faz nos aproximar da expressão teórica para a força magnética, uma vez que encontramos que:

$$|F_m| \approx i_e L B_b \quad (26)$$

Onde L é o comprimento da espira horizontalmente.

### Dependência da força magnética com a inclinação entre o campo e a corrente $i_e$

Em todas as situações analisadas a corrente e o campo estavam sempre sob a mesma inclinação( $90^\circ$ ).

Com o objetivo de verificar a dependência angular, foi preso à bancada um folha de papel na qual foi desenhada um transferidor, como mostra a figura abaixo:

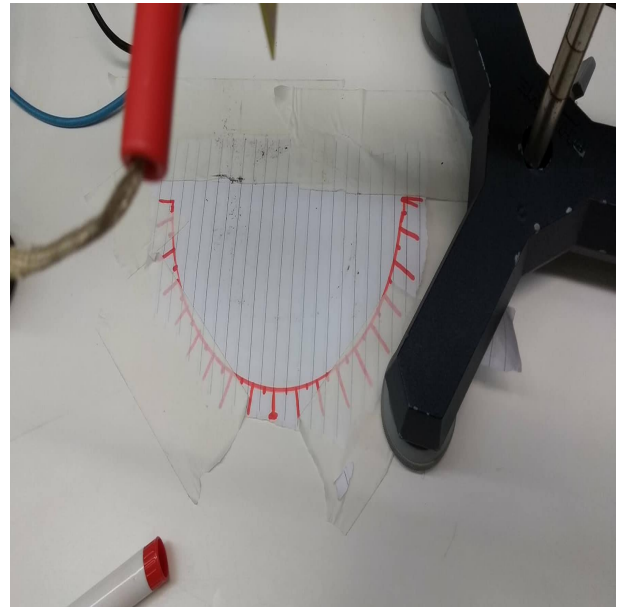


Fig. 04

Assim, ao invés de rotacionar a espira, basta que se rotacione o par das bobinas, e com isso mude a direção do campo magnético. O referencial do transferidor desenhado fixo à bancada serviu de referência para rotacionar em torno do próprio eixo.

Assim, foi deita a correlação entre a força magnética e o seno do ângulo entre o campo magnético e a corrente.

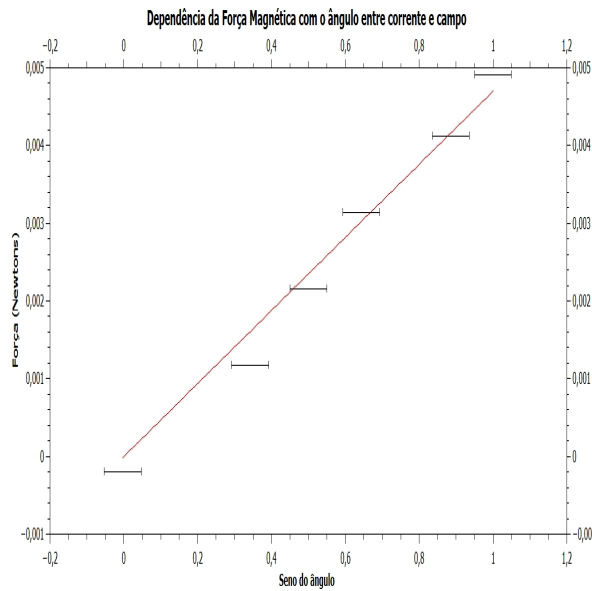


Gráfico 09

Como pode ser observado, o gráfico mostra uma dependência linear.

Para essa parte, utilizamos as correntes fixas de  $i_b = 2,08A$  e  $i_e = 5,07A$

a constante de proporcionalidade é :

$$C_7 \approx 0,0050 + / - 0,0002(N)$$

(28)

Note que essa contante é aproximadamente igual ao valor constante de :

$$i_e L B_b \approx 0.0041$$

(29)

Portanto, encontramos uma expressão final aproximada para a força magnética sobre uma espira de comprimento  $L$ , com corrente constante  $i_e$ , devido ao campo magnético  $B_b$ :

$$F_m = i_e L B_b \sin(\theta)$$

(30)

## CONCLUSÃO

Os resultados mostram que correntes (cargas em movimento) interagem com campos magnéticos, sofrendo uma força magnética que apresenta uma dependência linear com o campo magnético, com a intensidade e o comprimento da própria corrente que passa por uma espira.