

## Medida da histerese de materiais ferromagnéticos

### TRABALHO PRÁTICO

## 1 Objectivo

Pretende-se observar o ciclo de histerese de um material ferromagnético, constituído por uma liga dura de aço (Fe-Cr-V). A medida do campo magnético,  $B$ , é feita com um sensor de efeito de Hall. Mede-se o campo  $H$  no interior de um solenóide, para vários valores da corrente eléctrica e estabelece-se a relação  $H(i)$  do solenóide. A observação da curva de histerese de uma amostra ferromagnética faz-se medindo o campo  $B$  à superfície da amostra, para diferentes valores de corrente.

## 2 Material

Um solenóide com um enrolamento de cerca de  $N \sim 1500$  voltas, raio  $R \sim 1.5$  cm e  $L \sim 6$  cm de comprimento (cada solenóide tem os seus próprios números), uma fonte de corrente DC que dê até 1.5 A e 30 Watt de potência de saída, um sensor de efeito de Hall, ref. SS490, uma bateria de 5 V (ou, em alternativa, uma bateria de 9 V, uma resistência de 10 k $\Omega$  e um potenciómetro de 1 k $\Omega$ , para construir um divisor de tensão), um voltímetro digital, um amperímetro digital, uma ponta de aço de Cr-V (a ponta da chave de parafusos), uma ventoinha, fita cola e cerca de 10 fios com ligações tipo crocodilo.

## 3 A histerese de um material ferromagnético

A magnetização de um material ferromagnético não varia linearmente com o campo magnético e nem sequer é unívoca a relação entre um campo e o outro. Com efeito, a magnetização tem inscrita a história magnética recente desse material.

A representação gráfica da magnetização de um ferromagnete,  $M$  em função do campo magnético,  $H$ , aplicado externamente, dá uma curva de histerese característica do material em causa. Obtém-se uma curva semelhante no plano  $B$  versus  $H$ , pois  $B = \mu_0(H + M)$  e geralmente  $M \gg H$ .

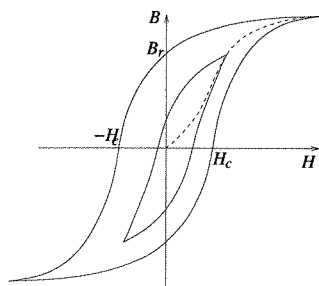


Figura 1: Curvas de histerese típicas de um ferromagnete. Estão indicados os campos remanescente,  $B_r$ , e coercivo,  $H_c$ . A curva a tracejado é a curva de primeira magnetização.

Se um material ferromagnético nunca tiver sido magnetizado, ou se tiver magnetização remanescente nula, então, ao ser-lhe aplicado um campo magnético externo, a sua magnetização segue a curva a tracejado da fig. 1, conhecida como curva de primeira magnetização. Por efeito do campo externo, aumentam os domínios magnéticos com dipolos orientados na direcção e sentido do campo aplicado, a expensas de outros domínios. A partir de certo ponto é tão grande o alinhamento dipolar que a magnetização começa a saturar.

Se o campo aplicado,  $H$ , for suficientemente elevado a migração dos domínios magnéticos do material é irreversível e o material retém uma certa magnetização depois de ser desligado o campo externo. Essa magnetização remanescente depende das características do material e da amplitude do campo externo, de acordo com a curva de histerese que estiver em causa (ver fig. 1).

A magnetização só voltará a ser nula se um campo de sentido contrário for aplicado, que force a deslocação das fronteiras dos domínios magnéticos, ao ponto de anular  $M$ . Porém, dificilmente este campo inverso tem a amplitude certa, pelo que, na prática, o processo de desmagnetização tem que ser feito por aproximações sucessivas, percorrendo ciclos de histerese sucessivamente menores (ver fig. 1).

A área da curva de histerese no plano  $(H, B)$  é igual à energia que é dissipada por atrito em cada ciclo, devido à migração das fronteiras dos domínios magnéticos que acompanha as variações do campo  $H$  aplicado. A área depende muito do material em causa - materiais magnéticos duros têm áreas muito maiores que os materiais macios (ver fig. 2). Por exemplo, o ferro macio apresenta uma área muito menor que as ligas de aço que são magnéticas. Essas ligas duras de aço têm na sua composição heterogénea vários elementos estranhos à rede cristalina do Fe (e.g., C, Cr, Mg, Co, Si, V, ...) e isso restringe a mobilidade das fronteiras entre domínios magnéticos, porque ficam *presas* nos defeitos da estrutura cristalina introduzidos por esses elementos estranhos à matriz de

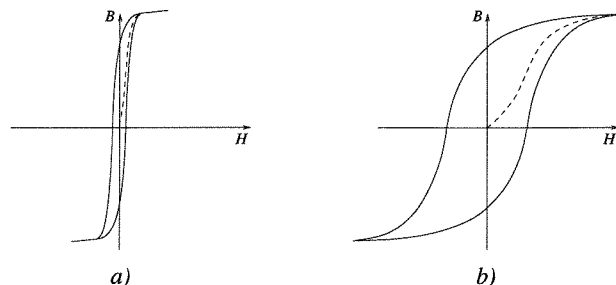


Figura 2: Curva de histerese típica do ferro macio e de um aço duro ferromagnético. A coercividade,  $H_c$ , e área de histerese são bastante superiores no caso da liga de aço.

Fe. Tendem pois a ter elevada coercividade e a requerer campos de magnetização/desmagnetização mais intensos do que os requeridos pela substância pura (ver fig. 2).

Os materiais magnéticos macios são pois mais convenientes para fabricar os núcleos dos transformadores; enquanto que os materiais magnéticos duros dão bons ímãs permanentes, porque não desmagnetizam tão facilmente.

### 3.0.1 o campo magnético

O campo magnético nos pontos do eixo de um solenóide cilíndrico de comprimento  $L$ , com  $N$  espiras percorridas por uma corrente  $i$ , colocado no vazio, calcula-se facilmente por integração do campo de  $N$  espiras circulares justapostas. Obtém-se assim

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i N}{2L} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \hat{z} \quad (1)$$

onde  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são os ângulos da fig. 3 e  $\hat{z}$  é a direcção/sentido axial. Esta equação diz-nos que se o solenóide for longo (tal que  $L \gg R$ ), na extremidade do solenóide, sobre o eixo, o campo é

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i N}{2L} \hat{z} \quad (2)$$

e que no centro do solenóide  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i N}{L} \hat{z}$  (solenóide infinito).

Tomando em conta as dimensões do solenóide, raio  $R$  e comprimento  $L$ , a eq. 1 dá

$$H = \frac{iN}{2} \frac{1}{\sqrt{R^2 + L^2}} \quad (3)$$

no ponto do eixo à saída do solenóide. Tendo o solenóide mais do que uma camada de espiras,  $R$  deve ser o raio médio das espiras que o compõem.

A primeira parte deste trabalho consiste em medir  $H = \frac{B}{\mu_0}$  para vários valores de corrente e obter a relação entre  $i$  e  $H(i)$ , na extremidade do solenóide, no eixo axial. O campo gerado pelas correntes não será exactamente o campo acima calculado, mas deve ser próximo desse valor.

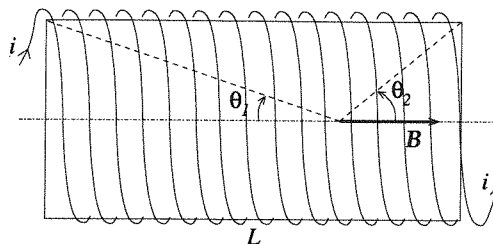


Figura 3: O solenoide cilíndrico.

### 3.0.2 a magnetização

Se um material ferromagnético desmagnetizado for colocado no eixo do solenoide, no qual passa uma corrente  $i$ , esse material vai ser magnetizado, ficando com uma magnetização,  $\mathbf{M}$ . Para simplificar vamos supor que a amostra ferromagnética é cilíndrica, que é pequena em comparação com o solenoide e que é coaxial com ele, que é homogênea e que é isotrópica. Nesse caso, a magnetização é na direcção longitudinal, e podemos assumir que é aproximadamente constante, pois  $\mathbf{H}$  varia lentamente com  $z$  (ver fig. 4). Dentro do material os campos estão ligados pela equação  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$  e põe-se a questão de saber como os relacionar.

A magnetização é somente devida às correntes de magnetização, através das equações  $\nabla \times \mathbf{M} = \mathbf{j}_m$  e  $\text{rot}_S \mathbf{M} = \mathbf{k}_m$ , visto não haver quaisquer correntes livres no material magnético. Sendo  $\mathbf{M}$  uniforme, então  $\mathbf{j}_m = 0$ ; na parede lateral do magnete tem-se  $\text{rot}_S \mathbf{M}|_R = \mathbf{k}_m = M\hat{\varphi}$ . Ou seja, a magnetização é devida inteiramente à corrente azimutal,  $\mathbf{k}_m = M\hat{\varphi}$ .

O campo  $\mathbf{B}$ , é criado por todas as correntes, sendo  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{j}_\ell + \mathbf{j}_m)$ . Neste trabalho o ferromagnete é colocado no eixo axial, à saída do solenoide (ver fig. 4). Por conseguinte, atendendo à eq. 2, nesse ponto o campo  $\mathbf{B}$  é

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{M}}{2} + \frac{\mu_0 i N}{2L} \hat{z} \quad (4)$$

Isto é,  $\mathbf{B}$  é a soma dos campos criados pelas correntes de magnetização do ferromagnete,  $\mathbf{k}_m = M\hat{\varphi}$ , e pelas correntes livres do solenoide,  $\mathbf{k}_\ell = \frac{iN}{L}\hat{\varphi}$ .

No interior do material, mas junto da extremidade do ferromagnete, o campo  $\mathbf{H}$  é então

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} = -\frac{\mathbf{M}}{2} + \frac{iN}{2L} \hat{z} \quad (5)$$

Assumindo valores típicos para a magnetização de saturação conclui-se que a primeira parcela domina a expressão anterior<sup>1</sup> e que, portanto,  $\mathbf{H} \sim -\frac{\mathbf{M}}{2}$ . Isto

<sup>1</sup>Com efeito, para  $L \sim 10$  cm,  $N \sim 2000$  e  $i \sim 1$  A, tem-se  $\frac{iN}{L} \sim 2 \times 10^4$  A/m; mas a magnetização de saturação é tipicamente da ordem de 1 MA/m.

é, no interior do material, na zona do topo, quando é atingida a magnetização de saturação, os campos  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{M}$  são aproximadamente antiparalelos (ver fig. 4).<sup>2</sup>

O cálculo dos campos em pontos fora do eixo axial é complicado. As linhas de campo de  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$  estão esquematizadas na fig. 4. As linhas de  $\mathbf{B}$  são sempre fechadas, porque  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  em todos os pontos; as linhas de  $\mathbf{M}$  estão confinadas ao material e são de um campo uniforme; as linhas de  $\mathbf{H}$  mostram um campo que acompanha as linhas de  $\mathbf{B}$  no exterior do material, mas que é quase oposto a  $\mathbf{B}$  no interior. Nas superfícies de topo vê-se claramente que  $\text{div}_S \mathbf{H} \neq 0$ , pois as linhas deste campo,  $\mathbf{H}$ , não são fechadas(!).

O campo magnético  $\mathbf{B}$  satisfaz as condições fronteira,

$$\begin{cases} \text{div}_S \mathbf{B} \equiv \hat{n} \cdot (\mathbf{B}_+ - \mathbf{B}_-) = 0 \\ \text{rot}_S \mathbf{B} \equiv \hat{n} \times (\mathbf{B}_+ - \mathbf{B}_-) = \mu_0(\mathbf{k}_\ell + \mathbf{k}_m) \end{cases} \quad (6)$$

onde  $\mathbf{B}_+$  e  $\mathbf{B}_-$  são os campos limite de cada lado da superfície em causa (ver fig. 4). Por conseguinte, visto que não há quaisquer correntes nas superfícies de topo do material, nenhuma das componentes de  $\mathbf{B}$  é descontínua nessas superfícies e portanto nos topos  $\mathbf{B}_+ = \mathbf{B}_-$ .

Por conseguinte, medindo o campo  $\mathbf{B}$  à superfície do ferromagnete, do lado de fora do material, como  $\mathbf{B}_+ = \mathbf{B}_-$ , então a magnetização é aproximadamente

$$\mathbf{M} \approx 2 \frac{\mathbf{B}_+}{\mu_0} - \frac{iN}{L} \hat{z} \approx 2 \frac{\mathbf{B}_+}{\mu_0} \quad (7)$$

Tipicamente, para  $L \sim 5$  cm,  $N \sim 1500$ ,  $i \sim 1$  A e  $B \sim 1$  T, tem-se  $\frac{iN}{L} \sim 2 \times 10^4$  A/m e  $\frac{\mathbf{B}_+}{\mu_0} \sim 10^6$  A/m, pelo que a primeira parcela é dominante. Na prática, através da medida de  $\mathbf{B}_+$  tem-se directamente a medida de  $\mathbf{M}$ .

Da discussão acima há duas coisas que devem ser relevadas: i) que num ferromagnete geralmente  $\mathbf{M} \neq \chi_m \mathbf{H}$ , pois  $\mathbf{M}$  e  $\mathbf{H}$  podem até ter sentidos opostos; e ii) existindo magnetização então existe campo  $\mathbf{H}$ , mesmo na ausência de correntes livres, já que  $\text{div} \mathbf{H} = -\text{div} \mathbf{M}$ .

### 3.1 A energia do ciclo de histerese

No vazio, a densidade de energia magnética é  $u_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2$ . Qualquer variação infinitesimal do campo traduz-se pois numa variação da energia em cada ponto, que será

$$du_B = \frac{1}{\mu_0} B dB = B dH, \quad (8)$$

visto que no vazio  $B = \mu_0 H$ .

A eq. 8 deve poder aplicar-se também na matéria já que não tem qualquer referência às propriedades do meio. Por consequência, num ciclo completo de

<sup>2</sup> Este facto mostra de resto a complexidade do comportamento dos materiais ferromagnéticos, que impede que se possa escrever que  $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$ ; pois neste caso seria  $\chi_m < 0$ , como se houvesse diamagnetismo!

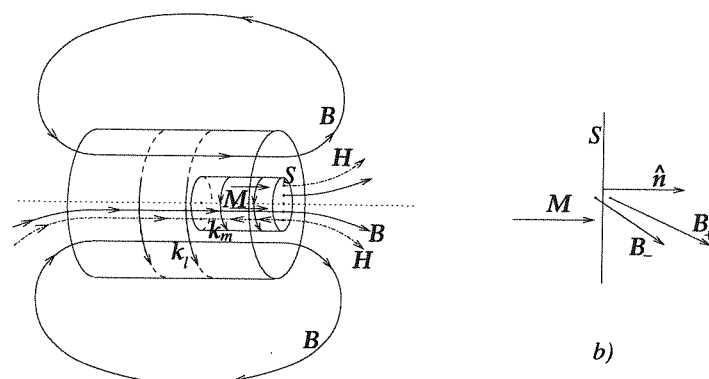


Figura 4: Representação esquemática das linhas de campo de  $M$ ,  $B$  e  $H$  (a tracejado), dentro e na vizinhança do ferromagnete; b) pormenor dos campos na superfície  $S$  do ferromagnete. Note que, em alguns pontos do ferromagnete,  $M$  e  $H$  têm sentidos opostos.

histerese há uma variação total de energia por metro cúbico de matéria que é dada por

$$\Delta u_B = \oint_{\text{ciclo}} B dH \quad (9)$$

Ou seja, a energia dissipada por metro cúbico e por ciclo completo de magnetização/desmagnetização é dada pela área da curva de histerese no plano  $(H, B)$ .<sup>3</sup>

Estas considerações têm particular relevância em sistemas que usam corrente alternada, pois o ciclo de histerese é percorrido sucessivamente, com a frequência de oscilação da corrente,  $f$ . A potência dissipada por histerese por metro cúbico de material magnético é pois

$$P = \frac{\Delta u_B}{\Delta t} = f \Delta u_B$$

Por exemplo, um transformador ligado à tomada dissipa energia permanentemente, só por estar ligado (há perdas de histerese mas também perdas ohmicas, devido a correntes de Foucault). Há electrodomésticos com transformadores de má qualidade cujo consumo energético passivo é significativo, só por estarem ligados à tomada.

## 4 Acerca do sensor de efeito de Hall

As cargas que constituem a corrente eléctrica que percorre um condutor ficam sob acção da força de Lorentz se existir também um campo magnético.

<sup>3</sup>Se tivermos  $H$  em A/m e  $B$  em tesla, então a área vem em J/m<sup>3</sup>.

h

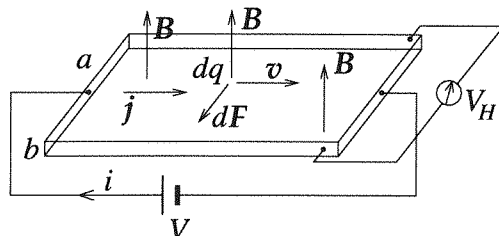


Figura 5: O efeito de Hall. As cargas em movimento ficam sujeitas a uma força de Lorentz e cria-se uma tensão de Hall, proporcional ao campo  $B$ .

Na fig. 5 uma corrente,  $i$ , percorre um elemento de um condutor de comprimento  $\ell$  e seção  $s = ab$ , numa região em que há um campo magnético,  $B$ , uniforme e perpendicular à direcção da corrente em todo o volume desse elemento. A força de Lorentz sobre um elemento de carga  $dq$  é  $d\mathbf{F} = dq(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ , onde  $\mathbf{v}$  é a velocidade das cargas e  $\mathbf{E}$  é o campo eléctrico. A velocidade é proporcional à densidade de corrente, pois  $\mathbf{j} = \rho\mathbf{v}$ .

A corrente é mantida em condições estacionárias pelo campo eléctrico da fonte de tensão, sendo, de acordo com a lei de Ohm,  $\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}_{\parallel}$ , onde  $E_{\parallel}$  é o campo na direcção das correntes e  $\sigma$  a condutividade. Mas há também a força magnética, que é perpendicular à velocidade das cargas. Em condições estacionárias de equilíbrio,  $d\mathbf{F}_{\perp} = 0$ , pelo que há também, neste caso, um campo eléctrico transversal às correntes,  $\mathbf{E}_{\perp} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Este campo origina uma diferença de potencial entre os lados do condutor (ver fig. 5), sendo

$$V_H = Ea = vaB = \frac{i}{\rho b} B \quad (10)$$

(pois  $j = i/ab$ ). Este efeito é conhecido como o **efeito de Hall**.

A diferença de potencial,  $V_H$ , é directamente proporcional ao campo magnético,  $B$ , estando disponíveis no mercado sensores de campo magnético robustos, compactos e precisos, baseados nesta tensão, vulgarmente designados como *sensores de efeito de Hall*. Mas a tensão  $V_H$  é geralmente da ordem de alguns microvolts,<sup>4</sup> pelo que os sensores de Hall disponíveis no mercado são geralmente sensores monolíticos que já integram um circuito amplificador.

Neste trabalho usa-se um sensor de Hall, ref. SS490, que incorpora um circuito amplificador do sinal e tem uma resposta linear no intervalo

<sup>4</sup>Percebe-se a razão de ser desse valor: - como a densidade de electrões num condutor é da ordem de fracção de mole/cm<sup>3</sup>; como  $e \approx 1.6 \times 10^{-19}$  C; então

$$\rho \sim 10^{23} \times 10^{-19} / 10^{-6} \sim 10^{10} \text{ C/m}^3$$

Numa pista de cobre com uma espessura típica de  $b = 100 \mu\text{m}$ , percorrida por uma corrente  $i = 1$  A, se o campo for de 1 T, a tensão de Hall é  $V_H \sim 1 \mu\text{V}$ .

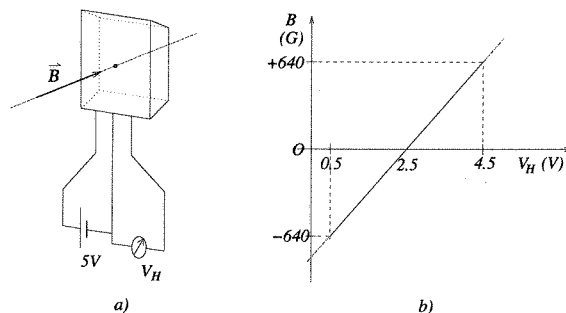


Figura 6: O sensor de Hall, ref. SS490. a) pormenor da montagem e operação do sensor em relação à direcção do campo magnético. O sensor deve ser alimentado com 5 V, entre os pontos A e B, sendo B a referência de terra, como indicado. A tensão do sensor,  $V_H$ , mede-se entre os terminais C e B (terra). b) recta de calibração é  $B = 320V_H - 800$  (com  $B$  em gauss e  $V_H$  em volt), para uma alimentação de 5 V, válida no intervalo  $V_H \in [0.5, 4.5]$  volt. Este sensor é linear na zona indicada, entre -640 e +640 gauss.

$[-640, +640]$  gauss. A recta de calibração fornecida pelo fabricante é

$$B = 320V_H - 800, \quad (\text{com } V_H \text{ em volt e } B \text{ em gauss}) \quad (11)$$

O campo deve ser medido com o sensor colocado na posição que se indica na fig. 6 em relação à direcção e sentido do campo.

## 5 Medidas de calibração do campo $H$

Na primeira parte do trabalho deve-se colocar o sensor de Hall à saída do solenóide, sobre o eixo, e amostrar o campo para diversos valores da corrente que percorre o solenóide, na ausência de qualquer material magnético. Estas medidas têm como objectivo medir o campo  $H$  gerado nesse ponto em função da corrente que passa no enrolamento do solenóide.

Para cada valor da corrente mede-se a tensão do sensor de Hall e determina-se o campo  $B$  recorrendo à recta de calibração, da fig. 6:  $B = 320V_H - 800$  (com  $B$  em gauss e  $V$  em volt). A partir de  $B$ , obtém-se para cada ponto,  $H = \frac{1}{\mu_0} B$ . Um ajuste linear aos pontos  $(i, H)$  permite então estabelecer a recta  $H(i)$  característica do solenoide, tal como é previsto pela eq. 3.

## 6 Medidas do ciclo de histerese

A montagem experimental está representada na fig. 7.

A medida do ciclo histerético deve ser precedida da "calibração do campo  $H$  do solenóide" de modo a estabelecer previamente o valor do campo  $H$  gerado por cada corrente que passa no enrolamento do solenóide.



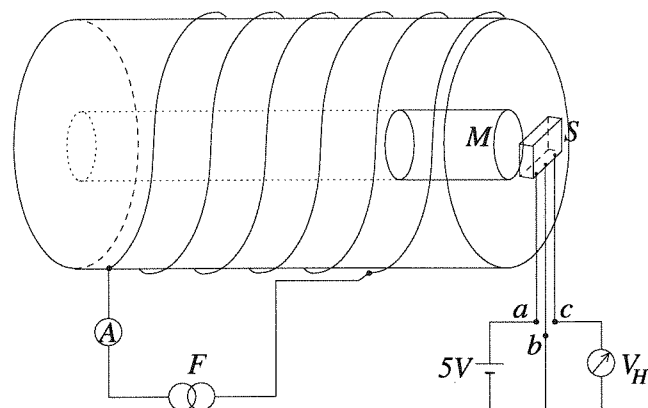


Figura 7: Montagem experimental para medição do ciclo de histerese. F: fonte de corrente; A: amperímetro; S: sensor de Hall, M: material ferromagnético. O sensor é ligado à tensão  $V_a - V_b = +5 \text{ V}$ ; o sinal do sensor mede-se com o voltímetro, sendo dado pela tensão  $V_H = V_c - V_b$ ; fios do sensor: vermelho(a); preto(b) e castanho(c).

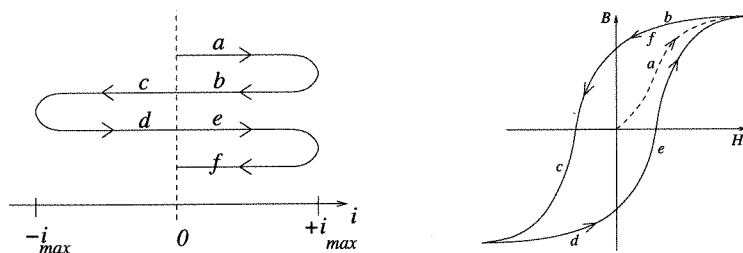


Figura 8: Esquema das sequências de medições ininterruptas a efectuar para observar um ciclo de histerese completo do ferromagnete. Meça cerca de 10 a 12 pontos em cada uma das sequências representadas: a, b, c, d, e e f; no total deverá recolher cerca de 60 a 70 pontos experimentais. As correntes que usar devem estar aproximadamente no intervalo  $i \in [-1.3, 1.3] \text{ A}$  (por causa do aquecimento) e a tensão do sensor de Hall deve estar no intervalo  $V_H \in [0.5, 4.5] \text{ volt}$  (zona linear do sensor).

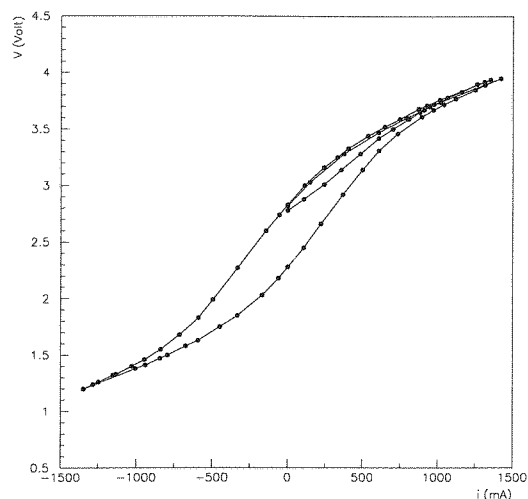


Figura 9: Representação gráfica das medidas directas do ciclo de histerese de um ferromagnete efectuadas com o equipamento e o procedimento descritos no texto. É visível a curva de primeira magnetização. As rectas de calibração,  $H(i)$  e  $B(V_H)$ , permitem passar deste plano  $(i, V)$  para o plano  $(H, B)$ . Visto que a transformação é linear, as curvas têm o mesmo aspecto geral.

Pretende-se medir a curva de histerese de uma liga dura de aço da ponta de uma chave de parafusos de Cr-V. Este material foi escolhido por ter uma curva de histerese significativa, o que facilita a observação. A medida do campo  $B$  é feita com o sensor de Hall (quase) encostado à superfície do ferromagnete, colocada na mesma posição em que se calibrou o campo do solenóide.

Proceda de acordo com a execução experimental que a seguir se descreve, percorrendo as correntes sucessivamente pela ordem que se indica na fig. 8, respeitando a gama de valores de correntes e tensões que aí se referem. Na fig. 9 representa-se a título ilustrativo a curva de histerese medida com este equipamento, em condições semelhantes às que são aqui descritas. Os pontos foram medidos em sequência, tal como se indica na fig. 8. É visível a curva de primeira magnetização, a partir de uma magnetização residual inicial.

## 7 Procedimento Experimental

### 7.0.1 Sobre o solenóide

Tome nota das dimensões do solenóide que utilizar (comprimento,  $L$ , e raios interno e externo,  $R_1$  e  $R_2$ ).

### 7.0.2 Ligação do solenóide

Verifique que a corrente de saída da fonte de corrente está a zero. Ligue cada um dos fios do enrolamento aos terminais da fonte de corrente, intercalando nesse circuito um amperímetro, com vista a medir a corrente do solenoide na escala de maior precisão.

### 7.0.3 Ligação da ventoinha

Ligue a ventoinha de arrefecimento do solenóide a uma fonte de tensão. Aumente lentamente a tensão até a velocidade ser a desejada, mas não ultrapasse a tensão indicada no corpo da ventoinha. Durante o curso da experiência verifique regularmente a temperatura do solenoide — interrompa as medidas se ele sobreaquecer(!).

### 7.0.4 Ligação do sensor de Hall

**Atenção: se o sensor de Hall for mal ligado arde imediatamente, sem aviso — está avisado(!).**

Verifique se a tensão de alimentação do sensor de Hall é de 5 volt (a calibração é para essa tensão). O sensor tem uma impedância de entrada de  $\sim 1\text{ k}\Omega$ , verifique se a fonte de alimentação tem a potência suficiente.

Ligue o fio vermelho (terminal *a*) a +5 volt; ligue o fio preto (terminal *b*) a 0 volt (terra), (ver fig. 7).

Ligue um voltímetro entre os pontos *c* (fio castanho) e *b* (fio preto) do sensor de Hall e meça a tensão de saída do sensor,  $V_H$  (escolha a escala do voltímetro que seja mais conveniente para medir tensões entre  $0 \lesssim V_H \lesssim 5$  volt). Note que, para  $B \sim 0$ , a tensão de saída do sensor é cerca de 2.5 V (cf., fig.6).

### 7.0.5 Calibração do campo $H$ do solenóide

Posicione o sensor de Hall com fita adesiva na posição do eixo do solenóide, à saída do enrolamento, como se mostra na fig. 7 (a inscrição que está no corpo do sensor deve ficar para fora).

Rode ligeiramente o botão da fonte de corrente e verifique se a tensão do sensor de Hall aumenta; se diminuir, inverta a corrente que alimenta o solenóide (i.e., troque os fios na fonte de corrente). Se o amperímetro indicar corrente negativa, troque também os terminais do amperímetro.

Meça o campo  $B$  para diferentes valores da corrente que percorre o solenóide, no intervalo  $i \in [0, \sim 1.3]\text{ A}$ , a intervalos de cerca de 100 mA. Faça pelo menos dez medidas. Ponha a corrente a zero e troque os fios de ligação na fonte de corrente. Meça alguns valores do campo  $B$  para  $i \in [-1.3, 0]$ . Insira os valores na tabela 1, incluindo os respectivos sinais.

Desligue a corrente de saída da fonte de corrente se não estiver a fazer medidas, para evitar aquecer o enrolamento do solenóide (esta recomendação não se aplica à alínea seguinte).

### 7.0.6 Medida do ciclo de histerese

Rode o botão da fonte de corrente para zero.

Insira a chave de parafusos dentro do solenóide e fixe-a de modo a que a ponta fique no eixo do solenóide, à face da extremidade, no mesmo ponto em que anteriormente mediu o campo  $H$ .

Posicione o sensor de Hall sobre a ponta da chave de parafusos, fixando-o de modo a que não se desloque (ver fig. 7). Durante a experiência verifique amiúdas vezes que, quer o sensor quer a ponta da chave, não saem do sítio.

**Após começar a magnetizar o material não pode interromper as medidas.**, pois um material ferromagnético *tem memória*. Reveja previamente as sequências de medidas que tem que fazer (ver fig. 8).

Rode muito ligeiramente o botão da fonte de corrente e verifique se a tensão do sensor de Hall aumenta; se diminuir, inverta a corrente que alimenta o solenóide.

Meça o campo  $B$  em função da corrente, ao longo de um ciclo completo de histerese e insira os valores na tabela 2, incluindo os sinais. Para o efeito, varie a corrente, anotando os valores da tensão do sensor de Hall e da corrente a intervalos de cerca de 100 a 150 mV. Acima de  $|i| \gtrsim 1$  A reduza o passo para cerca de  $\Delta i \sim \pm 70$  mA.

Durante cada sequência de medidas, rode o botão da fonte de corrente sempre no mesmo sentido; **nunca retroceda ou interrompa a corrente a meio das medidas!**. Nunca ajuste o passo: - se variou demais a corrente, paciência; continue a medir (os intervalos não têm que ser iguais).<sup>5</sup>

Tire as medida rapidamente para não aquecer o enrolamento do solenóide em demasia, sobretudo para  $|i| \gtrsim 1$  A.

Meça as correntes e tensões nas escalas dos aparelhos que sejam mais convenientes para a leitura dos valores que está a medir.

A observação de um ciclo completo de histerese compreende várias sequências de medidas ininterruptas, que devem ser seguidas escrupulosamente, tal como é indicado na fig. 8. O *terminus* de cada sequência atinge-se à primeira das seguintes condições:

- i) se chegou à corrente máxima recomendada,  $|i| \sim 1.3$  A (para não sobreaquecer o enrolamento);
- ii) ou se chegou ao limite do intervalo de linearidade do sensor,  $V_H \notin [0.5, 4.5]$  V (fig. 6).

Atingido o *terminus* de uma sequência, inicie imediatamente a sequência seguinte, que é indicada na fig. 8, sem jamais interromper a corrente ao enrolamento. Para inverter o sentido da corrente troque os fios na respectiva fonte (isso só acontece em  $i = 0$ ).

<sup>5</sup>Se acaso variar a corrente em sentido contrário ao previsto ou se a interromper, ainda que brevemente, deve recommear as medidas da histerese desde início!

Visto que o material ferromagnético tem memória, a sua resposta integra a história magnética recente. Por isso, se alguma anomalia tiver ocorrido durante as medidas da histerese deve repeti-las desde o início (eventualmente tentando primeiro desmagnetizar o ferromagnete, ainda que parcialmente).

Após ter terminado todas as medidas, antes de tirar o ferromagnete, aplique-lhe uma corrente de cerca de  $-300\text{ mA}$  para desmagnetizar (parcialmente embora) a ponta ferromagnética.

Tabela 1: Medidas do campo  $H$  num ponto do solenóide em função da corrente,  $i$ . Para cada valor de  $i$  mede-se  $B$  e calcula-se  $H = \frac{1}{\mu_0} B$ . O campo  $B$  obtém-se a partir da recta de calibração do sensor de Hall. Escreva todos os valores (incluindo os de  $H$ ) em unidades do sistema SI.

$i$	$V_H$	$B$	$H$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

## 8 Análise de resultados

1. Preencha a tabela 1 com os valores que mediu,  $i$  e  $V_H$ . Calcule  $B$  e  $H = \frac{1}{\mu_0} B$ , usando para o efeito a recta de calibração do sensor de Hall,  $B[\text{T}] = (320V_H[\text{V}] - 800) \times 10^{-4}$  da fig. 6, (já convertido para tesla).
2. Represente graficamente os valores  $(i, H)$  que obteve com o solenóide vazio, pondo  $i$  em abcissas e  $H$  em ordenadas, em unidades SI ( $i$  em ampere e  $H$  em ampere/metro).
3. Ajuste o conjunto de pontos  $(i, H)$  a uma recta e obtenha a recta de calibração do solenóide,  $H(i) = \alpha + \beta i$ . Anote os valores de  $\alpha \pm \sigma_\alpha$  e de  $\beta \pm \sigma_\beta$ . Compare com a relação prevista pela eq. 3, entre  $i$  e  $H$  e determine o número de voltas do enrolamento e respectiva incerteza. Se acaso  $\alpha$  não for consistente com zero que conclusão extrai?
4. Complete a tabela 2, das medidas de histerese, com os correspondentes valores de  $H(i)$  e de  $B$  medidos, em unidades SI.
5. Represente graficamente os valores da tabela 2,  $B$  em função de  $H(i)$ , (com  $H$  em abcissas). Ligue os pontos entre si com uma linha. Querendo pode utilizar o programa de análise disponível *online* (vide infra).
6. Remova os pontos da primeira sequência de medidas (eventualmente correspondentes à curva de primeira magnetização) e os pontos da última sequência,  $f$ , da fig. 8, deixando apenas os pontos que perfazem um ciclo completo de histerese. Calcule a área do ciclo completo de histerese e obtenha a energia dissipada por metro cúbico do material ferromagnético analisado.

Tabela 2: Medidas do campo  $B$  à superfície do ferromagnete, para diferentes valores da corrente do solenóide,  $i$ , seguindo a sequência indicada na fig. 8. Os valores do campo  $H = H(i)$  são dados por  $H(i) = \beta i$ , onde  $\beta$  é o declive da *recta de calibração*,  $H = \alpha + \beta i$ , que foi ajustada aos dados da tabela 1, (o parâmetro  $\alpha$  mede um eventual desvio sistemático na calibração do sensor). Os valores do campo  $B$  obtêm-se a partir da recta de calibração do sensor de Hall. Os valores de  $B$  e de  $H$  devem estar em unidades do sistema SI.

seq.	$i$	$V$	$B$	$H$
a	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
b	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
c	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
d	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
e	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
f	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

7. Calcule a potência dissipada por histerese em cada centímetro cúbico do material ferromagnético utilizado se ele fosse usado no núcleo de um transformador e ligado à rede eléctrica.
8. Obtenha a partir da curva de histerese os valores das remanescência,  $B_r$ , e coercividade,  $H_c$ , da liga ferromagnética utilizada na chave de parafusos (ver fig. 1).
9. Querendo pode utilizar o programa de análise do ciclo de histerese que foi desenvolvido especificamente para este trabalho, para representar graficamente a curva, calcular a área do ciclo de histerese e obter os correspondentes campos  $B_r$  e  $H_c$ . O programa está disponível *online* em [fisica.uc.pt/ilabs/eee/eee.php](http://fisica.uc.pt/ilabs/eee/eee.php).