

**Instituto Politécnico do Porto**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Curso de Engenharia

**Campo Magnético e  
Propriedades Magnéticas da Matéria**

Trabalho Laboratorial

Setembro de 2022

Baseado no original de José Puga, Judite Ferreira, 1999

---

## Aviso de Segurança

- Não manter o contacto com os terminais do solenóide no instante em que é desligada a alimentação.

## Objectivos

- Detectar a polaridade magnética de imanes permanentes e de solenoides.
- Realizar a medição directa da densidade de fluxo magnético.
- Relacionar o campo magnético gerado pelo íman permanente com o do solenóide.
- Identificar e classificar diferentes materiais quanto à sua permeabilidade magnética.
- Observação da curva de histerese de um material ferromagnético.

## Introdução

### Pólos e Dipolos Magnéticos

A lei de Gauss, quando aplicada ao campo magnético, mostra que não existe um equivalente magnético da carga eléctrica livre. As fontes mais simples de campos magnéticos são os dipolos magnéticos associados aos movimentos orbitais de electrões nos átomos ou aos spins intrínsecos dos electrões e protões. Os momentos de dipolo magnético resultantes do movimento do elétron são medidos em termos do magneton de Bohr ( $\mu_B$ ).

O magnetão é uma constante fundamental que representa o momento magnético intrínseco de um electrão. Esta constante é dada por:

|  |   |
|--|---|
| $1\mu_B = \frac{eh}{4m\pi} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$ | <div style="display: inline-block; vertical-align: top; padding-right: 5px;"> </div> <div><p>e - carga do electrão <math>-1,60 \times 10^{-19} \text{ C}</math></p><p>h - constante de Planck <math>6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}</math></p><p>m - massa do electrão <math>9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}</math></p><p>J – Joule, T– Tesla</p></div> |
| (Equ. 1)   | onde:   |

O momento de dipolo associado ao spin intrínseco do electrão é quase exactamente igual  $-1\mu_B$ , o sinal negativo indica que o vector momento de dipolo magnético e o vector momento angular do spin têm sentidos opostos. O momento de dipolo magnético associado ao movimento orbital do electrão é múltiplo do magnetão de Bohr sendo dado por:

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| $\mu_{orb} = -\frac{e}{2m} L_{orb}$ | <div style="display: inline-block; vertical-align: top; padding-right: 5px;"> </div> <div><p><math>\mu_{orb}</math> - momento magnético orbital em J/T</p><p><math>L_{orb}</math> - momento angular orbital em <math>\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}</math></p><p>m - massa do electrão</p><p>e - carga do electrão</p></div> |
| (Equ. 2)                            | onde:   |

---

## Permeabilidade Magnética

A permeabilidade ou condutibilidade magnética de uma substância traduz a maior ou menor facilidade com que ela se deixa atravessar pelas linhas de força. Por exemplo, é de esperar que duas massas polares do mesmo nome que se encontrem no vazio sofram uma força mútua de repulsão diferente daquela que é observada se o meio for outro qualquer.

A permeabilidade magnética ( $\mu$ ) caracteriza numericamente cada substância no respeitante às condições de estabelecimento do campo magnético no seu próprio seio. As substâncias são classificadas de acordo com a sua permeabilidade magnética relativa num dos seguintes grupos:

**Ferromagnéticas** - têm  $\mu_r$  muito maior do que à unidade

**Paramagnéticas** - têm  $\mu_r$  ligeiramente superior à unidade

**Amagnéticas** - têm  $\mu_r$  muito próximo da unidade (tal como o vazio)

**Diamagnéticas** - têm  $\mu_r$  ligeiramente inferior à unidade

### Ferromagnetismo

Nos materiais ferromagnéticos (figura 1), tal como o ferro apesar da tendência para a orientação caótica em virtude da agitação térmica, ocorre uma interação quântica entre átomos vizinhos que bloqueia os dipolos atômicos num rígido paralelismo. Esta interação desaparece bruscamente acima duma temperatura bem definida denominada temperatura de Curie. Acima desta temperatura o material torna-se paramagnético. Como exemplos de materiais ferromagnéticos destacam-se o Ferro, o Níquel e o Cobalto.

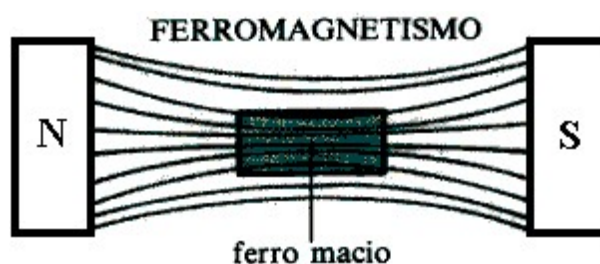


Fig. 1 Linhas de força de um campo deformado devido ao material ferromagnético ( $\mu_r \gg 1$ ).

### Paramagnetismo

Os materiais paramagnéticos (figura 2) são pouco atraídos por um pólo magnético e têm momentos de dipolo magnético intrínsecos que tendem a se alinhar com o campo magnético externo, intensificando assim o campo magnético. Esta tendência é prejudicada pela agitação térmica. A magnetização  $M$  de uma amostra é dada

aproximadamente pela lei de Curie como sendo o momento magnético por unidade de volume, tal como apresentado na seguinte expressão:

|                     |   |
|---------------------|---|
| $M = C \frac{B}{T}$ | <div style="border-left: 1px solid black; padding-left: 10px; margin-left: 10px;"> M - magnetização, [A] = A/m<br/> C - constante de Curie<br/> B - indução magnética, [B] = T (tesla)<br/> T - temperatura, [T] = K° (kelvin) </div> |
| (Equ. 3)            | onde:   |

Em 1895 Pierre Curie descobriu experimentalmente que a magnetização  $\vec{M}$  de uma amostra paramagnética é diretamente proporcional a  $\vec{B}$ , o campo magnético efectivo no qual a amostra está imersa é inversamente proporcional à temperatura.

Para campos suficientemente fortes ou temperaturas suficientemente baixas esta lei deixa de ser válida. Quando os dipolos atómicos se aproximam do alinhamento completo produzem magnetização máxima dada por:

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| $M_{\text{máx}} = \mu \frac{N}{V}$ | <div style="border-left: 1px solid black; padding-left: 10px; margin-left: 10px;"> M<sub>máx</sub> - magnetização máxima, [M<sub>máx</sub>] = A/m<br/> N - número de átomos,<br/> V - volume, [V] = m<sup>3</sup><br/> μ - momento de dipolo magnético de cada átomo, [μ] = J/T </div> |
| (Equ. 4)                           | onde:  |

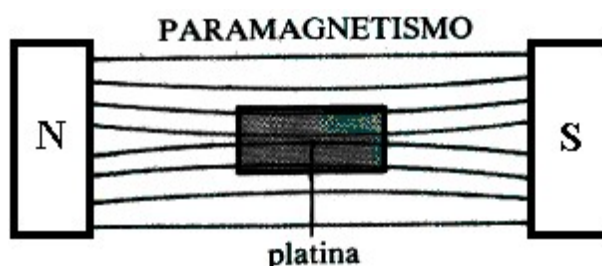


Fig. 2 Deformação das linhas de força de um campo magnético uniforme devida à presença de um material paramagnético ( $\mu_r > 1$ ).

Outros exemplos de materiais paramagnéticos são: a Platina; o Alumínio; o Sódio e o Potássio. As ligas metálicas contendo Vanádio e Manganês também apresentam características paramagnéticas. Os gases oxigénio e o ozono são paramagnéticos.

## Amagnetismo

A muito fraca permeabilidade magnética caracteriza os materiais amagnéticos (figura 3). Podemos referir em particular alguns materiais como: o bronze; alguns tipos de madeiras e alguns plásticos como sendo amagnéticos. Estes materiais têm um

---

comportamento análogo ao do vazio. São muito importantes em electrotecnia servindo para o fabrico de peças que não devem alterar os campos magnéticos nas suas fronteiras e que não devem ser influenciadas por eles.



Fig. 3 Linhas de força de um campo magnético atravessando um material a-magnético. O campo não mostra deformação ( $\mu_r=1$ ).

Estes materiais são aplicados em suportes de núcleos de transformadores e em ferramentas de ajunte de bobinas de alta-frequência.

### Diamagnetismo

Os materiais diamagnéticos (figura 4) são francamente repelidos pelo pólo de um íman forte. Os átomos desses materiais não têm momentos de dipolo magnético intrínsecos. No entanto, um momento de dipolo pode ser induzido num corpo diamagnético utilizando um campo magnético externo para esse efeito. O dipolo magnético induzido nestes materiais é de sentido oposto ao do campo indutor.



Fig 4 Desvio das linhas de força de um campo magnético na presença de um corpo diamagnético ( $\mu_r<1$ ).

Como exemplos de materiais metálicos diamagnéticos destacam-se o Bismuto, o Ouro, a Prata e o Cobre. Os gases raros Xénon, Criptón e Árgon também se comportam como diamagnéticos. Por fim, o vidro e a água são compostos também diamagnéticos.

---

## Magnetização e Histerese

A figura 5 mostra como um campo magnético externo conhecido  $H_0$  pode ser aplicado a uma amostra ferromagnética em forma de anel. A indução magnética  $B$  interna resultante pode ser medida por um método de indução. Desta forma, é obtida uma curva de magnetização e desmagnetização como a apresentada na figura 6.



Fig. 5 Campo magnético externo ( $H_0$ ) aplicado a uma amostra ferromagnética em forma de anel.

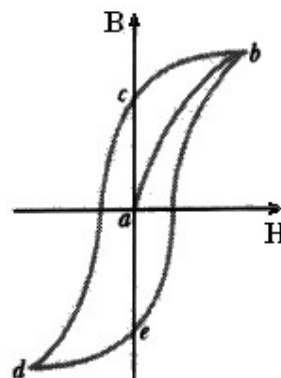


Fig. 6 Curva de magnetização de um material ferromagnético com efeito de histerese e de saturação.

A curva de magnetização e de desmagnetização de uma amostra ferromagnética não se sobrepõem. Em vez disso, estas curvas exibem um fenómeno chamado histerese. Alguns dipolos magnéticos permanecem alinhados mesmo quando o campo magnético externo é completamente removido. O resultado deste fenómeno é o familiar íman permanente.

O campo magnético ( $H$ ) no núcleo do solenóide é proporcional à corrente que o percorre. Como resultado de  $H$  surgirá uma densidade de fluxo magnético ( $B$ ) no núcleo do solenóide. No caso de funcionamento linear, o que é o caso do vácuo,  $B$  e  $H$  são proporcionais ( $B = \mu_0 \mu_r H$ ). No entanto, na presença de efeitos de histerese e/ou de saturação,  $B$  não é proporcional a  $H$ .

## Trabalho Prático

Este trabalho prático tem como principal finalidade permitir observar vários fenómenos relacionados com as características magnéticas de vários materiais.

---

## Equipamento a Utilizar:

- íman permanente;
- solenóide de 2000 espiras com núcleo de ferro de 10 cm e de 20 cm;
- pequena placa de cobre, alumínio, ferro e de madeira;
- fonte de alimentação;
- medidor de densidade de fluxo magnético (MDF) e
- resistência de  $10\ \Omega\ 1/4W$
- bússola
- gerador de sinal

## Experiências

### 1) Determinação das polaridades magnéticas das faces de um íman

Determine quais as faces do íman permanente para as quais o campo magnético é mais intenso. Identifique-as quanto à sua polaridade magnética, das seguintes formas:

- utilizando uma bússola e
- utilizando o aparelho MDF.

### 2) Determinação das polaridades magnéticas das extremidades de um solenóide

Alimente o solenóide com uma corrente de 1 A. Determine a polaridade magnética dos extremos do solenóide das seguintes formas:

- utilizando uma bússola e
- utilizando o aparelho MDF.

Inverta a polaridade da alimentação do solenóide e repita a experiência.

### 3) Ação de diferentes permeabilidades magnéticas sobre as linhas de campo

Alimente o solenóide de 2000 espiras com núcleo de ferro de 10 cm com uma corrente de 1 A. Obtenha a medida da densidade de fluxo magnético a 2 cm de uma das extremidades do solenóide segundo a axial. Registe a leitura obtida na tabela seguinte na linha referente ao ar. Repita esta experiência, colocando entre a sonda do MDF e o solenóide cada uma das placas de diferentes materiais de que dispõem. Faça as respectivas leituras e registe a densidade de fluxo magnético para cada uma destas condições. Tenha em consideração que entre materiais não ferro-magnéticos a permeabilidade é pouco diferente quando comparada com os materiais ferro-magnéticos.

| Material   | B (mT) | Classificação Magnética |
|------------|--------|-------------------------|
| Vazio (ar) |        |                         |
| Ferro      |        |                         |
| Cobre      |        |                         |
| Alumínio   |        |                         |
| Madeira    |        |                         |

#### 4) Visualização do ciclo de histerese dum núcleo ferromagnético

Realize esta experiência utilizando o solenóide de 2000 espiras com núcleo de ferro de 20 cm. Faça as ligações indicadas no circuito apresentado na figura 7 estabelecendo um único ponto de massa.

Proceda da seguinte forma:

- ligue o gerador de sinal à serie formada pelo solenóide e pela resistência de  $10\ \Omega$ ;
- ligue o canal 1 do osciloscópio aos terminais da resistência de  $10\ \Omega$  e o canal 2 à saída do aparelho MDF;
- coloque a sonda em medição axial e posicione-a junto a uma das extremidades do solenóide;
- coloque o gerador de sinal em forma de onda sinusoidal com a amplitude no máximo e a frequência em  $0.5\ \text{Hz}$ ;
- configure o osciloscópio para modo XY com persistência de um segundo ou superior.

Desta forma, os sinais aplicados aos canais 1 (X - horizontal) e 2 (Y - vertical) são proporcionais a H e B, respectivamente. No gráfico presente na figura 8 os sinais proporcionais a H e B são representados por  $\alpha H$  e  $\gamma B$ , respectivamente. Esboce a curva de histerese observada no gráfico  $\alpha H$ - $\gamma B$  presente na figura 8.

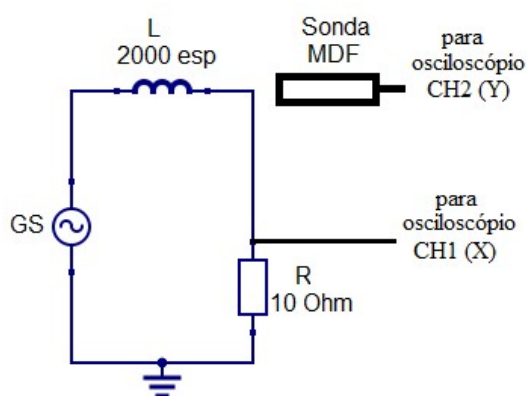


Fig. 7 - Circuito para observação de histerese

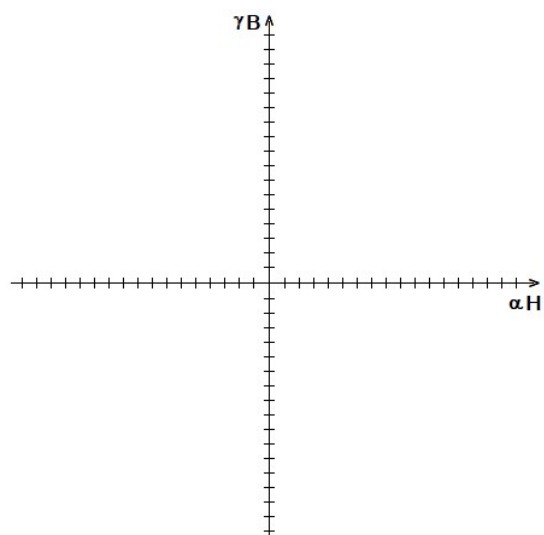


Fig. 8 - Curva  $\alpha H$ - $\gamma B$ , núcleo de ferro