



## Departamento de Física

### Campo Magnético no Exterior Condutores Lineares

Ano Letivo: 2025/2026

Semestre: 1º Semestre

Regente da Disciplina: Paulo M.Sá

Responsável das aulas práticas: José Luís Argain

Data: 19/11

Aula Prática: PL1

Número do Grupo: V(5)

Nomes/Número dos alunos participantes:

- Tomás Nunes – 83934
- Diogo Freitas – 90147
- Diogo Carvalho – 90247

## **Introdução:**

Esta atividade experimental insere-se no estudo fundamental do eletromagnetismo, tendo como objetivo a verificação experimental da Lei de Ampère e do Princípio da Superposição para o campo magnético gerado por condutores lineares.

O objetivo desta experiência é, primeiramente, estabelecer uma relação quantitativa entre o Campo Magnético ( $B$ ) e as suas duas variáveis determinantes: a Corrente Elétrica ( $I$ ) e a Distância perpendicular ( $r$ ) ao condutor, conforme ditado pela expressão teórica de  $B$ .

Adicionalmente, e com base no Princípio da Superposição, a experiência visa determinar o perfil do campo magnético total gerado pela interação de dois condutores paralelos, analisando a adição ou subtração vetorial dos campos individuais.

## **Materiais:**

- Fios de ligação;
- Fonte de tensão;
- Multímetro Digital;
- Sonda de Hall;
- Amplificador;
- Pinça Amperimétrica;
- Régua;
- Transformador;
- Barra de Suporte;
- Suporte de Bancada;

## **Procedimento:**

### **1. 1- Determinação de $\beta$ em função de $I$ :**

1 - Montar o circuito conforme a Figura 3 do Protocolo. Anotar o valor do campo residual;

2 - Utilizar o fio condutor com forma de retângulo (3a) mostrado no protocolo;

3 - Faça as medições a meia altura ( $L/2$ ) do retângulo, na aresta vertical mais distante do transformador;

4 - Coloque o sensor, aproximadamente, a  $r = 1$  cm (e do lado de fora do retângulo, para reduzir ao mínimo a influência parasita das outras 3 arestas);

5 - Varie  $I$  entre 10 e 90 A, com acréscimos de 10 A. Meça  $\beta$  para cada valor de  $I$ ;

### **1.2 - Determinação de $\beta$ em função de $r$ :**

1 - Utilize o fio condutor com forma retangular (ver Fig. 3a) do protocolo;

- Faça as medições a meia altura ( $L/2$ ) do retângulo, na aresta vertical mais distante do transformador;

3 – Anote o valor do campo residual;

4 – Fixe o valor da corrente para, aproximadamente, 90 A;

5 – Varie  $r$  de 1 a 4,5 cm, com acréscimos de 0,5 cm (e do lado de fora do retângulo). Para cada  $r$  meça o valor de  $\beta$ ;

### **1.3 - Determinação de $\beta$ resultante da sobreposição dos valores de $\beta$ produzidos por duas $I$ paralelas de sentidos opostos em condutores lineares:**

1 – Use o fio de condutor em forma de retângulo alongado mostrado na figura (3c) do protocolo;

2 – Faça as medições a meia altura ( $L/2$ ) do condutor vertical. Anote o valor do campo residual;

3 – Fixe a corrente em aproximadamente  $I = 90$  A;

4 – Varie  $r$ , em intervalos de 0,5 cm, no espaço entre os dois condutores verticais mais próximos. A seguir, varie  $r$  nas regiões exteriores, esquerda e direita, a estes dois condutores, em intervalos de 0,5 cm, até um máximo de  $r = 4,5$  cm. Para cada  $r$  meça o valor de  $\beta$ ;

## **Apresentação de dados:**

### **Valores das incertezas:**

Instrumentos:	Unidade de Medida:	Incerteza( $\delta$ )
Multímetro	V	$\pm 0,001$ V
Régua	cm	$\pm 0,05$ cm
Pinça Amperimétrica	A	$\pm 0,1$ A

### **1. 1- Determinação de $\beta$ em função de $I$ :**

Dados Iniciais:

Distância inicial( $r$ ):	1 cm
---------------------------	------

Campo Residual inicial:	0.030 V
Permeabilidade do vácuo( $\mu_0$ )	1,26E-06 T/A

Dados do procedimento:

Corrente(I) (A)	Tensão lida(V)
10 A	0,214 V
20 A	0,414 V
30 A	0,610 V
40 A	0,812 V
50 A	1,000 V
60 A	1,203 V
70 A	1,396 V
80 A	1,583 V
90 A	1,762 V

### 1.2 - Determinação de $\beta$ em função de r:

Dados Iniciais:

Corrente(I):	90 A
--------------	------

Dados do procedimento:

Distância(r):	Tensão lida(V):
1 cm	1,626 V
1,5 cm	1,350 V
2 cm	0,860 V
2,5 cm	0,623 V
3,0 cm	0,532 V
3,5 cm	0,435 V
4,0 cm	0,366 V
4,5 cm	0,319 V

### 1.3 - Determinação de $\beta$ resultante da sobreposição dos valores de $\beta$ produzidos por duas I paralelas de sentidos opostos em condutores lineares:

Dados iniciais:

Corrente(I):	90 A
--------------	------

Dados do procedimento:

Direita do fio condutor:

Distância(r):	Tensão lida(V):
1 cm	1,638 V
1,5 cm	0,930 V

2,0 cm	0,715 V
2,5 cm	0,660 V
3,0 cm	0,430 V
3,5 cm	0,373 V
4,0 cm	0,295 V
4,5 cm	0,266 V

Esquerda do fio condutor:

Distância(r):	Tensão lida(V):
1 cm	1,648 V
1,5 cm	1,136 V
2,0 cm	0,786 V
2,5 cm	0,619 V
3,0 cm	0,481 V
3,5 cm	0,405 V
4,0 cm	0,341 V
4,5 cm	0,287 V

Entre fios condutores:

Distância(r):	Tensão lida(V):
1 cm	1,864 V
1,5 cm	1,372 V
2,0 cm	1,202 V
2,5 cm	1,085 V
3,0 cm	1,035 V
3,5 cm	1,012 V
4,0 cm	1,053 V
4,5 cm	1,112 V
5,0 cm	1,241 V
5,5 cm	1,460 V
6,0 cm	1,860 V

## Análise dos Dados

### 1.1- Determinação de $\beta$ em função de I:

Determinar B:

Como pedido no protocolo, deveremos calcular o valor da intensidade do campo magnético para cada valor da corrente obtido no procedimento experimental. Para isso, deveremos converter todas as unidades para unidades SI e utilizar a seguinte fórmula:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I$$

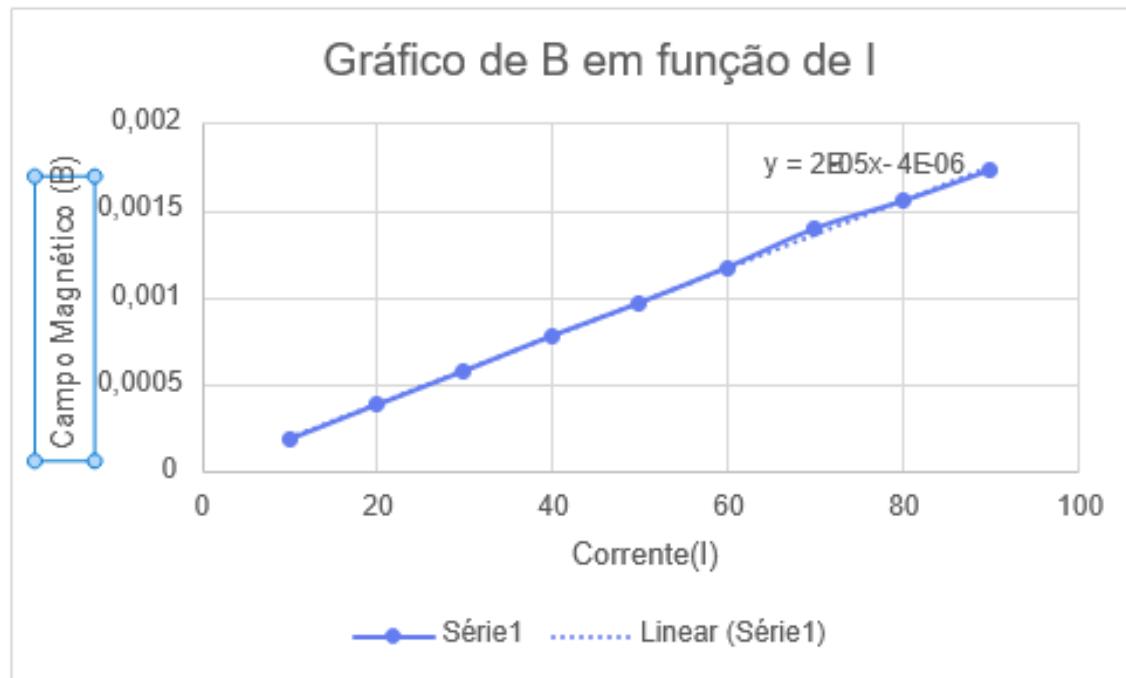
Ao fazermos isto obtemos estes valores:

Corrente(I) (A)	Tensão lida(V)	Campo Magnético ( $\beta$ )
10 A	0,214 V	0,000184 T
20 A	0,414 V	0,000384 T
30 A	0,610 V	0,00058 T
40 A	0,812 V	0,000782 T
50 A	1,000 V	0,00097 T
60 A	1,203 V	0,001173 T
70 A	1,396 V	0,001396 T
80 A	1,583 V	0,001553 T
90 A	1,762 V	0,001732 T

### Desenho do gráfico

Agora que temos o valor da intensidade do campo magnético podemos fazer um gráfico  $\beta$  por I.

O gráfico encontra-se a seguir:



Dados do gráfico:	Valores dos dados:
Declive do gráfico:	$1,95 \times 10^5$
Incerteza do declive:	$2,01 \times 10^{-7}$
Ordenada de Origem:	$-4,17 \times 10^{-6}$
Incerteza da ordenada de origem:	$1,13 \times 10^{-5}$
$R^2$ :	0,99
Erro médio da previsão Y:	$1,56 \times 10^{-5}$
Estatística F:	$9,42 \times 10^3$
Graus de Liberdade para a estatística F:	8,00
Soma quadrados da regressão:	$1,91 \times 10^{-5}$
Soma quadrados das residuais:	$1,70 \times 10^{-9}$

### Determinação do declive teórico

A seguir no protocolo, é pedido que o valor do declive experimental seja comparado com o valor do declive teórico. O declive experimental será o declive do gráfico. Já o declive teórico ainda não foi calculado. Para calcular devemos fazer:

$$a_t = \frac{\mu_0}{2\pi r}$$

Como já sabemos o valor de todas as variáveis necessárias para o cálculo do declive teórico, podemos concluir que o valor do declive teórico é  $2,000 \times 10^{-5} \text{ T}$ .

### Intervalo de Confiança

Agora que temos os valores do declive teórico e o valor do declive experimental, podemos verificar se o valor do declive experimental se encontra no intervalo de confiança. Para isso deveremos delinear o seguinte processo:

$$a_t \in [a - \delta a, a + \delta a].$$

Após os cálculos podemos afirmar que o valor do nosso intervalo é  $[1,930 \times 10^{-5}; 1,970 \times 10^{-5}]$ . Logo podemos afirmar que o declive teórico não se encontra no intervalo de confiança da nossa experiência.

### Erro Relativo Percentual

Agora para determinar o valor do erro relativo percentual do declive determinado na experiência com o declive teórico calculado devemos usar a seguinte fórmula:

$$\text{Erro Relativo}(\%) = \left| \frac{a - a_t}{a_t} \right| \times 100\%$$

Após a realização dos cálculos podemos concluir que o valor do erro relativo percentual é 2,50%

### Determinação de $\beta$ em função de $r$

#### Determinar $B$ e inverso de $r$ :

Como pedido no protocolo, deveremos calcular o valor da intensidade do campo magnético e calcular o inverso da distância obtida no procedimento experimental. Para isso, deveremos converter todas as unidades para unidades SI e utilizar as seguintes fórmulas:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I$$

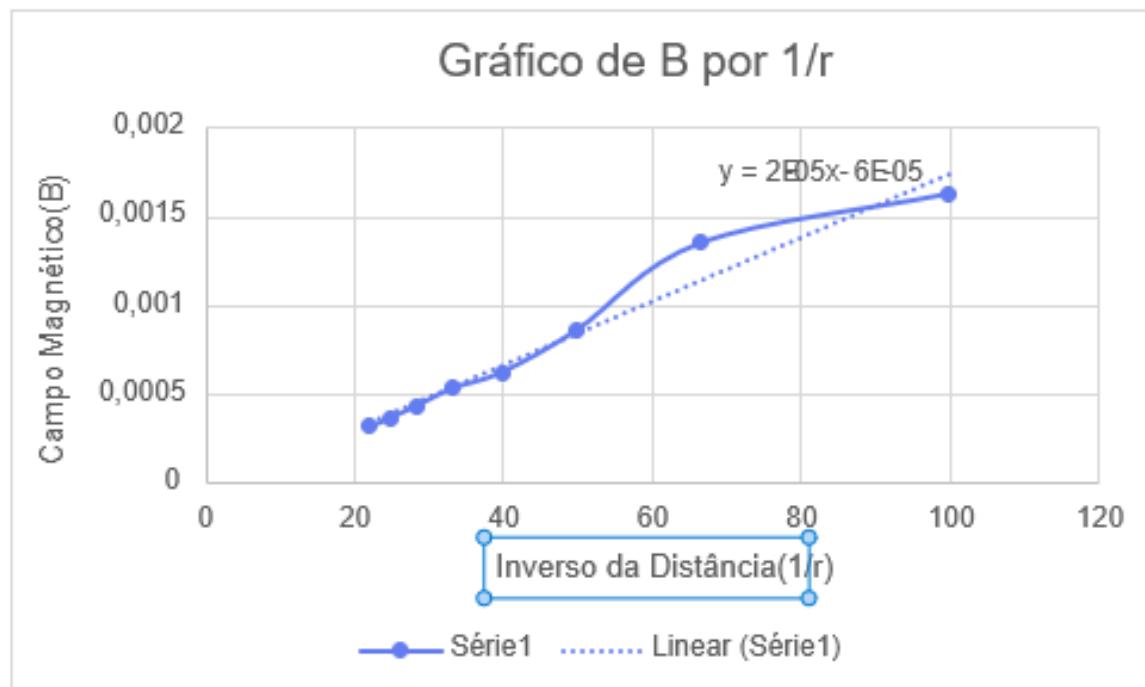
Ao fazermos isto obtemos estes valores:

Distância(r):	Inverso da Distância(r) em metros	Tensão lida(V):	Intensidade do Campo Magnético
1 cm	100 m	1,626 V	$1,63 \cdot 10^{-3}$
1,5 cm	66,7 m	1,350 V	$1,35 \cdot 10^{-3}$
2 cm	50 m	0,860 V	$8,60 \cdot 10^{-4}$
2,5 cm	40 m	0,623 V	$6,23 \cdot 10^{-4}$
3,0 cm	33,3 m	0,532 V	$5,32 \cdot 10^{-4}$
3,5 cm	28,6 m	0,435 V	$4,35 \cdot 10^{-4}$
4,0 cm	25 m	0,366 V	$3,66 \cdot 10^{-4}$
4,5 cm	22,2 m	0,319 V	$3,19 \cdot 10^{-4}$

### Desenho do gráfico

Agora que temos o valor da intensidade do campo magnético e o inverso das distâncias poderemos fazer um gráfico  $B$  por  $1/r$ .

O gráfico encontra-se a seguir:



Dados do gráfico:	Valores dos dados:
Declive do gráfico:	$1,80 \cdot 10^5$
Incerteza do declive:	$5,85 \cdot 10^{-5}$
Ordenada de Origem:	$1,44 \cdot 10^{-6}$
Incerteza da ordenada de origem:	$7,47 \cdot 10^{-5}$
$R^2$ :	0,963

Erro médio da previsão Y:	$1,00 \times 10^{-4}$
Estatística F:	$1,57 \times 10^2$
Graus de Liberdade para a estatística F:	6,00
Soma quadrados da regressão:	$1,57 \times 10^{-6}$
Soma quadrados das residuais:	$6,03 \times 10^{-8}$

### Determinação do declive teórico:

A seguir no protocolo, é pedido que o valor do declive experimental seja comparado com o valor do declive teórico. O declive experimental será o declive do gráfico. Já o declive teórico ainda não foi calculado. Para calcular devemos fazer:

$$a_t = \frac{\mu_0 I}{2\pi}$$

Como já sabemos o valor de todas as variáveis necessárias para o cálculo do declive teórico, podemos concluir que o valor do declive teórico é  $1,80 \times 10^{-5} \text{ T}$ .

### Intervalo de Confiança

Agora que temos os valores do declive teórico e o valor do declive experimental, podemos verificar se o valor do declive experimental se encontra no intervalo de confiança.

Para isso deveremos delinear o seguinte processo:

$$a_t \in [a - \delta a, a + \delta a].$$

Após os cálculos podemos afirmar que o valor do nosso intervalo é  $[1,66 \times 10^{-5}; 1,94 \times 10^{-5}]$ . Logo podemos afirmar que o declive teórico encontra-se no intervalo de confiança da nossa experiência.

### Erro Relativo Percentual

Agora para determinar o valor do erro relativo percentual do declive determinado na experiência com o declive teórico calculado devemos usar a seguinte fórmula:

$$\text{Erro Relativo}(\%) = \left| \frac{a - a_t}{a_t} \right| \times 100\%$$

Após a realização dos cálculos podemos concluir que o valor do erro relativo percentual é 0.0817%

## Determinação de $\beta$ resultante da sobreposição dos valores de $\beta$ produzidos por duas I paralelas de sentidos opostos em condutores lineares:

Determinar B :

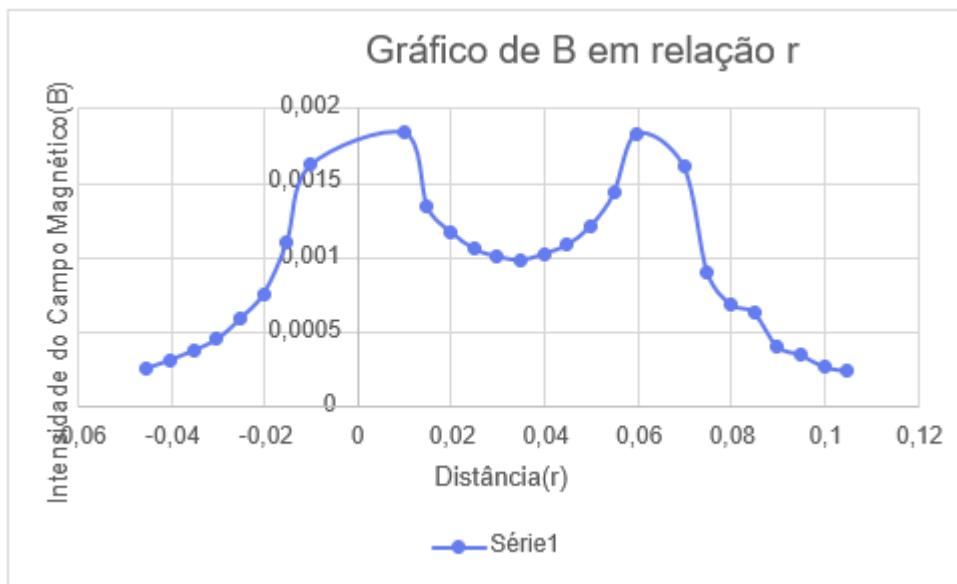
Como pedido no protocolo, deveremos calcular o valor da intensidade do campo magnético obtida no procedimento experimental. Para isso, deveremos converter todas as unidades para unidades SI e utilizar as seguintes fórmulas:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I$$

### Desenho do gráfico

Agora que temos o valor da intensidade do campo magnético e os valores das distâncias foram convertidos para metros poderemos fazer um gráfico  $\beta$  por  $r$ .

O gráfico encontra-se a seguir:



### Discussão:

#### Determinação de $\beta$ em função de I

O objetivo desta secção foi verificar se o Campo Magnético (B) varia de forma diretamente proporcional à Corrente Elétrica (I), o que é a base da Lei de Ampère. Esta relação é quantificada pelo declive (a) da linha reta ajustada aos dados do gráfico B por I.

O valor experimental obtido para o declive é  $1,95 \times 10^{-5}$  T/A. O valor teórico esperado, calculado para as condições ideais, é  $a_t = 2,00 \times 10^{-5}$  T/A. A precisão do resultado é muito alta, apresentando um erro relativo de apenas 2.50%.

Apesar do erro ser muito baixo, o valor teórico  $a_t$  não se encontra no Intervalo de Confiança do resultado experimental. Esta pequena discrepância deve-se a erros feitos na execução do procedimento.

O principal fator que impede uma concordância perfeita é a limitação do modelo teórico. A fórmula utilizada assume um condutor infinitamente longo, enquanto na experiência é utilizado um fio de comprimento finito. O campo magnético gerado por um fio finito é sempre ligeiramente menor do que o campo de um fio infinito, o que faz com que o nosso declive experimental a seja consistentemente um pouco menor que o valor teórico  $a_t$ .

O facto de o erro ser de apenas 2.50% confirma que o princípio da proporcionalidade direta entre  $B$  e  $I$  é válido e a experiência foi realizada com grande precisão. A principal conclusão é que a experiência confirma a Lei de Ampère, sendo a pequena diferença uma consequência da inevitável diferença entre o modelo ideal e a realidade experimental.

### **Determinação de $\beta$ em função de $r$**

O objetivo desta secção foi verificar se o Campo Magnético ( $B$ ) varia de forma inversamente proporcional à Distância ( $r$ ) ao condutor, o que é a segunda base da Lei de Ampère. Esta relação é quantificada pelo declive ( $a$ ) da linha reta ajustada aos dados do gráfico  $B$  por  $1/r$ .

O valor experimental obtido para o declive é  $a = 1,80 \times 10^{-5}$  T/m. O valor teórico esperado, calculado para as condições ideais, é  $a_t = 1,80 \times 10^{-5}$  T/m. A precisão do resultado é excepcionalmente alta, apresentando um erro relativo de apenas 0.0817%.

O valor teórico  $a_t = 1,80 \times 10^{-5}$  T/m) encontra-se no Intervalo de Confiança do resultado experimental [ $1,66 \times 10^{-5}$ ;  $1,94 \times 10^{-5}$ ] T/m). Este facto, combinado com o erro percentual baixo, confirma que o resultado é estatisticamente exato e que quaisquer discrepâncias observadas são devidas a erros aleatórios e de modelo, mas são menores do que a incerteza experimental.

O principal fator que impede uma concordância perfeita é a limitação do modelo teórico, que assume um condutor de comprimento infinito, e a inerente dificuldade em medir a distância ( $r$ ) de forma precisa.

O facto de o erro ser de apenas 0.0817% confirma que o princípio da proporcionalidade inversa entre  $B$  e  $r$  é robusto e a experiência foi realizada com excelente precisão. A principal conclusão é que a experiência confirma a Lei de Ampère em relação à distância, com um resultado que é, para todos os efeitos práticos, idêntico ao valor teórico esperado.

### **Determinação de $\beta$ resultante da sobreposição dos valores de $\beta$ produzidos por duas I paralelas de sentidos opostos em condutores lineares:**

O objetivo desta secção foi verificar o Princípio da Superposição e a previsão teórica de que, quando dois condutores paralelos são percorridos por correntes de sentidos opostos, os

campos magnéticos resultantes somam-se na região entre os fios. Esta análise é feita pela verificação da forma do gráfico da Intensidade do Campo Magnético  $B$  em função da Posição  $r$ .

O gráfico obtido corresponde ao esperado (Figura 2b do protocolo), apresentando dois picos nas proximidades dos condutores e um valor mínimo, mas não nulo, no centro da região entre eles.

A forma do gráfico obtido confirma o Princípio da Superposição. O facto de o campo não se anular na região central demonstra que os vetores do campo magnético, estão no mesmo sentido (conforme previsto para correntes opostas), resultando na sua soma vetorial. Se os campos se subtraíssem (como aconteceria se as correntes fossem no mesmo sentido), o campo anular-se-ia no centro.

A concordância é excelente e visualmente validada pelo perfil do gráfico. A pequena flutuação no gráfico e o facto de o campo exterior não decair perfeitamente até zero deve-se a erros aleatórios e à influência do campo residual e da geometria finita do condutor.

O facto de a forma do gráfico obtido ser uma confirmação clara da previsão teórica valida que o Princípio da Superposição de Campos Magnéticos é uma ferramenta válida para determinar o campo resultante da interação de múltiplas fontes. A principal conclusão é que a experiência confirma a Lei de Ampère e o seu princípio de sobreposição para correntes em sentidos opostos.