

## CICLO D'ISTERESI DI UN MATERIALE FERROMAGNETICO

Le proprietà delle sostanze ferromagnetiche sono descritte dal *ciclo d'isteresi*, che -con riferimento al testo adottato (Mazzoldi, Nigro, Voci: Elettromagnetismo) - consiste in un *diagramma di stato* (§ 7.5), in cui è riportato, in funzione del campo  $H$ , il campo magnetico  $B$  presente all'interno del *materiale* ferromagnetico.

Lo schema del dispositivo sperimentale per la rilevazione del ciclo d'isteresi è mostrato in figura 1. Esso è composto da due solenoidi lunghi 180 mm di  $N_1 = 583$  spire ciascuno, distanti ad un estremo  $h = 0.7$  mm, collegati in serie e attraversati da una corrente  $i$ ; il materiale da analizzare è composto da due barre di ferro (diametro  $\phi = 12$  mm). Il sistema nel suo complesso può quindi essere pensato, con buona approssimazione, come un *solenoido indefinito* (esempio 7.3), con un numero di spire per unità di lunghezza  $n \cong 3240$  spire/m costante, con al centro una cavità sottile (*traferro*) di spessore  $h = 0.7$  mm, perpendicolare al campo magnetico  $\mathbf{B}$ . La cavità è necessaria per poter posizionare al suo interno un rivelatore per la misura del campo magnetico  $B_c$ , che coincide, per la proprietà del campo magnetico  $\mathbf{B}$  di essere *solenoidale*, con il campo magnetico  $B$  all'interno del materiale ferromagnetico ( $B = B_c$ ). Tale rivelatore è costituito da una *sonda di Hall* (§ 6.6), in cui la misura del campo magnetico  $B$ , ricordiamolo, è ricondotta alla misura della *tensione di Hall*  $E_H$  che si manifesta ai capi di un conduttore sottile (spessore  $0.5 \div 0.65$  mm) percorso da corrente, quando è sottoposto all'azione di un campo magnetico  $\mathbf{B}$ , nella direzione perpendicolare al verso della corrente che lo percorre e a  $\mathbf{B}$ ; la tensione misurata  $E_H = \alpha B$  è direttamente proporzionale al valore di  $B$  (6.18). La sonda di Hall è stata precedentemente tarata, per cui il valore di  $B$  in Gauss ((§ 6.3),  $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$ ) viene letto in forma digitale su un contatore in dotazione.

Il campo  $H$  viene fatto variare mediante il reostato  $R$  che regola la corrente  $i$  che percorre il solenoide; nel caso il solenoide fosse *senza traferro* ( $h = 0$ ), esso sarebbe, (7.28) e (7.30):

$$H = ni = 3.24 \cdot 10^3 \frac{\text{A}}{\text{m}} . \quad (1)$$

Si costruisce un diagramma, *ciclo d'isteresi* (Fig.2) in cui per ogni valore di  $i$  ( $H$ ) si riporta il corrispondente valore di  $B$  misurato.

**Osservazione:** *la presenza del traferro- per quanto di spessore  $h = 0.7$  mm molto piccolo rispetto alla lunghezza del ferro  $L = 360$  mm, ( $h/L \approx 2 \cdot 10^{-3}$ ) - comporta che, per un certo valore di  $B$  misurato in corrispondenza di un certo valore della corrente  $i$ , il campo  $H'$  nel ferro risulta minore del campo  $H$  calcolato secondo la (1). La teoria completa-che non viene sviluppata durante il corso di Fisica II- permette di calcolare il campo  $H'$  effettivamente presente nel materiale ferromagnetico. Tuttavia la differenza tra  $H'$  e  $H$  non risulta tale da modificare sostanzialmente la forma del ciclo d'isteresi, per cui il diagramma ( $H, B$ ) dà, in ogni caso, una buona rappresentazione delle caratteristiche più peculiari del materiale ferromagnetico analizzato.*

## PROCEDURA DI RILEVAZIONE DEL CICLO D'ISTERESI.

Occorre innanzitutto verificare che il materiale sia allo *stato vergine*, per cui per  $i = 0$  ( $H = 0$ ) deve risultare  $B = 0$ . Nel caso che per  $i = 0$  risultasse  $B \neq 0$ , ovvero il campione avesse una certa *magnetizzazione*, il dispositivo sperimentale è dotato di un dispositivo (SMAG), segnalato sul banco, per ricondursi a questa situazione, ossia per *smagnetizzare* il campione.

Si parte dunque da  $i = 0$ , ( $H = 0$ ),  $B = 0$ , e si fissa, agendo sul reostato  $R$  una corrente  $i = 200$  mA, letta in forma digitale su un contatore; si misura  $B$  (in gauss) rilevandolo sul contatore digitale e si riportano i due valori ( $i, B$ ) in una tabella e su un diagramma del tipo mostrato in Fig.2. Si aumenta quindi la corrente di  $\Delta i = 200$  mA, si misura  $B$  e si riportano i nuovi valori di ( $i, B$ ), in tabella e sul diagramma. Si procede aumentando la corrente a passi di  $\Delta i = 200$  mA, *sempre nello stesso verso*, fino al valore massimo consentito  $i_{\max} = 2$  A, a cui corrisponde il valore  $B_{\max}$  misurato. Resta in tal modo determinato il primo tratto di curva ( $O \rightarrow P$ ) del ciclo d'isteresi, noto come *curva di prima magnetizzazione*.

Si comincia a diminuire la corrente, sempre a passi di  $\Delta i = 200$  mA e *sempre nello stesso verso*, fino a  $i = 0$ , misurando i corrispondenti valori ( $i, B$ ) e riportandoli in tabella e nel grafico. In tal modo si sarà rilevato il tratto ( $P \rightarrow Q$ ) del ciclo d'isteresi.

Un commutatore permette di invertire il verso della corrente  $i$  che percorre il solenoide, (permettendo così di invertire, in base alla (1), il verso di  $H$ ). Si procede come prima diminuendo la corrente sempre a passi di  $\Delta i = 200$  mA fino al valore massimo  $-i_{\max} = -2$  A, a cui corrisponde  $-B_{\max}$  misurato, determinando in tal modo il tratto ( $Q \rightarrow R$ ) del ciclo d'isteresi.

Si fa aumentare ora la corrente, sempre a passi di  $\Delta i = 200$  mA, da  $-i_{\max} = -2$  A, a  $i = 0$ , rilevando i corrispondenti valori di  $B$ ; si inverte il verso della corrente e si procede con lo stesso metodo da  $i = 0$  a  $i_{\max} = +2$  A. Alla fine resta determinato il tratto ( $R \rightarrow P$ ), completando il ciclo d'isteresi.

I valori del campo  $H$  possono essere riportati nel grafico, in corrispondenza della corrente  $i$ , utilizzando la (1).

#### **Osservazioni:**

a) *sebbene per la lettura del campo  $B$  (in gauss), siano disponibili quattro cifre, soltanto le prime due sono significative, per cui si arrotondano i valori letti alla centinaia; la scala scelta per la rappresentazione grafica riflette questa considerazione;*

b) *i punti ( $i, B$ ) che si riportano sul grafico possono essere soggetti ad un certo errore determinato dagli strumenti utilizzati (l'amperometro  $A$  per quanto riguarda la corrente  $i$ , la sonda di Hall per  $B$ ). Nel tracciare la curva che meglio approssima "ad occhio" i punti sperimentali occorre tener presente che, in ogni caso, fisicamente, trattasi di una curva continua variabile monotonamente, non soggetta quindi a variazioni brusche (discontinue), che potrebbero erroneamente essere suggerite dai punti riportati.*

#### **OSSERVAZIONI E SPUNTI DI RIFLESSIONE.**

a) Per un certo valore di  $H$  esistono più valori di  $B$ : tutti quelli compresi tra i valori massimi assunti sul diagramma (§ 7.5).

b) Per un certo valore di  $H$  esistono più valori della permeabilità magnetica relativa:

$$\kappa_m = B/\mu_0 H, \quad (2)$$

(con  $B$  in T,  $H$  in A/m e  $\mu_0/4\pi = 10^{-7}$  H/m), che risulta quindi funzione di  $H$ :  $\kappa_m = f(H)$ , (al contrario di quanto avviene nei *materiali diamagnetici e paramagnetici*).

c) Per  $H = 0$ , risulta  $B_r \neq 0$ , ovvero il materiale ha una *magnetizzazione residua*:

$$B_r = \mu_0 M_r \quad (3)$$

valutabile dal diagramma.

d) Per  $B = 0$ ,  $H = H_c$ , *campo coercitivo*, valutabile dal diagramma.

## Schema del dispositivo

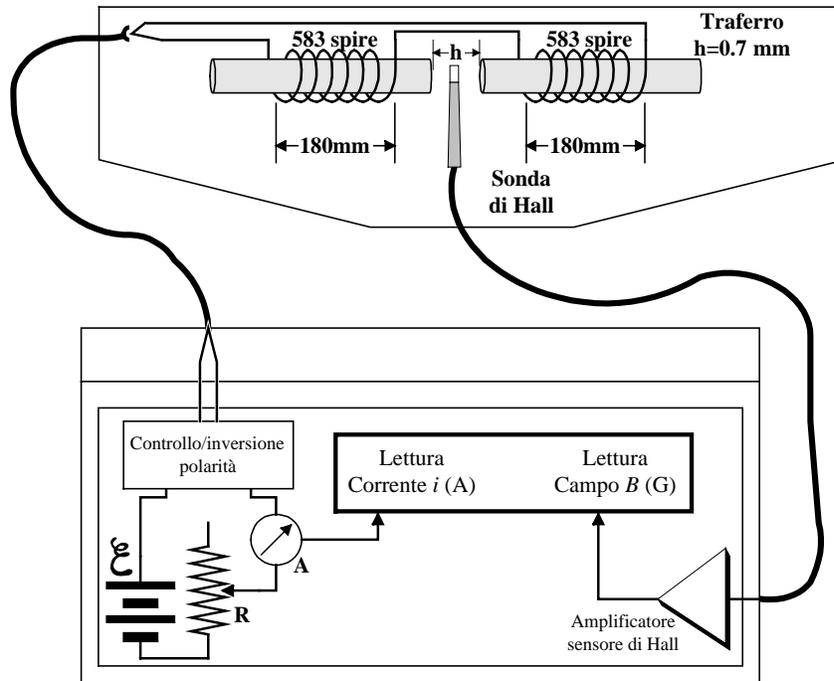


Fig. 1

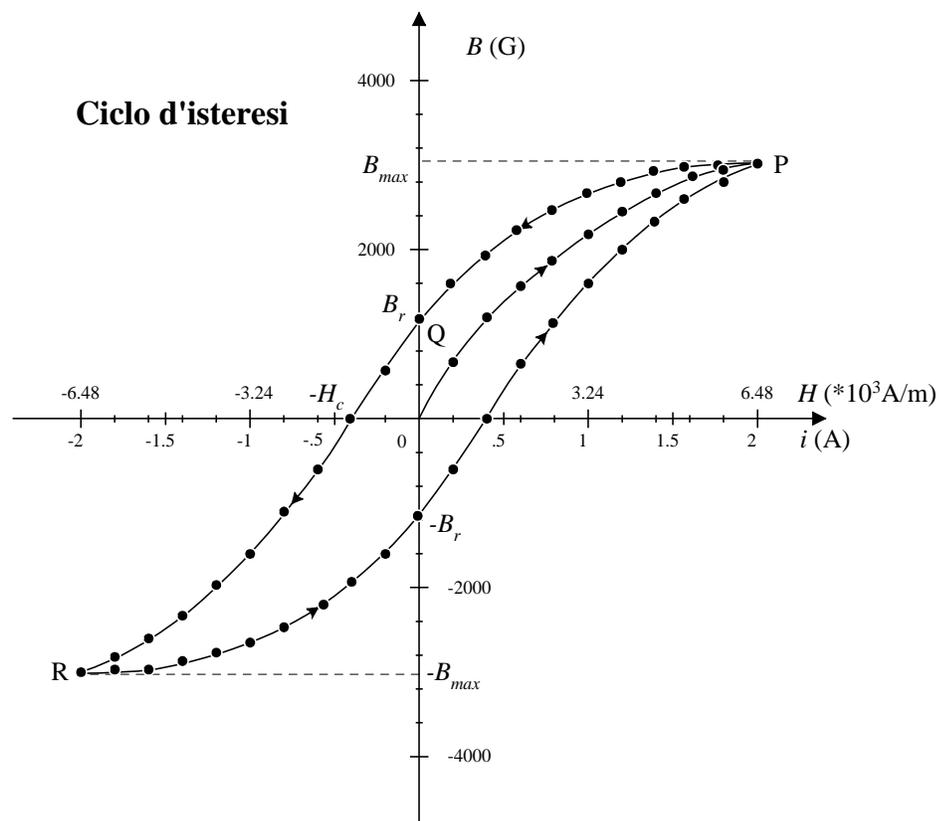


Fig. 2

LAUREA IN INGEGNERIA.....

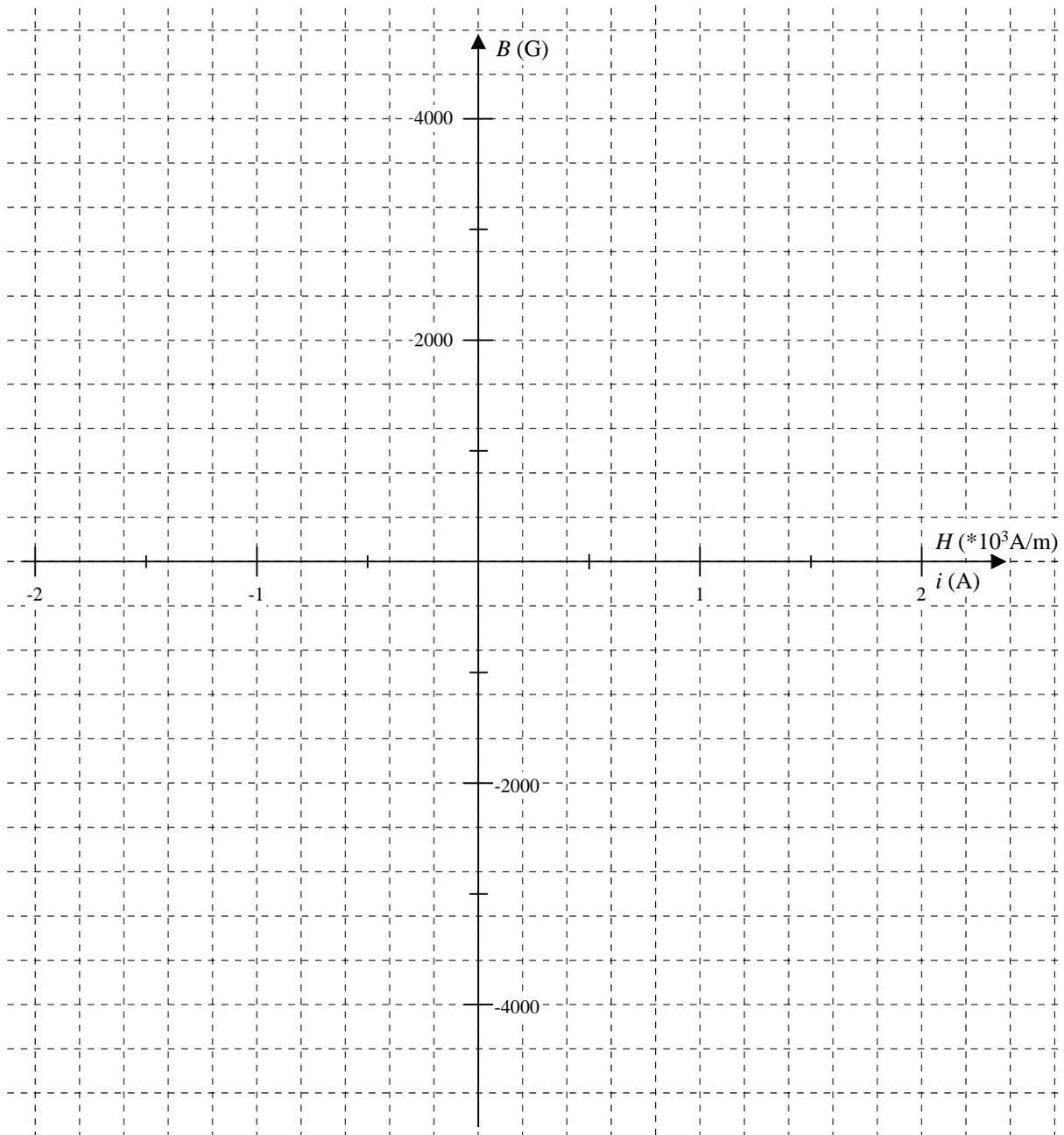
Cognome.....Nome.....matr.....

Cognome.....Nome.....matr.....

Cognome.....Nome.....matr.....

**Tabella delle misure del ciclo d'isteresi di un materiale ferromagnetico.**

$i(A)$	$B(G)$	$i(A)$	$B(G)$	$i(A)$	$B(G)$
↔		↔		↔	
0		0		0	
0.2		-0.2		0.2	
0.4		-0.4		0.4	
0.6		-0.6		0.6	
0.8		-0.8		0.8	
1.0		-1.0		1.0	
1.2		-1.2		1.2	
1.4		-1.4		1.4	
1.6		-1.6		1.6	
1.8		-1.8		1.8	
2.0		-2.0		2.0	
1.8		-1.8			
1.6		-1.6			
1.4		-1.4			
1.2		-1.2			
1.0		-1.0			
0.8		-0.8			
0.6		-0.6			
0.4		-0.4			
0		0			



*Alcune valutazioni direttamente dal ciclo d'isteresi*

**(conversione gauss→tesla 1000G→0.1T)**

**a) valutare il valore di  $\kappa_m$  per alcuni valori di  $i$  (di  $H$ ):**

per $i=0.5$ A, $H=1.62 \cdot 10^3$ A/m	$\kappa_m \cong$	$\kappa_m \cong$	$\kappa_m \cong$
per $i=1$ A, $H=3.24 \cdot 10^3$ A/m	$\kappa_m \cong$	$\kappa_m \cong$	$\kappa_m \cong$
per $i=1.5$ A, $H=4.86 \cdot 10^3$ A/m	$\kappa_m \cong$	$\kappa_m \cong$	$\kappa_m \cong$

**b) valutare il valore di  $B_r = \mu_0 M_r \cong$  A/m**

**c) valutare il valore del campo coercitivo  $H_c \cong$  A/m**