

MAGNETISMO E MISURE MAGNETICHE

prima parte - a cura dell'Ing. M. COLOMBO

L'argomento del magnetismo e dei circuiti magnetici è importante almeno come quello dell'elettricità e dei circuiti elettrici, tuttavia non sempre è conosciuto e compreso. Una ragione di molte inesattezze è la confusione delle unità di misura, per una sfortunata analogia cagionata dai primi ricercatori, i quali erroneamente pensarono ai poli magnetici unitari come se fossero cariche elettriche unitarie.

L'importanza dei fenomeni magnetici non è senza dubbio inferiore a quella dell'elettricità e dell'elettronica, cui anzi il magnetismo è strettamente collegato. Si genera un campo magnetico attorno ad ogni corrente elettrica; l'induttanza è un fenomeno magnetico; le applicazioni del magnetismo sono in costante evoluzione in tutti i campi, compreso quello medico (basti ricordare i cuori artificiali la cui alimentazione avviene per induzione); magneti permanenti sono essenziali per il funzionamento degli altoparlanti, dei motori, di generatori, di sensori e di molti altri prodotti di uso comune.

Nel campo del magnetismo si incontrano strumenti di vario genere; vi sono, accanto ai più comuni magnetometri tascabili, apparecchi assai perfezionati, quali, ad esempio, gli spettrometri NMR del valore di 50.000 dollari. L'elemento che unisce il campo del magnetismo e quello dell'elettricità è l'induttore, componente elettrico basilare, il cui funzionamento è basato su principi magnetici.

Chiunque si occupi di apparecchi elettrici od elettronici deve ovviamente essere a conoscenza dei principi che regolano il magnetismo; tuttavia i fenomeni magnetici non sono finora oggetto di studio nella stessa misura di quelli elettrici. Probabilmente, il comportamento non sempre regolare dei materiali magnetici, accanto alla difficoltà di mantenere entro spazi delimitati un campo magnetico, sono alcune delle ragioni per cui il magnetismo sembra assai complicato.

Si può considerare una sfortuna il fatto che Benjamin Franklin abbia definito il passaggio di corrente elettrica come un fenomeno dovuto alla carica negativa dell'elettrone, e che Coulomb abbia spiegato gli effetti magnetici nei termini di forze sviluppatasi

fra «unipoli magnetostatici». E' attualmente risaputo che la corrente di elettroni si muove verso le regioni di potenziale positivo, che non esistono poli magnetici isolati, e che il magnetismo viene meglio descritto in termini di correnti, e non di poli. Tuttavia, a causa delle ipotesi formulate dai primi ricercatori, molto spesso vengono proposte a coloro i quali si vogliono accostare a questo argomento delle teorie e terminologie ormai superate e difficili da capire; risulta spesso difficile collegare le unità di misura MKS, moderne e semplici, alle anteriori e meno pratiche unità CGS.

Alcuni secoli prima di Cristo, i Greci si erano accorti che il minerale di magnetite attira il ferro; ma fu solo nel 1785 che Charles Coulomb stabilì la legge di attrazione e repulsione fra poli magnetici concordi e discordi. Le prime definizioni e unità di misura corrispondevano perciò a forze fra «poli».

Oersted, nel 1820, scoprì che una corrente elettrica deviava un ago magnetico; utilizzando poi la scoperta di Oersted, Ampère e Arago riuscirono a magnetizzare aghi d'acciaio ponendoli entro un filo avvolto ad elica in cui passava corrente. Nel 1852 Wilhelm Weber suggerì l'ipotesi che ciascuna molecola di ogni materiale magnetico fosse un piccolo magnete. L'americano Joseph Henry e l'inglese Michael Faraday scoprirono separatamente l'induzione elettromagnetica — la «conversione» del magnetismo in elettricità — e realizzarono i primi trasformatori. Le più importanti leggi sull'elettricità e il magnetismo furono formulate da Maxwell nel suo famoso trattato pubblicato nel 1873.

Le unità di misura del Sistema Internazionale

Dal momento che le unità di misura non solo rappresentano gli standard, ma anche il linguaggio connesso con le misure del magnetismo, è opportuno conoscerle con precisione. La scelta delle unità di misura dipende generalmente dai seguenti tre fattori: 1) la storia delle scoperte scientifiche; 2) la semplicità di utilizzazione nella pratica; 3) gli accordi internazionali. Fortunatamente, esistono intese internazionali cui si tende ad aderire; in particolare, le unità di misura proposte dal «Sistema Internazionale» (SI) vengono caldamente raccomandate da tutti i centri di standardizzazione nel mondo. Taluni tecnologi si trovano in difficoltà nell'adattare, ad esempio, i «tesla» al posto dei «gauss» come unità di misura della den-

TABELLA 1 - Unità di misura nel Sistema Internazionale e simboli

Φ	= Flusso magnetico (weber, Wb)
B	= Densità di flusso magnetico (tesla, T)
R	= Riluttanza
F	= Forza magnetomotrice
H	= Forza magnetizzante (campo di forze magnetiche induttore)
μ	= Permeabilità (B/H)
μ_0	= Permeabilità nel vuoto
μ_r	= Permeabilità relativa
L	= Coefficiente di auto-induttanza (induttanza, henry, H)
E	= Tensione indotta (volt, V)
I	= Intensità di corrente (ampere, A)
J	= Intensità di magnetizzazione
x	= Suscettibilità magnetica
N	= Numero di spire
r	= Raggio

TABELLA 2 - Relazioni magnetiche di base

Legge di Ohm per il magnetismo
f.m.m. = ΦR
Forza magnetomotrice
f.m.m. = NI
Densità di flusso, per definizione
$B = \mu H = H + 4 \pi J = \mu_0 (H+J) = \mu_0 (1+x) H$
f.e.m. indotta in N spire
$E_L = - N d\Phi/dt$
f.e.m. indotta in un filo diritto di lunghezza l, velocità v, in un campo magnetico B
$E = B l v$
Coefficiente di autoinduttanza, per definizione
$E = - L dI/dt$
Suscettibilità magnetica, per definizione
$x = J/H$
Permeabilità relativa, per definizione
$\mu_r = \mu / \mu_0$
Induttanza in avvolgimento di N spire
$L = N \Phi / I$

sità di flusso magnetico; ma gli eventuali svantaggi dovuti alla scelta di unità di misura poco familiari vengono senza dubbio compensati dall'uniformità, semplicità e praticità delle unità SI. Nella Tabella 1 è elencata la terminologia di uso comune, e nella Tabella 2 sono elencate le relazioni magnetiche di base che verranno discusse nel seguito.

Il flusso e la densità di flusso

Le unità di misura del flusso (Φ) e della densità di flusso (B) vengono presentate nella Tabella 3. La prima teoria formulata in relazione a un campo magnetico trattava la questione nei termini di «linee» di flusso magnetico sviluppatesi da «poli» magnetici; e questa impostazione del problema generò alcuni inconvenienti. Esistono, in particolare, due unità di misura fondamentali: le CGS-elettromagnetiche (EMU) e le MKS; vi sono poi le CGS-elettrostatiche (ESU). La scelta di tali unità di misura è dovuta a due differenti impostazioni teoriche sul magnetismo. Le unità di misura CGS-elettromagnetiche si sono sviluppate in seguito alla definizione dei fenomeni magnetici nei termini di «poli unitari» (polo che esercita la forza di un dine su di un secondo polo uguale ad esso collocato ad un centimetro di distanza nel vuoto). La legge di Coulomb che definisce la forza di interazione fra due poli (m ed m') a distanza r è la seguente:

$$F \text{ (forza)} = K m m' / r^2$$

ove K (una costante che tiene conto della permeabilità del mezzo interposto fra i due poli) è unitaria nel sistema CGS-elettromagnetico (EMU).

Quando un polo viene inserito in un campo magnetico, una forza si esercita su tale polo; l'«intensità di campo magnetico» (H) viene definita come quel campo che esercita la forza di una dine su di un polo unitario.

I primi ricercatori in questo campo hanno pensato al campo di forze magnetico nei termini di linee di flusso uscenti da poli magnetici. Dal momento che era assai comodo definire il campo unitario (1 linea/cm², od 1 gauss) come quel campo presente su di una sfera di raggio unitario, contenente un polo unitario, vi dovevano essere 4 π linee che si sviluppavano da un polo unitario (l'area della sfera è 4 π r²); ciascuna linea ha assunto il nome di maxwell nel sistema CGS.

Nel sistema MKS (il sistema che viene ormai universalmente riconosciuto e raccomandato) l'unità di

TABELLA 3 - Flusso e densità di flusso

	Unità CGS	Unità MKS	Relazioni
Flusso Φ	linea (maxwell)	weber	1 weber = 10 ⁸ linee
Densità di flusso	gauss (1 linea/cm ²)	tesla (weber/m ²)	1 tesla = 10 ⁴ gauss

I campi magnetici terrestri vengono spesso descritti mediante i gamma (1 gamma = 10⁻⁵ gauss = 10⁻⁹ tesla).

TABELLA 4 - Forze magnetiche (f.m.m. e H)			
	Unità CGS	Unità MKS	Relazioni
Forza magnetomotrice (f.m.m., F)	gilbert (dine/polo unit.)	ampere-spire	1 gilbert = $10/4 \pi$, o 0,796 ampere-spire
Campo di forze magnetizzante (H)	oersted (gilbert/cm)	ampere-spire/metro	1 oersted = $10^3/4 \pi$, o 79,577 ampere-spire/metro

TABELLA 5 - Riluttanza e permeabilità			
Simbolo	Unità CGS	Unità MKS	Relazioni
Riluttanza, R	gilbert	ampere-spire	Resistenza magnetica ($R = F/\Phi$) di Ohm
	maxwell	weber	
Permeabilità, μ	gauss	weber ampere-spire	E' il reciproco della riluttività; B/H ; $\mu_r = \mu/\mu_0$; $\mu_r = 1 + \chi$
	oersted	$\frac{m^2}{m}$ weber	
Permanenza Riluttività		$\frac{metro}{ampere-spire}$	Reciproco della riluttanza Riluttanza/volume unitario; è reciproca della permeabilità

flusso, chiamata weber, non viene definita nei termini di forze fra poli, bensì come quel flusso che, cambiando uniformemente in un secondo, induce la tensione di un volt in una spira di filo conduttore. Tale unità di misura corrisponde a 10^8 «linee di flusso» CGS-EMU, o a 10^8 maxwell. Dal momento che la forza sviluppatasi fra i poli nel sistema di misura MKS deve eguagliare quella del sistema CGS, un fattore di 4π appare nelle tabelle di conversione delle unità MKS e CGS laddove compaiono delle forze.

La densità di flusso (B) è per definizione il flusso rapportato ad un'area unitaria. L'unità CGS-EMU per la densità di flusso (1 linea/cm²) è il gauss. Questa unità di misura è però spesso sostituita dal «tesla», unità di misura MKS che attualmente è riconosciuta quasi universalmente. Dal momento che 1 tesla è 1 weber/m²:

$$1 \text{ tesla} = \frac{1 \text{ weber}}{1 \text{ m}^2} = \frac{10^8 \text{ linee}}{10^4 \text{ cm}^2} = 10^4 \frac{\text{linee}}{\text{cm}^2} = 10^4 \text{ gauss.}$$

Forza magnetomotrice f.m.m. e forza di magnetizzazione (H)

Il flusso magnetico può «fluire» soltanto nel caso esista una sorta di «pressione magnetica», analoga alla corrente elettrica, la quale non fluisce se non esiste una sorta di «pressione elettrica»; tale pressione è la tensione, detta anche forza elettromotrice (f.m.m.); in analogia, la «pressione» magnetica è detta «forza magnetomotrice» (f.m.m., F). Le unità di misura della f.m.m. sono elencate nella Tabella 4.

Si noti che la f.m.m. (ampere-spire) è la forza di base (la «pressione»); H è invece il campo di forze risultante (f.m.m. / distanza, o ampere-spira/metro). Si noti che H è un «campo di magnetizzazione»; i termini «campo magnetico o campo di forza» risultano in questo caso più ambigui.

Riluttanza e permeabilità

Il flusso prodotto su di un dato materiale da una f.m.m. dipende dalla resistenza che il materiale stesso oppone al flusso, chiamata «riluttanza». Sebbene il flusso non «scorra» come la corrente elettrica — la relazione fra f.m.m., flusso e riluttanza magnetica è esattamente la stessa relazione che intercorre fra f.e.m. corrente elettrica e resistenza — esiste una «legge di Ohm» per il flusso magnetico che è assai simile alla legge di Ohm per la corrente elettrica.

f.e.m. (E) = IR (intensità di corrente x resistenza)

f.m.m. (F) = Φ R (flusso x riluttanza)

Ampere-spire = Weber x riluttanza (MKS)

Gilbert = linee x riluttanza (CGS)

Nella Tabella 5 sono elencate le unità di misura della riluttanza e della sua reciproca, la permeabilità. La permeabilità è analoga alla conduttività elettrica, ed è anzi l'indice della «conducibilità magnetica». Si noti che l'unità di misura della riluttanza (resistenza magnetica) è f.m.m./Flusso, o ampere-spire/weber (A/Wb). Sarà necessario, in futuro, dare un nome a questa importante unità di misura.

La riluttività è semplicemente la riluttanza (resistenza magnetica) di un volume unitario di materiale;

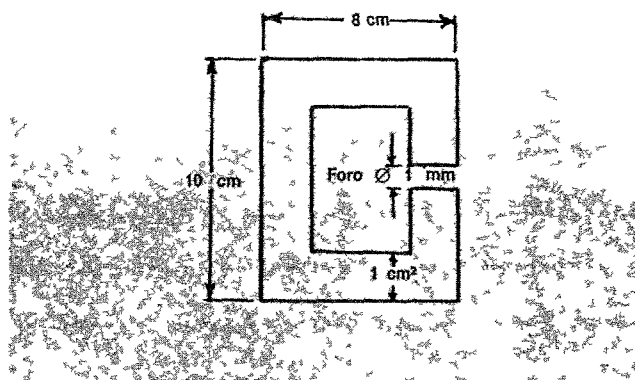


Fig 1 - Calcolo della riluttanza di un circuito in cui è presente un foro.

Raggio del foro = 10^{-3} m - Superficie del foro = 10^{-4} m² -
 Riluttanza $R = \frac{10^7}{4\pi} \cdot \frac{10^{-3}}{10^{-4}} = \frac{10^8}{4\pi} \frac{\text{ampere}}{\text{weber}}$

la permeabilità e la permeanza sono grandezze reciproche della riluttività e della riluttanza (allo stesso modo in cui conduttanza e conducibilità sono reciproche della resistenza e della resistività).

Calcolo della riluttanza (materiali magnetici)

La riluttanza di un circuito magnetico viene calcolata con lo stesso metodo e le stesse leggi utilizzate per determinare la resistenza di un circuito elettrico. Per determinare la resistenza di un filamento, se ne calcola la resistività, cioè la resistenza di un volume unitario di filo. Dal momento che il rame è il metallo conduttore più comunemente usato per i fili conduttori, è stata calcolata la resistenza di un filamento di rame di sezione e lunghezza opportuna; in tal modo, è possibile calcolare la resistenza di un filo di rame di qualsiasi dimensione moltiplicando tale fattore di resistenza per il numero di metri del filamento, e dividendo quindi il risultato ottenuto per la superficie della sezione del filo (la quale viene rapportata alla sezione unitaria del filamento-campione).

In modo analogo, se si desidera determinare la riluttanza di un circuito magnetico, ci si serve della riluttività, la quale è la riluttanza di un volume unitario del circuito. Il volume unitario è in genere il cen-

tometro cubo (le Tabelle forniscono i fattori di conversione per un eventuale passaggio al metro cubo)

La maggior parte dei circuiti magnetici sono composti di materiali magnetici (ferro e acciaio) la cui riluttività varia in modo assai irregolare a seconda della densità di flusso, cosicché non è facile tabularne i valori; come vedremo in seguito, vengono utilizzati diagrammi B/H, i quali forniscono permeabilità e riluttanza relativi ai campi H che interessano

Se in un circuito magnetico si include uno spazio d'aria, ed il circuito è costituito di materiali di scarsa riluttanza, la riluttanza dell'intero circuito sarà pressapoco quella dello spazio d'aria, dal momento che la riluttanza dell'aria è notevolmente superiore a quella di tutti i materiali magnetici. Il calcolo della superficie di aria sarà in pratica, equivalente al calcolo definitivo della riluttanza del circuito.

Per determinare la riluttanza di uno spazio di aria, occorre semplicemente moltiplicare la riluttanza dell'aria,

$$\frac{10^7 \text{ ampere-metro}}{4\pi \text{ weber}}$$

per la lunghezza dello spazio vuoto, dividendo poi tale risultato per l'ampiezza della sezione dello spazio vuoto. Si applica la formula. $R = l/\mu A$, ove $l =$ lunghezza dello spazio vuoto, $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$

Se si calcola la riluttanza del circuito magnetico (in acciaio) illustrato in fig. 1, si ottiene una riluttanza di circuito di $10^8/4\pi$ ampere/weber. In pratica, occorrerebbe perciò un prodotto NI di $10^8/4\pi$ per ottenere il flusso di un weber nel circuito. In un centimetro quadrato, un weber rappresenta un flusso la cui densità è di 10^4 weber/m², o 10 000 tesla, un campo magnetico cioè assai forte.

La densità di flusso magnetico derivata - B

La parola «campo» viene usata in modo ambiguo in molte tecnologie, e in particolare nel magnetismo. Un campo implica una «azione» (generalmente una forza); un campo elettrostatico si misura in newton/coulomb, oppure (per integrazione) in volt/metro; un campo magnetico è stato definito in origine come forza per polo unitario dato che allora non si conosceva l'esatta natura del magnetismo.

Sfortunatamente, è assai comune (anche se assai ambiguo) identificare una qualsiasi regione in cui vi

TABELLA - 6 Densità di flusso				
Simbolo	Definizione	Unità MKS	Unità CGS	Relazione
B	Densità di flusso risultante da un campo di forze magnetizzante $H B = \mu H$ $\Phi = \iint B dA$ flusso = B x Area	tesla, T (weber/m ²)	gauss (1 linea/cm ²)	1 tesla = 10 ⁴ gauss

TABELLA 7 - Parametri magnetici fondamentali			
Proprietà magnetica	Simbolo	Equazione caratteristica	Unità MSK
Forza magnetomotrice	F	$F = NI$	ampere-spira
Flusso	Φ	f.e.m. = $Nd \Phi / dt$	weber (1)
Riluttanza (resistenza magnetica)	R	$= \frac{F}{\Phi}$	ampere-spira/weber
Riluttività		Riluttanza/lunghezza unitaria	
Campo magnetizzante (induttore)	H	$H = dF/dl$	ampere-spira/metro
Densità di flusso (che deriva per induzione dal campo magnetizzante H)	B	$B = \mu H$ $\Phi = \iint B dA$ (flusso = B x Area)	tesla = weber/m ² = newton/ampere-m
Permeabilità	μ	$\mu = B/H$; inverso della riluttività	$\frac{\text{weber/m}^2}{\text{ampere-spira/m}} = \frac{\text{weber}}{\text{m-ampere-spira}}$
Permeanza		inverso della riluttanza	
Induttanza	L	henry = induttanza che produce una forza forza contro elettromotrice di 1V quando la corrente cambia al ritmo di 1 ampere/s.	weber-spira/ampere
Intensità di magnetizzazione	J	$B = \mu_0 (H + J)$ $J = xH$	ampere-spira/metro
Suscettibilità	x	J/H	priva di dimensioni

Note: 1 weber = joule/ampere = volt-s.
2 Permeabilità del vuoto (μ_0) = $4 \pi \times 10^{-7}$ joule/ampere²-m = $4 \pi \times 10^{-7}$ weber/ampere-m = $4 \pi \times 10^{-7}$ henry/m

sia del flusso magnetico in un «campo magnetico»; si ricordi che il termine «campo magnetico» viene comunemente usato in tre casi differenti:

1. La forza magnetizzante H
2. La densità di flusso B
3. Una qualsiasi regione che sia sede di un flusso magnetico.

Il termine «campo magnetico» viene dunque utilizzato in modo inesatto; per ridurre ogni ambiguità è meglio abituarci a distinguere e comprendere il significato esatto dei simboli «B» e «H». Il simbolo H indica un campo magnetizzante, o una forza magnetizzante. La densità di flusso derivata da tale forza magnetizzante (H) viene chiamata «induzione derivata» B. L'unità di misura MKS della densità di flusso è il tesla, o il weber/metro². La densità di flusso (B) che deriva da un campo magnetizzante induttore (H) dipende dalla permeabilità dell'ambiente, secondo la legge:

$$B = \mu H$$

Nell'aria risulta $\mu = 1$, $B=H$. Riassumendo, è opportuno ricordare che H è il simbolo relativo ad un campo magnetizzante, o induttore, mentre B è il simbolo al campo magnetico che ne deriva.

TABELLA 8 - Suscettibilità di alcuni materiali paramagnetici e diamagnetici e temperatura in cui è stata effettuata la misura di suscettibilità		
Sostanza	Temperatura in °C	x
Aria (gas)	20	0.037×10^{-5}
Alluminio	18	2.2×10^{-5}
Bismuto	18	$- 16.6 \times 10^{-5}$
Carbone (diamante)	20	$- 2.2 \times 10^{-5}$
(grafite)	20	$- 9.9 \times 10^{-5}$
Cerio	18	$130. \times 10^{-5}$
Rame	18	$- 0.96 \times 10^{-5}$
Cloruro ferrico	20	$306. \times 10^{-5}$
Elio (gas)	20	$- 0.000098 \times 10^{-5}$
Idrogeno (gas)	20	$- 0.00021 \times 10^{-5}$
Piombo	— 18	$- 1.7 \times 10^{-5}$
Mercurio	18	$- 3.2 \times 10^{-5}$
Ossigeno (liquido)	—219	$488. \times 10^{-5}$
(gas)	20	0.18×10^{-5}

**Definizione di un «campo magnetico (B)»
in termini di intensità di corrente (ampere)
e forza (newton)**

Ogni qual volta avviene un passaggio di corrente, si associa ad esso un campo magnetico (fig. 2). Un campo magnetico di questo genere esercita una attrazione magnetica nei riguardi di un secondo filamento in cui passi corrente elettrica, e questo a sua volta genera un campo di forze tali da produrre analogo effetto sul primo filamento. L'unità di misura MKS «ampere» può essere definita nei termini di forze magnetiche che si esercitano fra due conduttori in cui passi corrente elettrica (e si rende necessaria l'introduzione di una costante per mettere in relazione l'ampere così introdotto e quello in uso precedentemente). Dando ora una definizione precisa, se due filamenti paralleli

ed infiniti distanti un metro sono percorsi da una corrente elettrica la cui intensità vale un ampere, si genera una forza magnetica la quale vale, nel vuoto, esattamente 2×10^{-7} newton per ogni metro di lunghezza del filo. La costante 2×10^{-7} è appunto scelta per uniformarsi alla precedente definizione di ampere

Dal momento che un ampere viene definito nei termini di forze d'interazione fra filamenti paralleli, ne segue che un campo magnetico B possa essere definito come quel campo che esercita una forza di 1 newton su di un metro di filo elettrico su cui circola la corrente di un ampere; la relazione che ne segue è $F = BI$ ove F è la forza esercitata su di un filo di lunghezza l su cui circola corrente I nel campo magnetico B. Ciò permette di associare a B le unità di misura newton/ampere-metro, e risulta:

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ weber/m}^2 = 1 \text{ newton/ampere-m}$$

Nella Tabella 9 sono elencate le equazioni di base che descrivono le forze ed i campi di forze dovuti alle correnti elettriche.

Il cambio delle unità di misura

Come è già stato ricordato, il punto di partenza nella descrizione dei fenomeni magnetici è stata in origine la seguente relazione, che esprime la forza sviluppata fra poli unitari:

$$F = k \frac{\text{mm}^1}{r^2} \quad (\text{sistema CGS})$$

$$F = \frac{1}{4 \pi \mu_0} \frac{\text{mm}^1}{r^2} \quad (\text{sistema MKS})$$

ove μ_0 esprime la permeabilità nel vuoto; la costante k (la quale include un fattore di permeabilità) è unitaria nel sistema CGS-EMU. La costante $4 \pi \mu_0$ è stata introdotta per la necessità di uniformare le forze quando si è passati dalla linea al weber come unità di misura del flusso. I primi sperimentatori (Oersted, Ampère, Weber, Coulomb) hanno scoperto gli effetti delle forze dovute al magnetismo ben prima di scoprire gli effetti dovuti alla f.e.m. indotta; ciò perché tali effetti si manifestano solo quando il flusso cambia, e questo fatto è rimasto oscuro per molte decenni. Così le prime unità di misura erano di tipo statico; successivamente, scoperti gli effetti della f.e.m. indotta, è risultato assai pratico definire quale unità di misura di flusso, quel flusso che induce la tensione di un volt in una spira di conduttore cambiando uniformemente in un secondo.

Dopo la definizione del weber, è stato necessario introdurre un fattore di conversione di 4π per passare dagli oersted (unità di misura CGS per H e dai gilbert (unità di misura CGS per f.m.m.) alle unità di misura del Sistema Internazionale (rispettivamente l'ampere-spira/weber e l'ampere-spira). I fattori di conversione sono elencati in Tabella 4.

La densità di flusso (B) dovuta all'esistenza di un campo di forze magnetizzante (H) dipende dalla permeabilità del mezzo, secondo la legge $B = \mu H$. Ricaviamo da ciò $\mu = B/H$, ove μ si esprime in weber/metro-ampere-spira. Per semplificare l'utilizzazione di

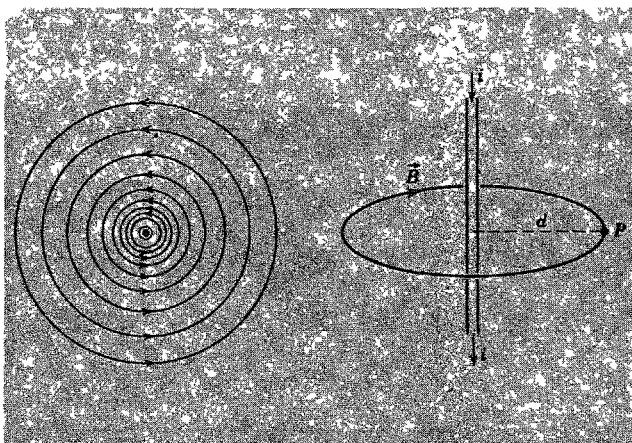


Fig 2/A - Campo magnetico generato da un filo in cui circola corrente. Un ampere produce un campo magnetico di 2×10^{-7} tesla ad 1 metro dal filo, ed esercita una forza di 2×10^{-7} newton su di un secondo filo uguale ad esso; cioè un campo di 1 tesla esercita la forza di 1 newton su di 1 metro di filo elettrico in cui circola corrente di intensità 1 ampere

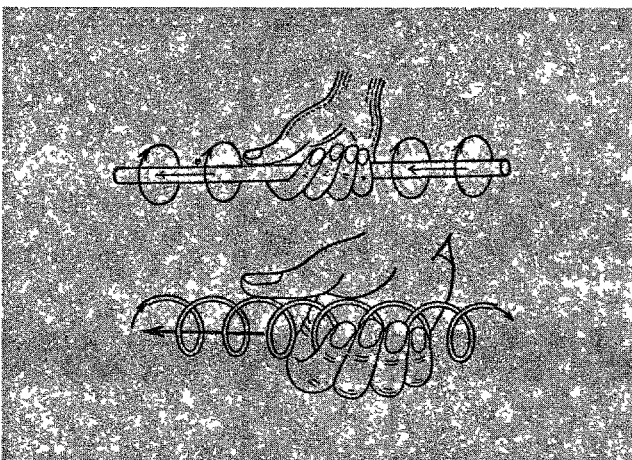


Fig 2/B - «La regola della mano destra» può essere utilizzata per determinare la direzione del campo H attorno al filo nel quale passa corrente (sopra) e la direzione del campo all'interno del filo elettrico a spirale nel quale passa corrente (sotto)

questo dato, si è ricorso alla permeabilità relativa, che rappresenta il rapporto fra la permeabilità del mezzo e quella del vuoto, e perciò è un numero puro. La permeabilità relativa (μ_r) è assai prossima all'unità nell'aria e in altre sostanze non magnetiche; nei materiali non magnetici, essa può essere anche 10^4 , e dipende anche dalla densità di flusso

I materiali in cui la permeabilità relativa è minore di uno si dicono «diamagnetici», quelli in cui tale permeabilità è superiore a 1 si dicono «paramagnetici», quelli infine in cui la permeabilità è di gran lunga superiore all'unità e dipende dalla densità di flusso si dicono ferromagnetici.

Nella tabella 7 sono elencate le unità di misura di cui si è trattato finora

Suscettibilità e permeabilità

Quando un materiale magnetico viene introdotto in un campo magnetico (H), si nota un aumento della densità di flusso (B) in prossimità del materiale. La spiegazione per questo fenomeno è la seguente: il campo magnetico induttore (H) ha provocato l'allineamento dei momenti magnetici degli atomi del materiale magnetico (i quali sono, a tutti gli effetti, simili a dei piccoli magneti), in modo da aumentare l'effetto magnetico. L'intensità di magnetizzazione (J) tiene conto di tali momenti magnetici (ed è in effetti una misura del numero e dell'orientamento di questi piccoli magneti).

La densità di flusso risultante (B) quando un materiale magnetico viene introdotto in un campo (H) viene perciò espressa dall'equazione:

$$B = H + 4 \pi J,$$

ove J rappresenta l'intensità di magnetizzazione; l'equazione è relativa al sistema CGS, e si trasforma nella:

$$B = \mu_0 (H + J) \text{ nel sistema MKS}$$

Nel vuoto, ove J è nullo, risulta $B = \mu_0 H$

In un toroide si ha:

$$H = \frac{NI}{2 \pi r}$$

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2 \pi r} + J$$

La suscettibilità magnetica viene definita semplicemente dal rapporto adimensionale J/H ; essa esprime il rapporto fra l'intensità della magnetizzazione indotta nel materiale e l'intensità del campo di forze magnetico-induttore che ha prodotto tale magnetizzazione. Se si eccettuano i materiali ferromagnetici, J è proporzionale ad H , e perciò la suscettibilità magnetica (χ) è una costante (vedi Tabella 8). Si noti che χ risulta essere positiva per i materiali paramagnetici e negativa per quelli diamagnetici. Dal momento che la suscettibilità magnetica dipende fortemente dalla temperatura nei materiali paramagnetici, le tavole forniscono anche la temperatura in cui χ è stata misurata.

Essendo $\chi = J/H$, $B = \mu_0 (H + J)$ risulta:

$$B = \mu_0 (H + \chi H) = \mu_0 H (1 + \chi)$$

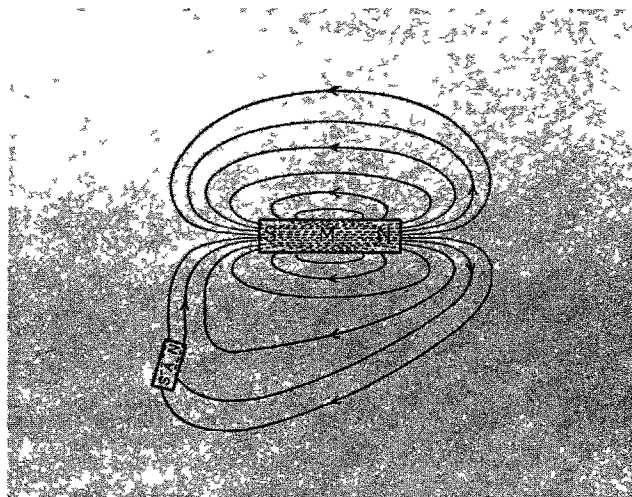


Fig. 3 - I materiali ferromagnetici, introdotti in un campo magnetico, si magnetizzano aumentando l'intensità del campo circostante il materiale

TABELLA 9 - Equazioni in uso corrente per le misure magnetiche

Massima forza in un filo di lunghezza l in un campo B , in cui circola corrente I

$$F = BIl$$

Campo magnetico ad una distanza r da un conduttore rettilineo sufficientemente lungo

$$B = \mu_0 I / 2 \pi r$$

Forza fra due fili paralleli rettilinei posti a distanza r l'uno dall'altro, di lunghezza l , che portano correnti I_1 e I_2 (tecnica che permette la definizione dell'ampere)

$$F = \mu_0 I_1 I_2 l / 2 \pi r$$

Campo magnetico nel centro di un paio di avvolgimenti Helmholtz, N spire per ciascun avvolgimento, raggio dell'avvolgimento r

$$B = 8 \mu_0 NI \sqrt{125} r$$

Campo magnetico nel centro di un lungo solenoide di lunghezza l , N spire

$$B = \mu_0 NI / l$$

Campo magnetico di un toroide di raggio r

$$B = \mu_0 NI / 2 \pi r$$

f e m indotta in un anello rettangolare di N spire, di lunghezza attiva l , in un campo B , in moto con velocità v formando un angolo Θ con il campo

$$E_L = 2NBlv \sin \Theta$$

f e m indotta in un anello rettangolare di N spire, area A , ruota a frequenza f

$$E_{max} = 2 \pi f NBA$$

Induttanza di un toroide di area A , lunghezza l ($= 2 \pi r$), N spire

$$L = \mu_0 AN^2 / 2 \pi r$$

Energia in un campo magnetico in aria, con corrente I

$$W = L \int I dI = LI^2 / 2$$

Carica totale (Q) in una bobina di rilievo per galvanometro balistico con N spire e resistenza R

$$Q = N (\Delta \phi) / R$$

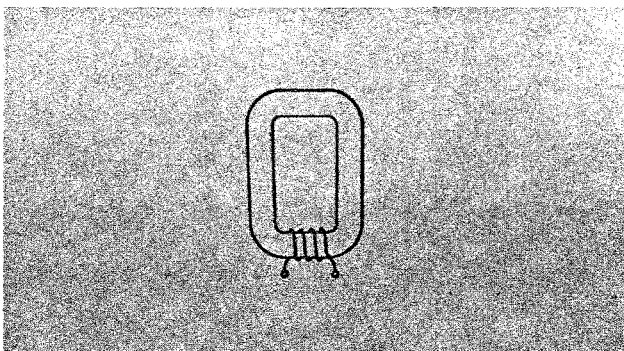


Fig. 4 - Un elettromagnete si ottiene da un forte campo indotto in un materiale ferromagnetico mediante la corrente in una bobina.

ed essendo poi, per definizione, $B = \mu H$, si vede subito che è:

$$\mu = \mu_0 (1 + x)$$

Da quanto detto precedentemente, risulta poi evidente la dipendenza di μ dalla temperatura nei soli materiali paramagnetici e ferromagnetici, e non nei materiali diamagnetici. Dal momento che la permeabilità

relativa è stata definita come: $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ ne segue che $\mu_r = 1 + x$ $x = \mu_r - 1$.

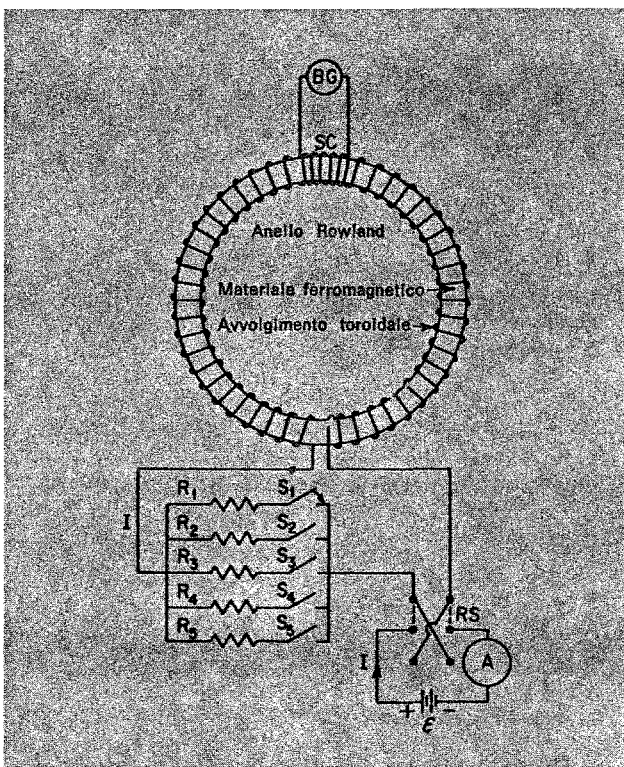


Fig. 5 - Un circuito ad anello Rowland viene utilizzato per la determinazione delle curve di isteresi di un materiale ferromagnetico. Il campo H viene calcolato conoscendo la corrente circolante nell'avvolgimento e le dimensioni dell'avvolgimento stesso; B viene misurato mediante galvanometro balistico.

Un esempio numerico chiarificatore

In figura 5 è illustrato un toroide di 900 spire (detto anche anello di Rowland, perché fu da questi utilizzato nei suoi esperimenti) il cui raggio misura 15 cm, la cui sezione è 3 cm^2 , in ferro. Quando si chiude il circuito, una corrente di 0,0292 ampere passa nel filo. Il galvanometro registra una variazione di flusso di $10,5 \times 10^{-6} \text{ Wb}$. Si vuole calcolare:

- 1) LA DENSITA' DI FLUSSO
 $B = \Phi / A = 3,50 \times 10^{-2} \text{ Wb/m}^2$
- 2) L'INTENSITA' DI CAMPO MAGNETICO nel ferro $H = NI/2 \pi r = 27,9 \text{ ampere-spire/m}$
- 3) LA PERMEABILITA' DEL FERRO
 $\mu = B/H = 1,26 \times 10^{-3} \text{ Wb/ampere-m}$
- 4) LA PERMEABILITA' RELATIVA
 $\mu_v = \mu/\mu_0 = 1,26 \times 10^{-3}/4 \pi \cdot 10^{-7} = 1000$
- 5) LA SUSCETTIBILITA' MAGNETICA DEL FERRO $x = \mu_v - 1 = 999$
- 6) L'INTENSITA' DI MAGNETIZZAZIONE
 $J = x H = 999 \times 27,9 = 27 \cdot 872 \text{ ampere/m}$

Forza elettromotrice indotta f.e.m.

Una f.e.m. (E_i) viene indotta in un circuito ogniqualvolta vi è una variazione nel flusso magnetico. Tale fatto è espresso dalla relazione $E_i = -N \frac{d\Phi}{dt}$, ove

E è espresso in volts, $\frac{d\Phi}{dt}$ in weber/secondo, N è il

numero di spire. Se Φ è espresso in maxwell (linee),

la relazione diviene $E_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \times 10^{-8}$, dato che

1 linea = 10^{-8} weber.

La f.e.m. (espressa in volt) indotta su di un filo dritto di lunghezza L (metri) che si muove con velocità v (metri/secondi) in direzione perpendicolare al campo magnetico (B) è espressa dalla legge:

$$E_i = BLv$$

ove B , logicamente, viene espresso in weber/m²; se invece fossero espressi B in linee/cm², L in cm, e v in cm/s, sarebbe allora:

$$E = BLv \times 10^{-8}$$

Le f.e.m. nell'avvolgimento primario e secondario di un trasformatore stanno fra loro nella seguente relazione:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

L'efficienza di un trasformatore è data dal rapporto delle potenze, $E_s I_s / E_p I_p$.

L'induttanza L (coefficiente di auto-induttanza) viene definito da: $E_i = -L \frac{dI}{dt}$; l'induttanza di un henry ha per definizione un volt indotto quando la corrente cambia ad 1 amp/s.

L'auto-induttanza

Per definizione, la tensione indotta in una spira dovuta al cambio di flusso è

$$E_i = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

L'autoinduttanza L di una spira viene definita come

$$E_i = -L \frac{dI}{dt}$$

ove I rappresenta la corrente che circola nella spira

Perciò si ha:

$$L \frac{dI}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt}$$

da cui, tramite integrazione, si ottiene.

$$LI = N\Phi + K$$

Se si verifica che sia $I = 0$ $\Phi = 0$, ne segue che anche $K = 0$, e che $LI = N\Phi$ cioè $L = N\Phi/I$.

Auto-induttanza in un toroide

In tutti gli induttori vale la relazione

$$I = N\Phi/l$$

In un toroide:

$$\Phi = BA = \mu HA$$

$$H = NI/2\pi r$$

Ne segue

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{N(\mu HA)}{I} = \frac{N(\mu A) NI}{I(2\pi r)} = \frac{\mu AN^2}{2\pi r}$$

Se il materiale costituente è paramagnetico o diamagnetico, μ è una costante e L può essere calcolato come un induttore di auto-induttanza nota.

Un generatore di induzione

I generatori elettrici (vedi fig. 7) utilizzano nodi di filo conduttore che vengono fatti ruotare in un forte campo magnetico. La f.e.m. indotta su di una parte attiva del nodo (tratti ab o cd) illustrato in figura 7 si ricava dalla formula:

$$E = BvL \sin\theta,$$

dal momento che i lati attivi sono due, si ricava:

$$E = 2 BvL \sin\theta;$$

se poi vi sono N spire, risulta:

$$E = 2 NBvL \sin\theta$$

Se la frequenza di rotazione è f (giri completi/secondo) e se A è l'area del nodo, la massima f.e.m. possibile, che si verifica in corrispondenza di un angolo θ di 90° (come quello illustrato in figura 7) è:

$$E_{\max} = 2\pi fNBA$$

Le equazioni di base che sono in uso nella tecnologia del magnetismo sono elencate nella Tabella 9.

Permeabilità dei materiali ferromagnetici

Come è già stato visto, la permeabilità (μ) di un materiale può essere definita nei seguenti tre modi: (1) B/H ; (2) permeabilità relativa ($\mu_r = \mu/\mu_0$); (3) in termini di suscettibilità, $\mu_r = 1 + \chi$. Si noti che la permeabilità relativa dei materiali paramagnetici è di poco superiore all'unità, mentre quella dei materiali diamagnetici è di poco inferiore all'unità, e quella dei materiali non magnetici è esattamente l'unità

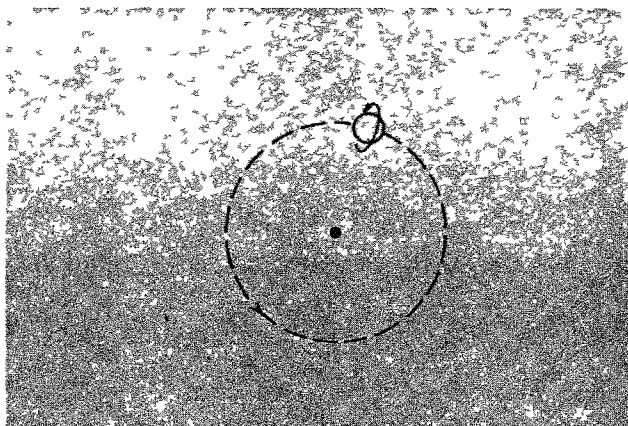


Fig 6 - Gli elettroni in un atomo non solo orbitano attorno al nucleo, ma ruotano su se stessi, il momento magnetico risultante è un vettore somma del momento magnetico orbitale e di spin

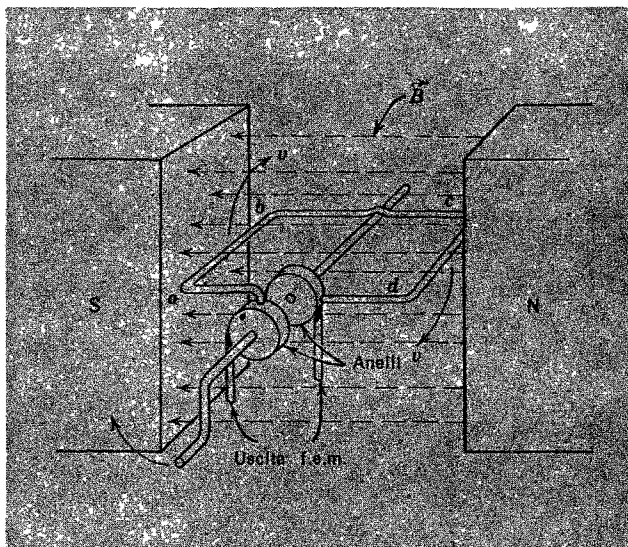


Fig 7 - Se un anello di filo conduttore (abcd) viene ruotato all'interno di un campo magnetico (B), i lati ab e cd presentano f.e.m. indotta. Un giro dell'anello produce un ciclo di una sinusoide

TABELLA 10 - Parametri ferromagnetici

H_s	= forza magnetizzante di saturazione
B_s	= induzione di saturazione
B_r	= induzione residua
H_c	= forza coercitata
H_{cs}	= coercività (forza coercitiva necessaria dopo la saturazione)
B_{rs}	= retentività o rimanenza (induzione residua dopo la saturazione)
μ	= permeabilità normale
B_d	= coordinata B nel quadrante di demagnetizzazione
H_d	= coordinata H nel quadrante di demagnetizzazione

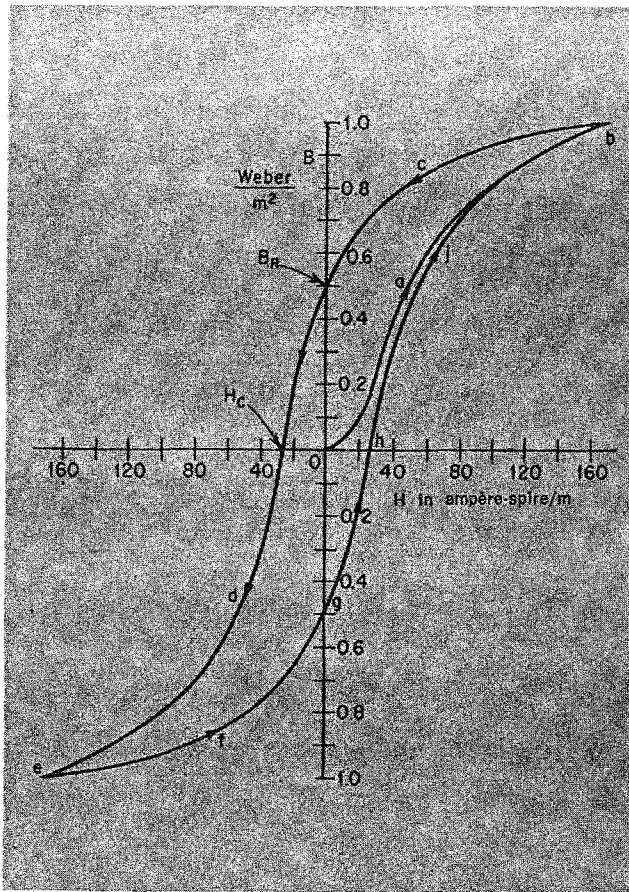


Fig. 8 - Curva di magnetizzazione e normale anello d'isteresi per un campione di acciaio al silicio.

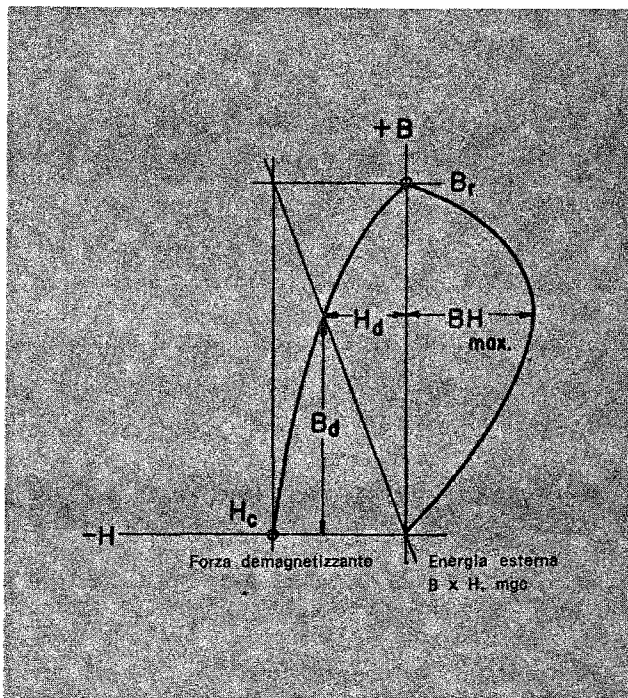


Fig. 9 - Prodotto di B_d e H_d (coordinate della curva di demagnetizzazione); si ottiene la curva del prodotto di energie (BH).

Tuttavia, la permeabilità dei materiali ferromagnetici è una funzione assai complicata di H , come viene illustrato nel diagramma in figura 8, che esprime B in dipendenza di H . Tale curva viene realizzata servendosi di un toroide (ad esempio, quello in fig. 5) e di una bobina di riferimento. Essa viene collegata ad un galvanometro balistico, mentre H viene calcolato in base alle dimensioni note della bobina e alla corrente elettrica, facilmente misurabile; B viene dedotto dal galvanometro.

Se il materiale non è inizialmente magnetizzato, si ha $B = 0$ se $H = 0$. Lungo la curva di magnetizzazione iniziale (a) B cresce in modo non lineare con H fino a che il materiale non si satura; a questo punto, un aumento di H non produce alcuna sensibile crescita di B . Il campo magnetico richiesto per raggiungere la saturazione viene indicato con H_s (vedi Tabella 10). Una crescita ulteriore di H si tradurrebbe in una crescita di B solo secondo la proporzione $\mu_0 H$, e non quella μH . In altri termini, la permeabilità si riduce ad 1 quando viene raggiunta la saturazione, e $B = H$. La crescita di B dopo la saturazione è dunque lineare.

Se il campo H viene ora riportato allo zero, si scopre una residua magnetizzazione del materiale ($B = B_r$ per $H = 0$). B_r viene chiamato «induzione residua» (retentività). Un materiale permanentemente magnetico ha una elevata retentività.

La forza magnetizzante (H) necessaria per ridurre a zero B viene chiamata H_c , o «forza coercitiva». Un materiale permanentemente magnetico deve essere dotato di una forza coercitiva assai alta, in modo da

TABELLA 11 - Produzione annua di materiali magnetici (in libbre)

Alnico	10.000.000
Ferrite	450.000
Remalloy	450.000
Cunife	100.000
Acciai martensitici	100.000
Tutti gli altri	80.000
Applicazioni Industriali	
Altoparlanti	45%
Dispositivi elettronici	14%
Magneti	12%
Comunicazioni	10%
Misuratori e strumenti	7%
Motori e generatori	3%
Altre	9%
	<hr/> 100%

TABELLA 12 - Caratteristiche di due materiali ALNICO		
Composizione chimica	Alnico 1	Alnico 5
Nickel	20	14
Alluminio	12	8
Cobalto	5	24
Titanio	—	—
Rame	—	3,2
Proprietà meccaniche		
Resistenza alla tensione (psi)	4,100	5,400
Durezza Rockwell	C 45	C 50
Proprietà elettriche		
Resistività (microhm/cm/cm ² a 25° C)	75	47
Proprietà magnetiche		
H massimo (oersted)	2,000	3,000
Induzione di punta, B (gauss)	12,350	16,500
Induzione residua, B _r (gauss)	7,300	12,600
Forza coercitiva, H _c (oersted)	440	600
Prodotto massimo di energia (B _r H _c) m.g.o.	1,4	5,0
Coefficiente di espansione lineare (20-120°C)	11,9 x 10 ⁶	11,5 x 10 ⁶
(20-220°C)	12,1 x 10 ⁶	11,5 x 10 ⁶
(20-300°C)	12,6 x 10 ⁶	11,6 x 10 ⁶
Punto Curie, gradi C (+10°C)	780	890
Calore specifico (30-400°C) calore per g per grado °C	—	0,11

non perdere la sua magnetizzazione in presenza di un campo debole.

La retentività (B_{rs}) e la coercitività (H_{cs}) sono i massimi possibili valori rispettivamente per l'induzione residua e la forza coercitiva di un dato metallo ferromagnetico. La retentività viene anche detta «rimanenza»; il flusso che permane quando H = 0 viene chiamato «flusso rimanente».

La porzione di curva che giace nel secondo quadrante (fra B_r e H_c) è nota come «curva di demagnetizzazione» (vedi fig. 9). I punti lungo questa curva vengono detti B_d e H_a, mentre il prodotto B_dH_a è il «prodotto delle energie» corrispondente a tali punti. La curva del prodotto delle energie (anch'essa in fig. 9) è assai importante nello studio dei magneti permanenti.

Materiali permanentemente magnetici

I materiali magnetici di larga utilizzazione industriale sono principalmente due: (1) le leghe Alnico e (2) i magneti ceramici basati sulla ferrite di bario.

Nella Tabella 11 viene riportata la produzione annuale di tali materiali e se ne elencano le possibili applicazioni industriali. Nella maggior parte di essi è presente una percentuale di ferro; vi sono tuttavia talune leghe prive di ferro, quali il Cunico (lega di rame-nichel-cobalto), il Silmanal (argento-manganese-alluminio) e le leghe di platino (platino-cobalto).

La tabella 12 illustra composizione e proprietà dei materiali Alnico, leghe i cui principali componenti sono l'alluminio, il nichel, il cobalto e il ferro.

MAGNETISMO E MISURE MAGNETICHE

seconda parte - a cura dell'Ing. M. COLOMBO

Nella prima parte di questo articolo si è trattato il magnetismo dal punto di vista teorico, definendone le principali unità di misura ed illustrando le relazioni che intercorrono fra le varie grandezze. In questa seconda parte vengono illustrati gli strumenti che permettono di effettuare misurazioni pratiche.

Lo strumento di misura magnetica più semplice è senza dubbio l'ago magnetico o «compasso magnetico» (in fig. 10). Questa tecnica di misura si basa su di un principio assai semplice, cioè il confronto della forza magnetica di un campo incognito con quella di un campo noto. La sola caratteristica richiesta per questo magnetometro è di non presentare torsione, proprio come un compasso ordinario.

Il campo noto (nel punto centrale del compasso) potrebbe essere la componente orizzontale del campo terrestre (0,2 gauss). Se il campo sconosciuto è esattamente a 90° rispetto a quello terrestre, l'ago del compasso si porta a 45° qualora il magnete ignoto produca una intensità di flusso di 0,2 gauss nel punto centrale del compasso.

I valori di densità di flusso corrispondenti ad un qualunque angolo di deflessione fra 0° e 90° possono essere determinati utilizzando la formula $B_u = B_k \tan \theta$, ove B_u indica la forza del campo di un magnete sconosciuto posto al centro del compasso, B_k indica la forza del campo noto. La precisione è assai ridotta (5-10% di errore), ma il metodo è assai semplice ed economico.

Gaussmetro a magnete permanente (teslameter).

Il gaussmetro a magnete permanente (o teslameter, come verrà chiamato in futuro) viene illustrato in fig. 11 e 12. Esso è assai semplice e permette una discreta precisione ($\pm 5\%$ dell'intera scala). Un piccolo magnete dotato di grande forza coercitiva (generalmente silmanal) viene collegato ad un'asta collegata a sua volta ad un indicatore; una molla ad elica viene poi affrancata all'asta.

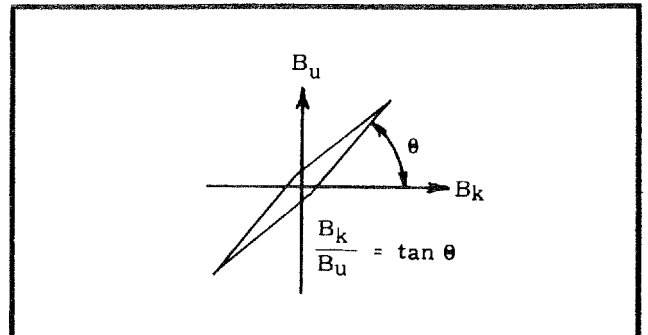


Fig. 10 - Un semplice compasso può essere utilizzato per misurare un campo magnetico ignoto (B_u) con uno noto (B_k).

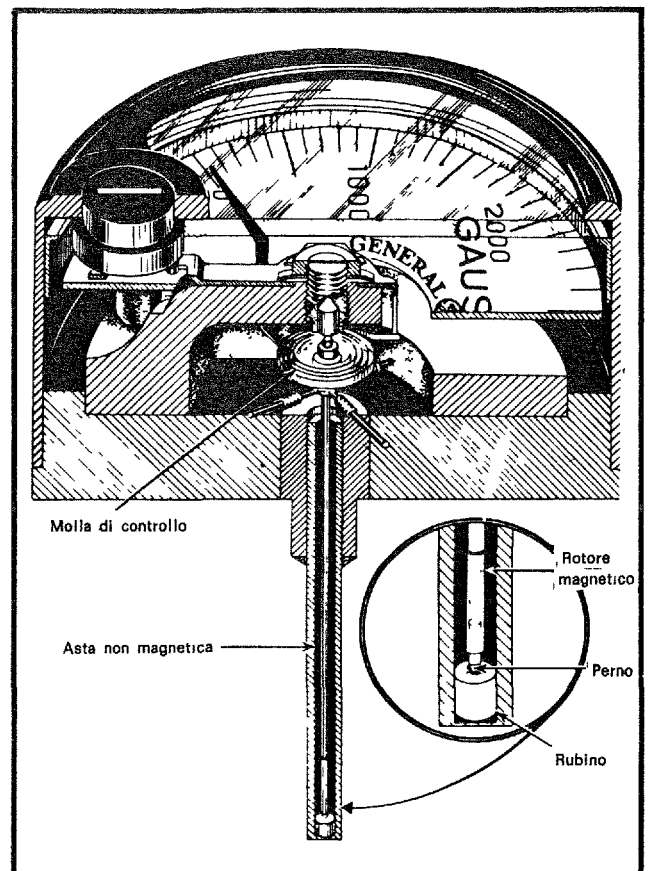


Fig. 11 - Il gaussmetro a magnete mobile.

Durante il funzionamento, l'asta col magnete viene posta nel campo magnetico da misurare, e l'intero apparecchio di misura viene ruotato fino ad ottenere la massima lettura sulla scala, che corrisponde al campo sottoposto a misurazione

La misura viene fornita in gauss, ed in futuro essi verranno sostituiti dai tesla

Galvanometro balistico

Se un impulso di corrente di breve durata raggiunge un galvanometro a bobina mobile il cui periodo è assai più lungo della durata dell'impulso, lo spostamento dell'indicatore costituisce la misura dell'integrale della corrente ($\int i dt$), il quale è espresso in coulomb, Q, per definizione. L'azione di un galvanometro può essere perciò caratterizzata nei termini della sua «sensibilità di coulomb»

Se una bobina di rilevazione viene collegata ad un galvanometro a lungo periodo e viene mossa rapidamente in un campo magnetico, la variazione di flusso nella bobina produce un impulso f e m, il conseguente salto sull'indicatore del galvanometro sarà proporzionale alla variazione di flusso integrato, il quale è per definizione l'integrale della f e m indotta ($\int e dt = N \Delta \phi$, ove N indica il numero di spire della bobina). Qualora sia nota l'area della bobina di rilevazione ed il numero delle sue spire, è possibile misurare la densità di flusso, su tale principio si basa il misuratore di flusso a galvanometro balistico illustrato in fig 13

Misuratore di flusso

Il misuratore di flusso (fig 14) può essere semplicemente schematizzato come un galvanometro (preferibilmente balistico) privo di molle frenanti. La deflessione dell'indicatore viene opposta solo da un misuratore di f e m inserito ogni qual volta la bobina di rilevazione si muove in un campo magnetico. L'indicatore si mantiene in posizione di deflessione massima fino a che non viene riportato manualmente a zero

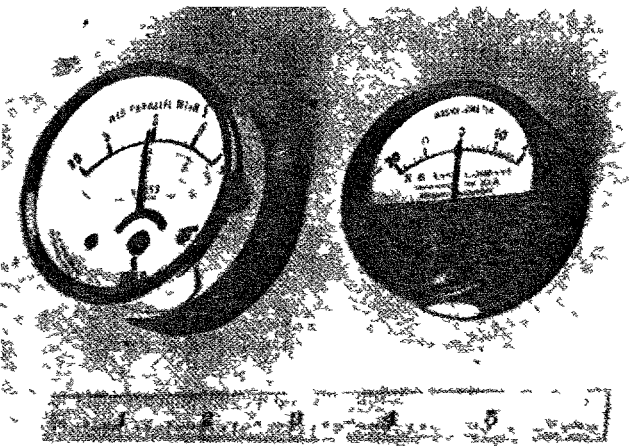


Fig 12 Magnetometro tascabile a magnete mobile (R B Annis Co)

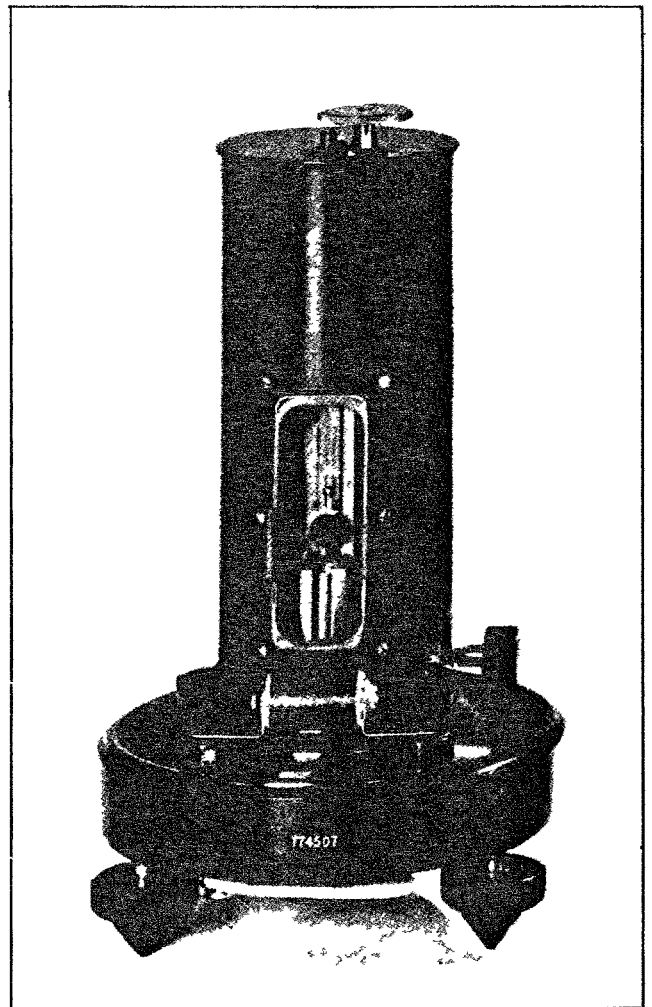


Fig 13 Galvanometro balistico (Leeds & Northrup)

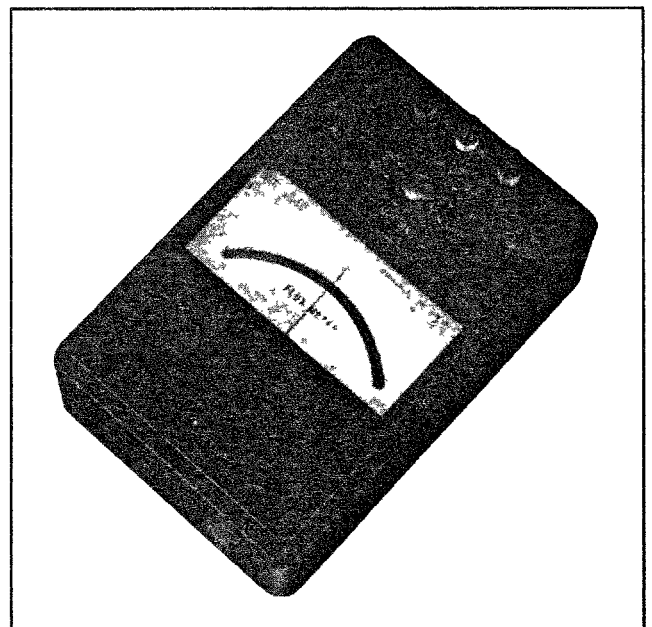


Fig 14 Misuratore di flusso elettronico che utilizza un amplificatore integrato «solid state» (Yewtec corp)

Le misure effettuate mediante misuratore di flusso sono preferibili a quelle operate mediante galvanometro balistico. Quando si utilizza quest'ultimo, la scarica della bobina di rilevazione deve essere completata prima che il galvanometro inizi ad operare, e la deflessione del galvanometro deve essere rilevata velocemente, «in corsa», prima che esso torni a zero. Dal momento che nel misuratore di flusso non vi sono forze di ritorno apprezzabili, la deflessione risulta virtualmente indipendente dalla velocità di immissione della bobina di rilevazione, e l'indicatore si mantiene, con piccole oscillazioni, per un certo periodo di tempo, sul massimo di deflessione.

La sensibilità può aumentare utilizzando una bobina di rilevazione con un numero di spire superiore; si può ottenere una precisione dello 0,2%.

Utilizzazioni particolari del misuratore di flusso

Il misuratore di flusso può essere utilizzato quale misuratore calibrato di coulomb. Se una scarica attraversa uno shunt di bassa resistenza, non induttivo, si ha: coulomb scaricati, $Q = DK/R$ ove D rappresenta la deflessione del misuratore di flusso, K i weber per divisione del misuratore di flusso, R la resistenza dello shunt in ohm.

Il misuratore di flusso può anche indicare il numero di spire (incognito) di una bobina. Se una bobina dotata di N_1 spire ed una seconda bobina il cui numero di spire, N_2 sia noto, vengono poste su di una pista magnetica chiusa, come illustrato in fig. 15, e se due correnti A_1 e A_2 vengono indirizzate attraverso questi avvolgimenti, il flusso nel materiale dovuto ad entrambi gli avvolgimenti è proporzionale ad $A_1 N_1$ e $A_2 N_2$. Disponendo le due correnti in modo tale che sia medesima la deflessione di un misuratore di flusso tanto per $A_1 N_1$ che per $A_2 N_2$, si ha:

$$\begin{aligned} A_1 N_1 &= A_2 N_2 \\ N_1 &= A_2 N_2 / A_1 \end{aligned}$$

Voltmetro di flusso

Il «voltmetro di flusso», il cui schema è illustrato in fig. 17, viene comunemente utilizzato per misurare la densità di flusso B degli avvolgimenti di un trasformatore, dato che la densità di flusso indotta in un materiale è proporzionale al valore medio dei semicicli positivi e negativi della tensione.

Uno dei tests più indicativi per la scelta del materiale magnetico per un trasformatore è la «misura della perdita di materiale»: in fig. 18 si illustra lo schema che permette di effettuare tale misura mediante alcuni strumenti elementari. Il materiale che viene provato viene generalmente ridotto alla forma di strisce (3x28 cm) inserite in una struttura Epstein.

Gaussmetro a bobina ruotante

Una notevole quantità di strumenti di misura dei campi magnetici si basa sulle bobine ruotanti. In figura 19 si illustra una spira rotonda che viene fatta ruotare in continuità su di uno dei suoi diametri me-

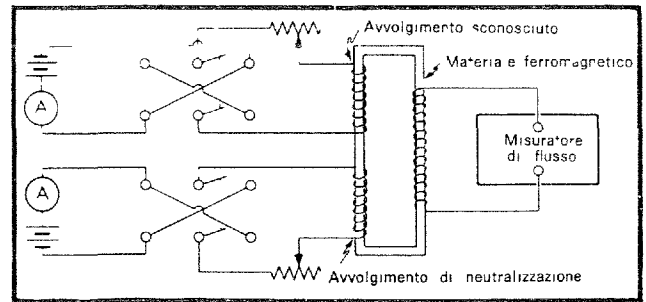


Fig 15 - Utilizzazione del misuratore di flusso per misurare il numero di spire di un avvolgimento non noto

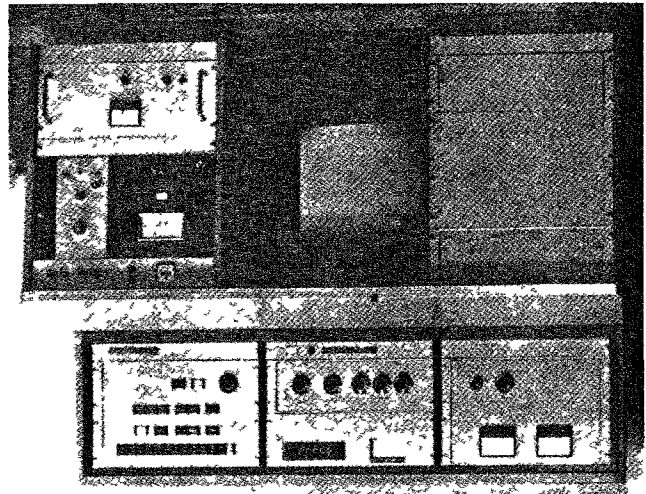


Fig 16 - Strumentazione automatica per la misura di perdita di materiale (Yewtec Corp)

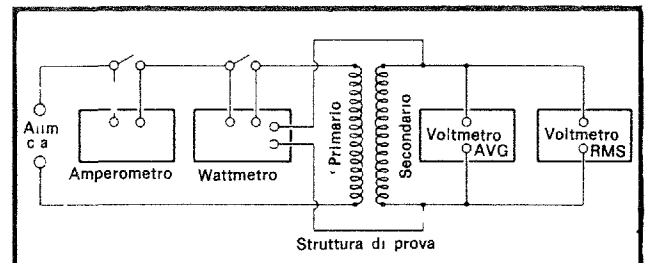


Fig 17 - Utilizzando il voltmetro a flusso ed un voltmetro tarato in valori efficaci si può misurare la perdita di materiale

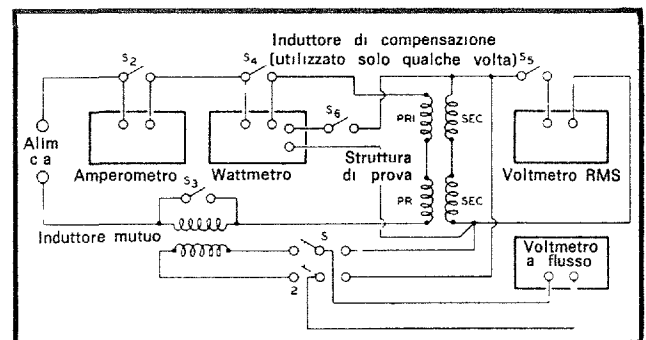


Fig 18 - Un altro circuito che permette di effettuare la misura di perdita di materiale con il voltmetro a flusso

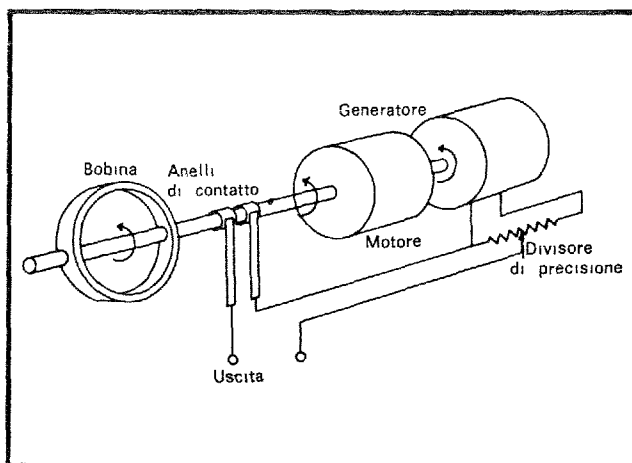


Fig 19 - Gaussmetro a bobina ruotante (Rawson)

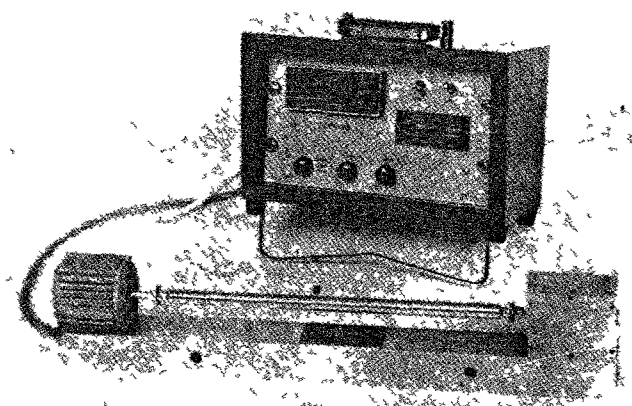


Fig 20 - Un gaussmetro a bobina ruotante può avere una precisione dello 0,01%. Il modello illustrato è l'unico tipo resistente alle radiazioni (Rawson)

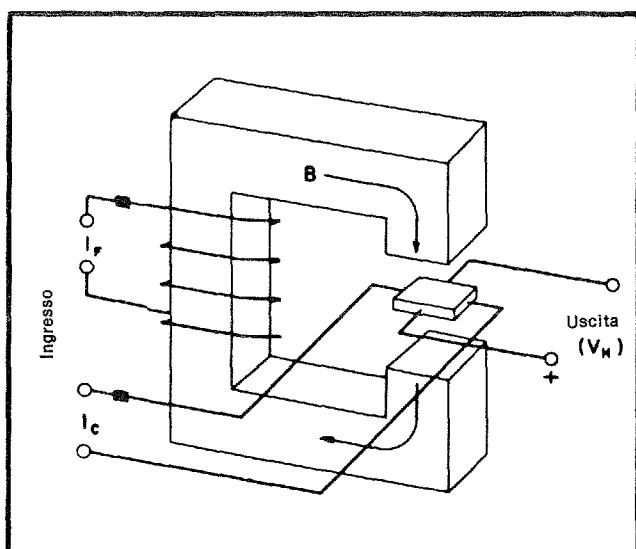


Fig 21 - L'elemento Hall e un sottile tassello di materiale (spesso si utilizza l'arseniuro di indio) posto in un campo magnetico in modo tale che il piano risulti perpendicolare al campo stesso. Una corrente longitudinale (I_c) attraverso il materiale produce una tensione trasversale (V_H) proporzionale ad H

dianete un motorino. Se il campo H è uniforme e perpendicolare all'asse, e la rotazione avviene con una frequenza fissa di f cicli al secondo, la tensione di uscita è $V = (NAH) (2 \pi f) \cos (2 \pi ft)$

Si noti che questa è una tensione a corrente alternata con frequenza f e ampiezza proporzionale alla velocità di rotazione.

Se la bobina viene guidata da un motorino sincro 1800-g/min, si ottiene una velocità di rotazione sensibilmente costante, dato che la frequenza delle reti di alimentazione è controllata con una percentuale di oscillazione inferiore allo 0,1%.

Se si confronta questo metodo a bobina ruotante con i precedenti metodi (misuratore di flusso, galvanometro balistico), osserviamo che si deriva un'energia molto maggiore dal campo magnetico mediante una bobina di dimensioni inferiori.

La possibilità di ottenere buone misure in un campo magnetico distorto costituisce poi un altro notevole vantaggio di questo tipo di gaussmetro. Se il campo non è uniforme, la tensione non si tradurrà in un'onda sinusoidale perfetta, ma la tensione media potrà fornire una buona approssimazione del campo al centro della bobina.

In figura 20 è illustrato un tipico strumento. La bobina è sottile, con molte spire, ed è collocata all'interno dell'estremità del lungo braccio-sonda.

La lunghezza del braccio è dovuta alla sua convenienza nel raggiungere luoghi difficilmente accessibili, e inoltre presenta il vantaggio di mantenere il motorino lontano dai campi magnetici di elevata intensità. (Taluni elettromagneti di recente realizzazione sono circondati da campi magnetici di forza tale da far andare in stallo il motorino saturandone le lamine).

Una lunga, sottile e, nei limiti del possibile, pieghevole asta funge da supporto per la bobina; essa corre attraverso ad una serie di supporti di nailon internamente al tubo. L'uscita della bobina viene convertita in corrente continua e può venir misurata da un millivoltmetro da laboratorio di buona precisione.

Operando una misura di questo tipo, si ottiene una precisione dell'1% senza incontrare grosse difficoltà. Se si utilizza una bobina molto piccola, essa potrà essere introdotta con facilità nei luoghi più inaccessibili (ad esempio, piccoli fori); tuttavia occorreranno campi magnetici di maggior intensità per ottenere la medesima tensione d'uscita.

Sono attualmente disponibili strumenti che coprono l'intero campo di utilizzazione fra campi magnetici d'intensità assai ridotta (quello terrestre, di 5×10^{-5} tesla) e campi da 120 chilogauss (12 tesla) generati da elettromagneti di grande potenza impiegati nella ricerca.

Il gaussmetro a bobina ruotante non dipende nel suo funzionamento dalle variazioni di temperatura dal momento che la bobina viene mantenuta a resistenza assai scarsa. Solo in alcune misure di campi molto deboli si deve tener conto nelle misure di un coefficiente termico.

Se viene utilizzata una sola bobina, essa risulta insensibile a qualsiasi campo magnetico le cui linee

siano poste lungo l'asse di rotazione. Tale limite direzionale può essere superato mediante l'aggiunta di una seconda bobina posta su di un asse disposto perpendicolarmente alla prima; quest'ultima bobina risulta essere sensibile alla componente del campo lungo l'asse. Un interruttore collega a turno l'una o l'altra delle due bobine, permettendo così una misura del campo magnetico nelle tre dimensioni.

Gaussmetro ad effetto Hall

Quando gli elettroni si muovono in un conduttore perpendicolare ad un campo magnetico, essi vengono deviati verso uno dei lati del conduttore (il destro o il sinistro a seconda della direzione del campo magnetico) in direzione normale tanto al flusso iniziale degli elettroni quanto al campo magnetico (figura 21). La forza che devia gli elettroni è direttamente proporzionale alla velocità degli elettroni (alla corrente) ed all'intensità del campo magnetico. Tale processo di deflessione continua fino a che non si è accumulata su quel lato del conduttore una carica sufficiente a stabilire un campo elettrico trasversale che si oppone ad una ulteriore deviazione elettronica. La differenza di potenziale trasversale che così si crea viene chiamata «Tensione Hall», ed il fenomeno che ne è la causa, effetto Hall.

Una misura di questo potenziale in volt si ottiene dalla equazione:

$$E = RIH / t$$

ove I rappresenta la corrente in ampere, H è la forza del campo magnetico, t è lo spessore del materiale in centimetri, ed R è il «coefficiente di Hall».

Come si nota dall'equazione, la larghezza della striscia di materiale non è un fattore che influisce sulla misura; la striscia deve però essere almeno lunga il doppio della sua larghezza, o tale tensione cade. La tensione Hall è massima quando il piano dell'elemento è perpendicolare al campo magnetico.

La figura 21 illustra una delle utilizzazioni del fenomeno Hall. Dal momento che la corrente I_F produce un campo proporzionale ad I_F stessa, l'uscita è proporzionale al prodotto $I_F I_c$.

L'elemento Hall in figura è costituito da un sottile tassello di arseniuro di indio posto in un campo magnetico in modo tale che il suo piano sia perpendicolare al campo stesso. L'elemento Hall è assai fragile, e necessita di particolari protezioni e precauzioni; un elemento danneggiato non è riparabile; sono disponibili sonde di misura piane, assiali e tangenziali.

Gli elementi Hall integrano la densità di flusso su tutta la loro superficie, così, se un campo magnetico assegnato non è omogeneo, due sonde di dimensioni diverse misurano densità di flusso differenti quando vengono poste nel campo; questa caratteristica può essere estesa ad un qualsiasi tipo di gaussmetro o di misuratore di flusso. In figura 23 è illustrato un tipico gaussmetro basato sull'effetto Hall.

Dal momento che il materiale semiconduttore che costituisce l'elemento Hall ha un coefficiente termico di resistenza che è più o meno uguale a quello del rame, il bilanciamento a zero della resistenza della sonda

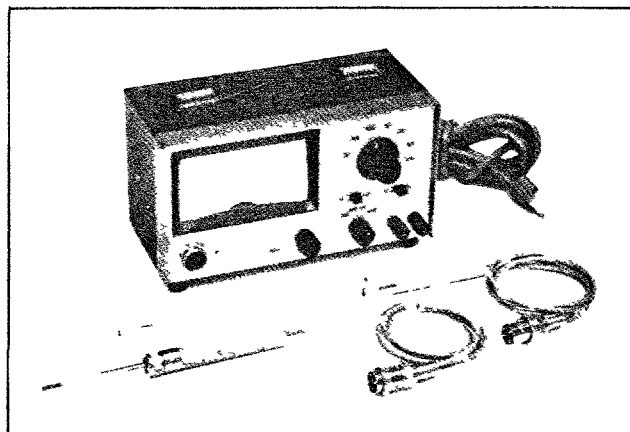


Fig 22 - Gaussmetro MG 1 ad effetto Hall (O S Walker)

tiene conto delle variazioni di temperatura. Anche il coefficiente Hall dell'arseniuro di indio varia in relazione alla temperatura ambientale. La sensibilità della sonda può variare approssimativamente dello 0,1% /°C, quando viene sottoposta a variazioni della temperatura ambiente dopo esser stata calibrata con un magnete di riferimento. Il magnete di riferimento si modifica anch'esso per lo 0,02% /°C, ma ritorna al suo stato originario non appena viene ripristinata la temperatura normale.

Una temperatura ambiente che si mantenga attorno ai 75 °C potrebbe alterare permanentemente la calibrazione del magnete. Una variazione di temperatura altera poi l'efficienza di rettificazione dei diodi nel circuito di misura, per cui si ritiene indispensabile operare la calibrazione alla temperatura d'uso.

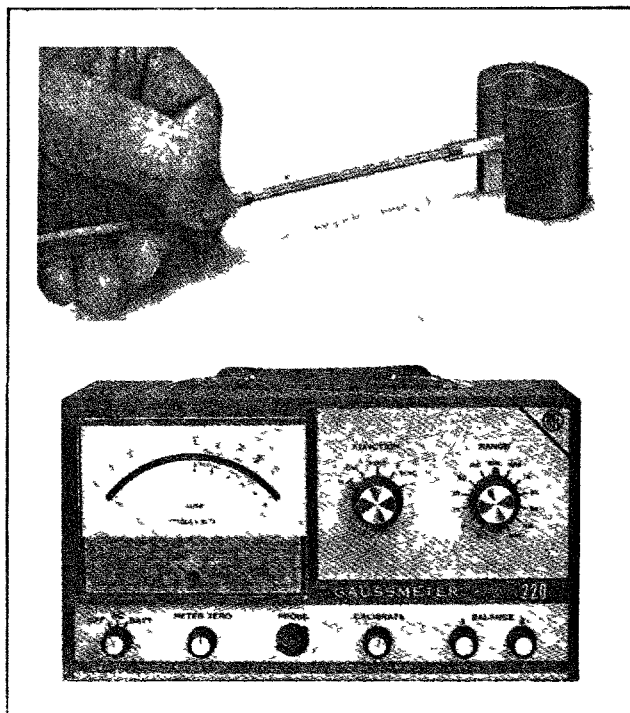


Fig 23 - Gaussmetro ad effetto Hall (RFL)

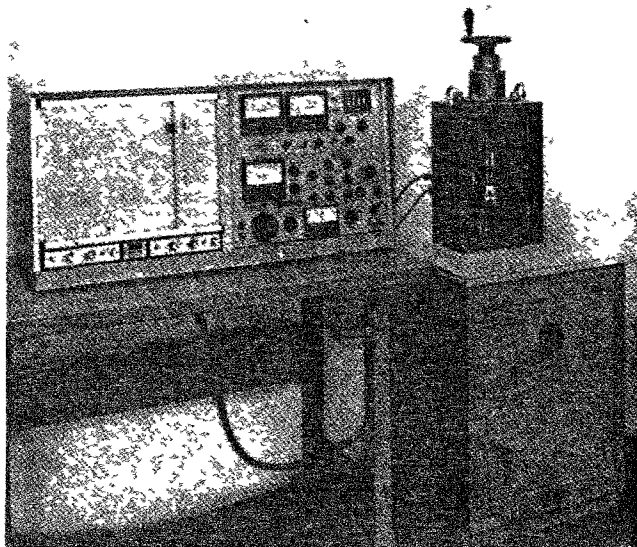


Fig 24 - Isteresigrafo, misuratore delle proprietà di isteresi di materiali teneri e duri realizzato dalla OS Walker Company

Misuratori di permeabilità

La misura della permeabilità è da lungo tempo e rimarrà per molto il metodo classico per la determinazione di molti parametri magnetici. Le curve B-H e molti dati relativi alla forza coercitiva, alla induzione residua ed altri vengono usualmente ricavati mediante misure di permeabilità

Il misuratore di permeabilità consiste di tre avvolgimenti: 1) l'avvolgimento magnetizzante, utilizzato per creare un campo magnetizzante H, 2) una bobina utilizzata per misurare H e 3) una bobina utilizzata per misurare l'induzione magnetica residua B nel campione di materiale magnetico. Le bobine B e H sono collegate ad un circuito di galvanometro balistico.

In figura 25 sono illustrati due tipici misuratori di permeabilità; in ciascuno di essi la bobina B è avvolta sul campione di materiale magnetico sottoposto a misura; la bobina H è posta nello stesso campo magnetico, ma è avvolta in aria; μ viene misurato dal rapporto B/H.

Misuratore di f.m.m. (forza magneto-motrice)

Allo scopo di misurare la differenza di potenziale magnetico (f.m.m.) fra due punti, ci si serve di un misuratore di potenziale magnetico Chattock (fig. 26). Questo strumento rappresenta per certi versi l'analogo magnetico del voltmetro.

Il misuratore Chattock consiste di una striscia flessibile di materiale non metallico di sezione uniforme avvolto uniformemente con filo metallico sottile. L'avvolgimento (costituito di n spire; n_u spire per unità di lunghezza) viene collegato ad uno strumento indicatore (generalmente il galvanometro balistico). In figura 26 la differenza di potenziale fra i punti x_1 e x_2 viene ricavata dall'equazione $\oint n \cdot A n_u$. Se le costanti dell'avvolgimento sono note, la deflessione dello strumento indicatore può essere interpretata nei termini di differenza di f.m.m.

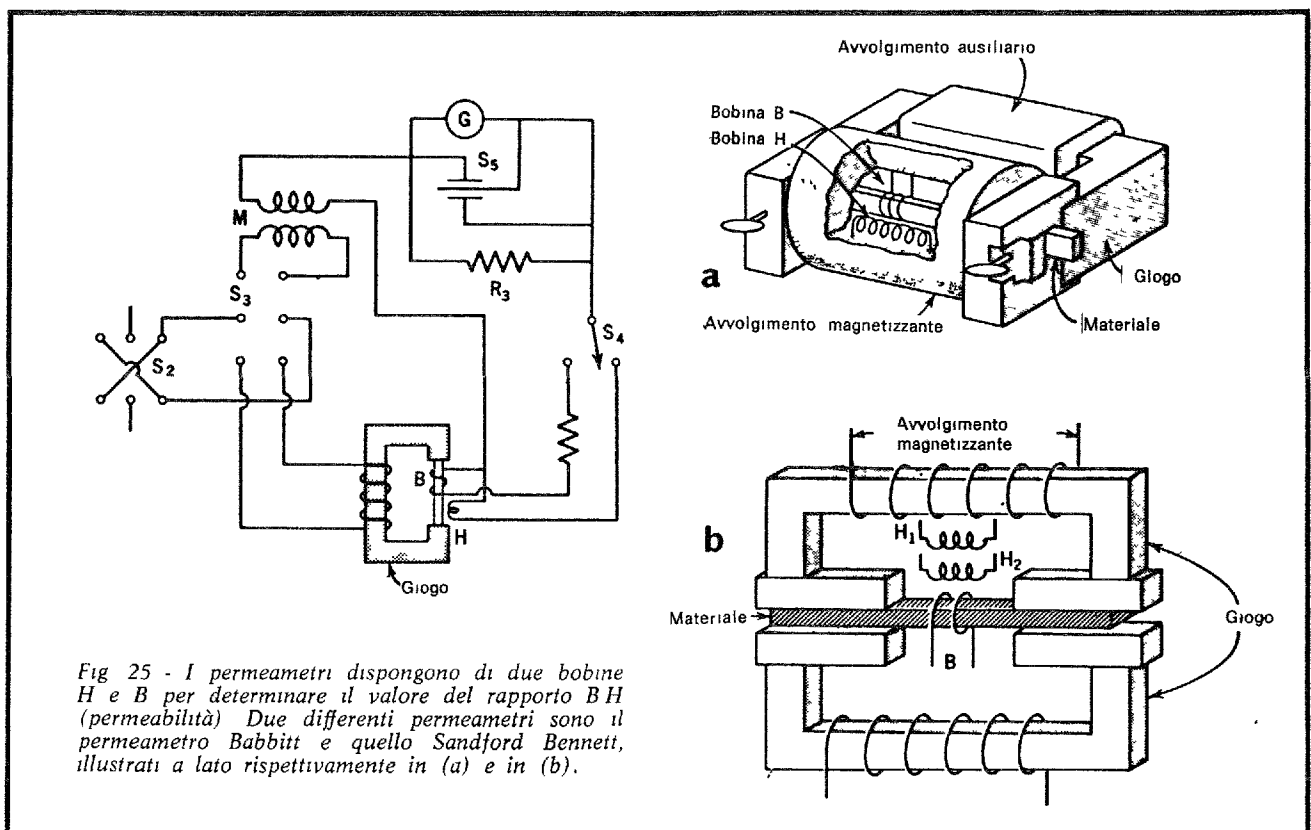


Fig 25 - I permeametri dispongono di due bobine H e B per determinare il valore del rapporto BH (permeabilità) Due differenti permeametri sono il permeametro Babbitt e quello Sandford Bennett, illustrati a lato rispettivamente in (a) e in (b).

Misuratore di forza coercitiva

Una delle proprietà più significative e di facile misurazione di un magnete permanente è la sua forza coercitiva intrinseca H_c . Lo strumento che la misura è il misuratore di forza coercitiva, i cui principi di funzionamento sono illustrati in fig. 27. Il materiale magnetico è posto nel campo di una spira di riferimento, e può essere mosso all'interno di detto campo. Quando il campo magnetico applicato è tale da compensare ($H = H_{c,i}$) la forza coercitiva, il materiale è demagnetizzato, ed il suo movimento all'interno del campo non produce alcuna uscita.

Magnetometro a soglia di flusso

In questa tecnica, un materiale ferroso viene eccitato fino alla saturazione mediante una spira opportuna, la quale viene disposta in modo tale che il materiale si saturi in modo analogo in direzione positiva e negativa ad una frequenza prestabilita. Un avvolgimento di rilevazione dimostra segnale di uscita nullo quando il materiale si è saturato allo stesso modo tanto su escursioni positive, quanto su quelle negative.

Quando il sistema così bilanciato viene introdotto in un campo magnetico, l'intera curva di isteresi viene deviata, ed il materiale in queste condizioni si satura più velocemente in una direzione piuttosto che nell'altra. Dal momento che vi sono due saturazioni (quella positiva e quella negativa) per ogni ciclo di saturazione, un secondo segnale armonico viene colto dall'avvolgimento di riferimento.

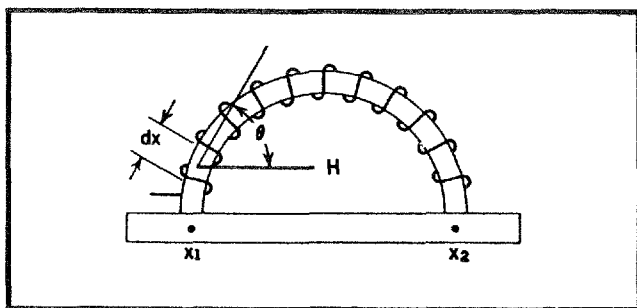


Fig. 26 - Una bobina Chattock per misurare la differenza di potenziale magnetico fra i punti X_1 e X_2 di un magnete

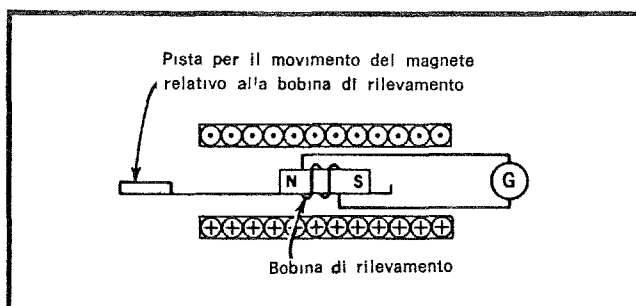


Fig. 27 - Principio di funzionamento di un coercimetro. Il campo non viene modificato quando eguaglia esattamente la forza coercitiva intrinseca poiché il materiale è demagnetizzato.

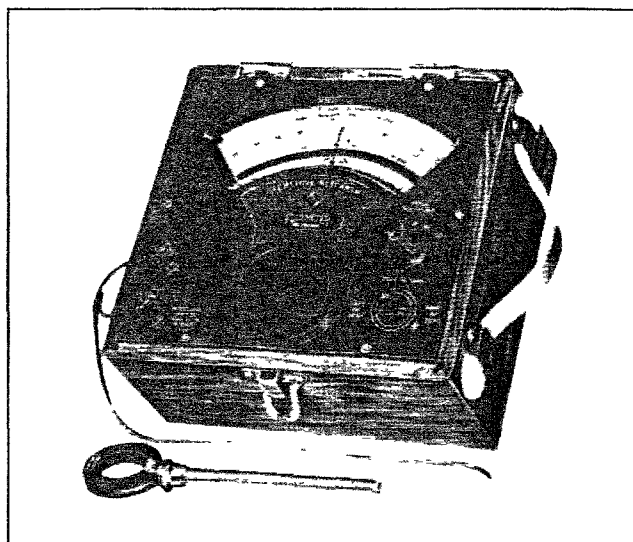


Fig. 28 - Il misuratore di flusso Grassot è un galvanometro privo di molla di richiamo, utilizzato con una bobina di rilevamento.

Questa tecnica copre un campo di misure assai vasto, in quanto è possibile misurare campi da 0-0,5 milligauss a 0,1 gauss.

Due soglie di flusso possono venir utilizzate in un gradiometro, per misurare il gradiente del campo. In figura 29 è mostrata l'utilizzazione di 3 soglie di flusso che istituiscono un campo magnetico controllabile con precisione mediante avvolgimenti Helmholtz.

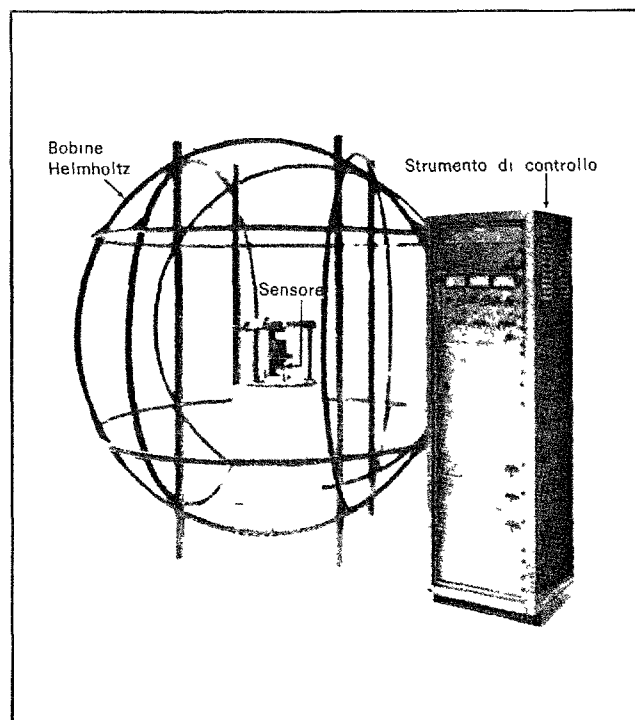


Fig. 29 - Il «Dycome system» utilizza un magnetometro a soglia di flusso per produrre campi magnetici di intensità precisa, servendosi di bobine Helmholtz

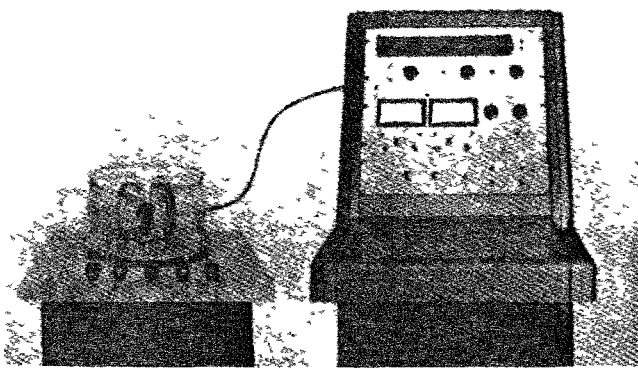


Fig 30 - Il magnetometro Spinner (Princeton Applied Research).

Tutte le misure di induzione magnetica si basano sulla osservazione della tensione indotta su di una bobina di rilevamento tramite un cambio di flusso, quando si modificano campo magnetico, posizione dell'oggetto, o posizione della bobina stessa.

Magnetometro a campione vibrante

Il campione di materiale da studiare viene mantenuto in vibrazione in modo perpendicolare rispetto al campo applicato mediante uno shaker; pure sulla parte vibrante sono posti due piatti metallici circolari i quali, accoppiati ad un paio di piatti fissi, comprimono un condensatore vibrante. La bobina di rilievo sul campione e quella fissa sono entrambe in un forte campo magnetico. Il condensatore vibrante emette un segnale di riferimento; le spire di rilievo generano così un segnale proporzionale al momento magnetico indotto nel campione. Il gradiente del campo può essere misurato con precisione se si sostituisce il campione stesso con una piccola bobina

Magnetometro Spinner

Il magnetometro Spinner (fig. 30) misura il momento magnetico rimanente e la suscettibilità anisotropica in campioni di roccia. Esso garantisce una misura diretta e simultanea delle due componenti ortogonali del momento magnetico del campione in un

piano perpendicolare all'asse di rotazione. Le componenti del momento possono valere dai 7×10^{-9} EMU/cc a 0,5 EMU/cc e vengono mostrate su misuratori contrapposti, in modo da definire il vettore-momento in un piano.

Magnetismo nucleare - NMR

Molti nuclei presentano dipoli magnetici, e vi è dunque la possibilità che una porzione di materia possa presentare notevoli effetti magnetici esterni dovuti al magnetismo nucleare. Tuttavia, i momenti magnetici nucleari sono inferiori di parecchi ordini di grandezza a quelli associati al moto degli elettroni in un atomo o ione.

Il momento magnetico di un elettrone dovuto alla sua rotazione, ad esempio, supera quello di un protone (il nucleo dell'atomo di idrogeno) per un fattore di 660. La maggior parte delle tecniche sono troppo poco precise per poter individuare il fenomeno del magnetismo nucleare. Le tecniche di risonanza nucleare, mediante le quali si rivela il magnetismo nucleare, vengono utilizzate per studiare il paramagnetismo, il ferromagnetismo e l'anti-ferromagnetismo; in tali casi, gli effetti magnetici non sono dovuti al nucleo, ma piuttosto agli elettroni orbitali.

La grandezza del momento magnetico del nucleo, che dipende dal numero di protoni, può essere misurata ponendo un modello di prova contenente protoni in un campo magnetico esterno di induzione magnetica B , e misurando l'energia ($= 2 \mu B$) necessaria a far compiere ai protoni un giro su se stessi. Il nucleo (con i protoni ruotanti) viene posto nel campo B con un «campo di perturbazione» ad angolo retto rispetto ad esso. Si varia la frequenza angolare di tale campo di perturbazione, fino a giungere in condizione di risonanza; in questa condizione, molti protoni ruotanti tendono a girarsi su se stessi nel campo, assorbendo così energia; essa viene poi misurata mediante tecniche elettroniche appropriate.

Questo sviluppo assai recente nel campo delle misure magnetiche prende il nome di «misura della risonanza protonica o del NMR (risonanza nucleare magnetica)» fig. 31. Il momento magnetico di un protone è stato misurato con grande precisione, ed è pari a $\mu p = 1,41044 \times 10^{-26}$ ampere/m².

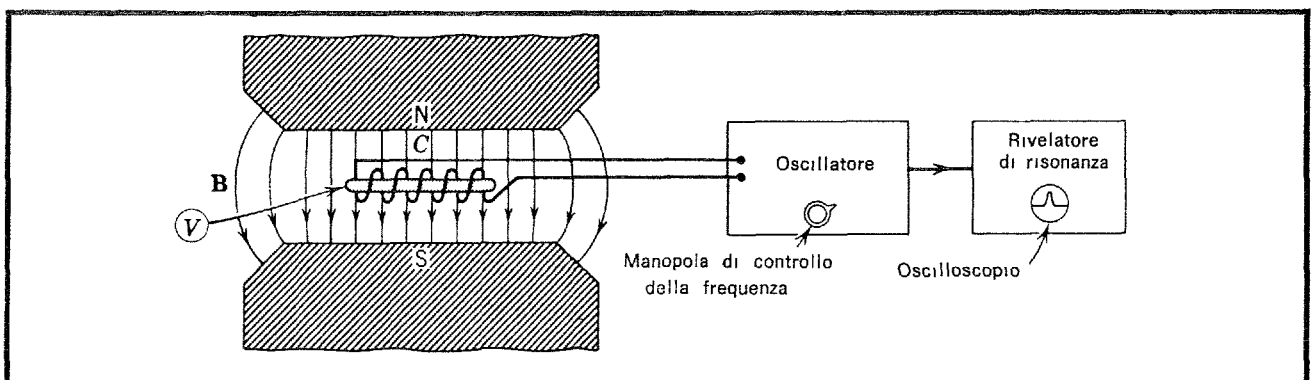


Fig 31 - Dispositivo di misura della risonanza magnetica nucleare (NMR).

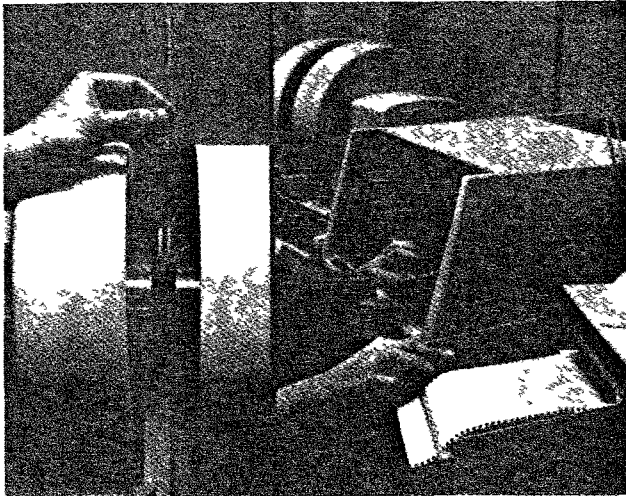


Fig 32 - Spettrometro Varian NMR

Spettrometro per la risonanza elettronica paramagnetica (EPR)

Dato che gli elettroni possiedono sia un momento magnetico che un momento angolare, essi si muovono attorno all'asse del campo con una frequenza direttamente proporzionale alla forza del campo. La costante di proporzionalità è data dal rapporto fra momento magnetico e momento angolare, noto col nome di rapporto «magnetogirico». Se un materiale contenente elettroni non accoppiati (ad esempio, ioni di elementi di transizione) viene sottoposto simultaneamente ad un campo magnetico a corrente continua ed irradiato da un campo magnetico di radio-frequenze molto più debole alla frequenza di precessione, si verifica la risonanza elettronica.

In un tipico spettrometro EPR, un oscillatore genera un campo di micro-onde della frequenza di 9,5 GHz, frequenza di precessione per gli elettroni situati in un campo di circa 0,3400 tesla. Il campo di micro-onde viene applicato alla cavità EPR, la quale è risonante alla stessa frequenza. La cavità è poi collegata ad un braccio di un ponte di micro-onde, mentre l'altro braccio contiene un cristallo di misura, ed il ponte viene così approntato ad un bilanciamento pressoché perfetto in assenza di risonanza elettronica. Viene quindi applicato all'oggetto nella cavità un campo magnetico di 9,5 kMHz e si verifica, quale effetto della risonanza, un cambio di energia. Tale fattore squilibra il ponte e viene così rivelato dal cristallo di misura.

Resistività magnetica

I sensori di resistività magnetica (o magneto-resistori) sono resistori semiconduttori in cui la resistenza aumenta con il campo magnetico. I valori di resistenza in un campo a 0 gauss (10^{-4} tesla) variano da 10 a 1000 Ω , ed aumentano da 5 a 15 volte in resistenza se ci si trova in presenza di campi da 10 000 gauss (1 tesla).

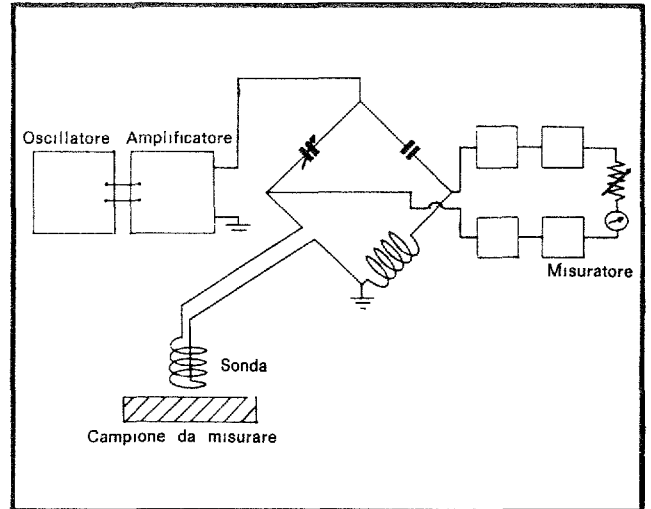


Fig 33 - Circuito di misura che utilizza la corrente parassita

Per ottenere la massima sensibilità, il campo dovrebbe essere posto perpendicolarmente al resistore (come nel caso degli apparecchi ad effetto Hall). Le caratteristiche di resistenza al flusso diretto sono lineari per campi di 5000/100.000 gauss; per campi più bassi il responso non è invece più lineare.

Misure di elettromagnetismo mediante correnti parassite

L'analisi elettromagnetica è un termine nel quale sono compresi un gran numero di metodi di misura elettronici relativi alle interazioni di campi magnetici e di correnti elettriche. La tecnica maggiormente usata è il test a corrente parassita.

Quando una corrente alternata passa in un avvolgimento posto vicino ad un materiale ferromagnetico, vengono indotti nel materiale campi magnetici i quali inducono a loro volta una corrente contraria, o corrente parassita, all'interno del materiale; quest'ultima a sua volta genera un campo magnetico contrario che si oppone al campo istituito dalla corrente alternata originaria. Il circuito è illustrato in fig. 33.

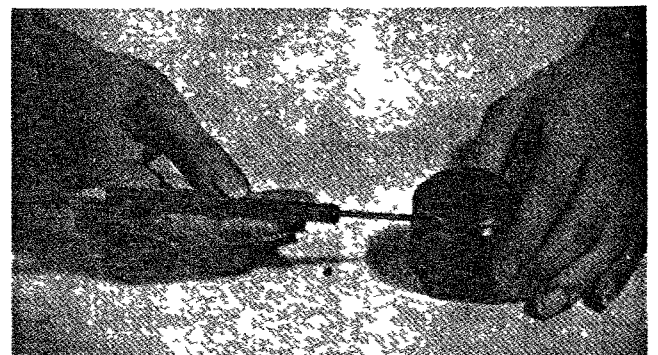


Fig 34 - Un magnete di riferimento calibra una sonda piatta Hall (RFL)

La grandezza e fase di questo campo contrario dipendono dalla resistività e dalla permeabilità del materiale ferromagnetico preso in considerazione; ciò rende possibili valutazioni qualitative di varie proprietà fisiche dei materiali di prova.

L'interazione del campo generato dalla corrente parassita con quello preesistente ha per risultato una perdita di potenza misurabile con un circuito simile ad un ponte di Wheatstone.

Magneti di riferimento

Un magnete di riferimento rappresenta per un gaussmetro quello che per un potenziometro da laboratorio è una cella standard. Un magnete di riferimento utilizzato per calibrare una sonda piatta viene mostrato in figura 34; sono disponibili valori di densità di flusso variabili da 5 a 20.000 gauss. Questi magneti vengono stabilizzati e misurati utilizzando induttori e bobine di rilevamento campioni.

Quando si osservi una certa cura nel maneggiarli, i magneti di riferimento conservano la loro magnetizzazione iniziale indefinitamente. Le schermature estensive rendono minimo il pericolo di cambiamenti di calibrazione dovuti a campi magnetici esterni cui il magnete di riferimento venga sottoposto nel corso di operazioni normali; alcune prove hanno dimostrato che un magnete di riferimento di 0,1 tesla non subisce alte-

razioni se viene posto in un campo demagnetizzante di 200 oersted (15920 amper-spira/metro). I campi magnetici che si possono accidentalmente incontrare durante una normale operazione sono sull'ordine dei 10 oersted (795 A/m). I campi magnetici che si generano in prossimità di un grosso magnete sono valutabili sull'ordine dei 100 oersted (7950 A/m) ad una distanza di circa 60 cm dal magnete di riferimento. Oltre ad essere schermati, i magneti di riferimento sono pure stabilizzati magneticamente per assicurarsi contro un cambio di calibrazione. Urti meccanici che siano talmente violenti da modificare la struttura fisica del magnete di riferimento possono causare una modifica alla calibrazione; un magnete che sia stato danneggiato può però essere calibrato di nuovo mediante confronto con un magnete di riferimento originario o mediante un sistema di calibrazione sufficientemente calibrato.

Nuovi materiali magnetici

Dieci anni or sono l'utente di materiali permanentemente magnetici era limitato nella sua scelta ai materiali allora esistenti: venivano largamente utilizzati l'Alnico V e VI, mentre la ferrite di bario stava anch'essa divenendo di uso corrente, e le leghe al cobalto-platino, molto sofisticate e piuttosto care, venivano utilizzate solo nel caso in cui la loro applicazione ne giustificasse il costo.

Gli ultimi dieci anni hanno visto una grande espansione nell'utilizzazione dei materiali magnetici a grandissima forza coercitiva; i nuovi materiali hanno un prodotto d'energia molto maggiore di quelli disponibili nel passato. I progressi registrati nel campo dei componenti si sono tradotti nella realizzazione di materiali dotati di caratteristiche di magnetizzazione e di stabilizzazione completamente nuove.

La maggior parte degli ingegneri che si occupano del problema della scelta del materiale magnetico si servono dei materiali Alnico; l'Alnico V, VI, VIII e IX necessitano di forze magnetizzanti che variano fra 3000 e 7000 oersted, ed il loro prodotto di energia giunge al massimo ai 7,5 milioni.

I materiali di ferrite di bario, il cui prodotto di energia vale circa 2 milioni, necessitano di una forza magnetizzante di 12.000 oersted; ciò comporta qualche problema di magnetizzazione iniziale, peraltro facilmente superabile.

Il materiale in lega cobalto-platino è stato introdotto di recente sul mercato; il CoPt necessita di una forza magnetizzante di 20.000 oersted, ma le sue piccole dimensioni consentono il rapido raggiungimento di una forza del genere.

Le ricerche sviluppatesi recentemente sulle cosiddette «terre rare» (cerio, samario, lantano, lutezio) hanno posto di fronte a nuovi materiali magnetici assai interessanti. Proprietà tipiche di questi materiali sono: valori di prodotto di energia assai elevati (limiti teorici di 24 milioni per samario e cerio, superiori a 40 milioni per CoPt); si richiedono teoricamente forze di magnetizzazione da 60.000 oersted.

Questi materiali permettono la preparazione di progetti irrealizzabili fino a pochi anni or sono.

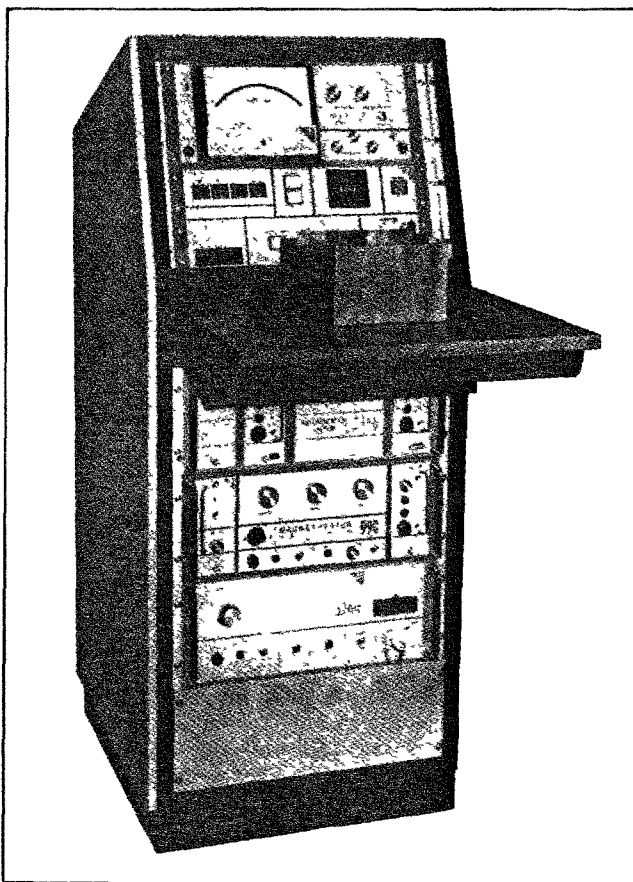


Fig. 35 - Un sistema magnetico completo Magnetreater®, che carica, misura e stabilizza i materiali magnetici (RFL).

Carica e stabilizzazione di un magnete

L'utilizzazione in rapida espansione dei magneti permanenti ha provocato una parallela richiesta di nuovi mezzi precisi e veloci che ne permettano la magnetizzazione, stabilizzazione e misura. Nella maggior parte dei casi si deve precedentemente realizzare una completa saturazione magnetica. Successivamente il magnete in piena carica deve essere stabilizzato o portato al livello di rendimento richiesto.

Il processo completo richiede l'utilizzazione di tre strumenti diversi: un «caricatore magnetico» per la saturazione iniziale del magnete, un «trattatore di magneti» (Magnetreater) per la stabilizzazione dal massimo livello di flusso a quello voluto, un gaussmetro per la misurazione della densità di flusso. Tale strumentazione può essere raccolta in un unico sistema (fig. 35), il quale può essere o semiautomatico e completamente automatico.

Esistono quattro tipi di «caricatori magnetici»: (1) magnetizzatore a magnete permanente, (2) caricatore a corrente continua, (3) caricatore ad impulsi a semicicli, (4) caricatore magnetico ad impulso di scarica di condensatore.

Un trattamento o stabilizzamento dei magneti è necessario perchè tale trattamento artificiale previene una deteriorazione del livello di flusso in un periodo di tempo più o meno lungo. Il metodo tradizionale di demagnetizzazione consiste nell'utilizzazione di una larga bobina in cui circola corrente alternata. Il magnete che deve essere trattato viene posto vicino all'avvolgimento o nella cavità dell'avvolgimento stesso e poi allontanato dal campo a corrente alternata. Tale metodo non consente però una grande precisione, dal momento che è assai difficile un controllo accurato del campo a corrente alternata, e sono necessarie correnti assai intense per assicurare un soddisfacente campo demagnetizzante. Se poi una corrente di 50 ampere viene applicata ad un tale avvolgimento, il calore che si genera è piuttosto sensibile; l'operazione deve essere svolta in brevissimo tempo.

Il «Magnetreater RFL» (in fig. 35) risolve tutti questi problemi; esso è una unità compatta con alta potenza di punta. Per sviluppare la forza demagnetizzante necessaria si utilizza il principio di «immagazzinamento dell'energia»; l'energia viene cioè immagazzinata in un condensatore per un periodo di circa un secondo, quindi scaricata in un avvolgimento come onda oscillatoria in un periodo di circa 50 millisecondi.

Come scegliere un sistema magnetico

In linea di principio, tutti i sistemi di precisione elettromagnetici di laboratorio sono costituiti da due componenti essenziali: 1) una serie di strumenti magnetici accuratamente progettati e realizzati, 2) una uscita di potenza controllata per eccitare le bobine di rilievo.

I fattori di primaria importanza che devono essere considerati nella scelta di un sistema magnetico sono: 1) le dimensioni del foro in cui introdurre gli oggetti per gli esperimenti

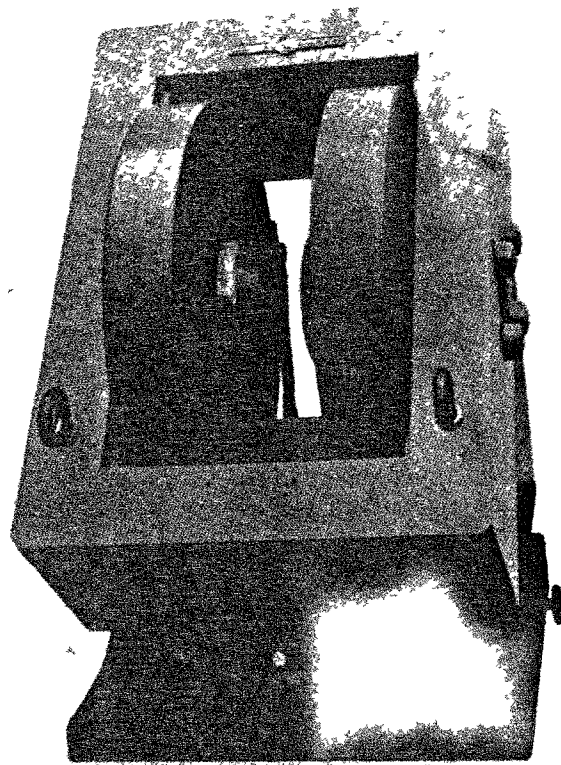


Fig 36 - Elettromagneti di precisione possono produrre campi magnetici superiori ai 40 000 gauss (4 tesla) (Varian)

2) il rapporto fra il foro fisso o variabile e l'orientamento verticale od orizzontale del campo magnetico. La maggior parte dei magneti possono venir orientati sia verticalmente che orizzontalmente, sebbene i magneti più larghi necessitino di accorgimenti speciali per l'orientamento verticale.

Il campo magnetico che si genera presenta un certo numero di caratteristiche di cui si deve tener conto. La più ovvia è la dimensione del foro, ma altri parametri importanti sono l'intensità di flusso, la stabilità e l'omogeneità del campo all'interno del foro. La stabilità del campo indica la sua indipendenza da cambiamenti della tensione di rete, nell'impedenza di carico, della temperatura, o dall'introduzione di campi magnetici estranei.

L'omogeneità viene generalmente espressa come frazione dell'intero campo; esistono diagrammi che indicano l'omogeneità del campo.

Le applicazioni di un sistema magnetico vengono limitate solo dall'immaginazione del ricercatore; alcune delle utilizzazioni più comuni sono:

- Misure della suscettibilità magnetica
- Studi dell'effetto Hall
- Esperimenti magneto-ottici (effetti Zeeman, Faraday, Kerr, Voight)
- NMR (risonanza magnetica nucleare)
- EPR (risonanza paramagnetica elettronica)
- Analisi di meccanica dei quanti
- Studi biologici
- Demagnetizzazioni adiabatiche
- Fisica dei semiconduttori.

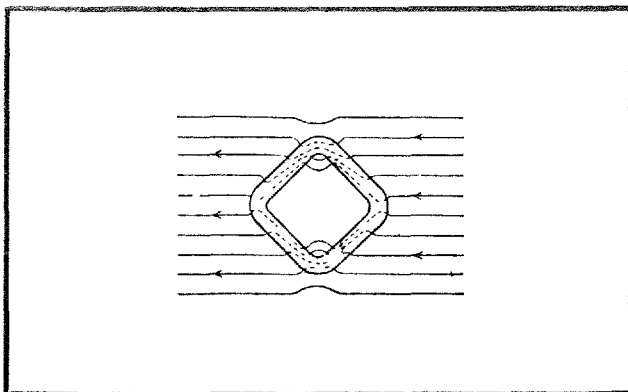


Fig. 37 - Gli schemi deviano le linee di flusso tutt'attorno alle superfici schermate (Perfection Mica Co.).

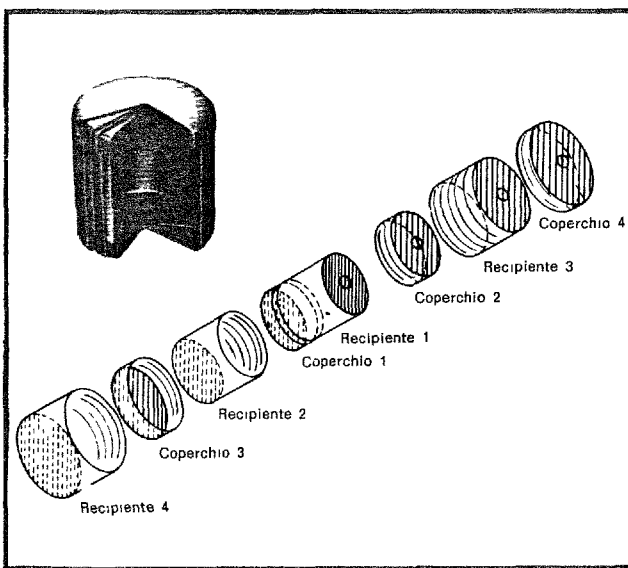


Fig. 38 - Schermo magnetico a molti strati (Perfection Mica Co.).

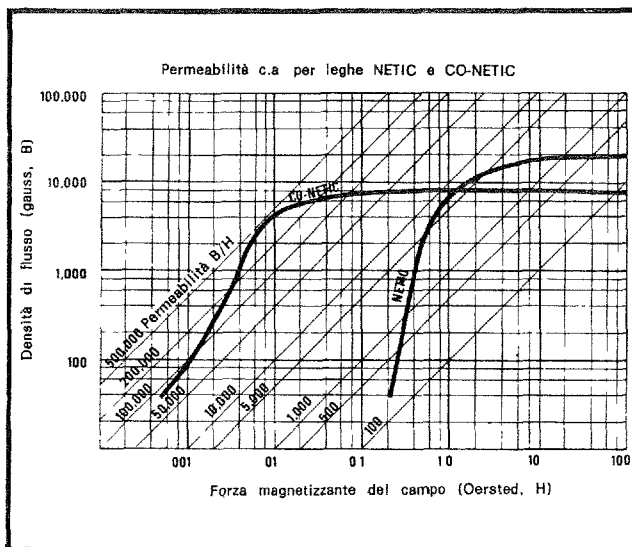


Fig. 39 - Curve B/H per materiali NETIC e CO-NETIC (Perfection Mica Co.).

Schermatura magnetica

Vi sono tre metodi per evitare che l'energia elettromagnetica irradi dai componenti o dagli strumenti: (1) effettuare una accurata scelta dei componenti e una progettazione organica del sistema, (2) disporre di filtri e (3) realizzare una protezione magnetica.

Una schermatura magnetica divide il campo attorno ad un oggetto, presentando un percorso lungo il quale si sviluppano le linee di forza magnetiche, proprio come delle superstrade che attraversano una città (figura 37); non risultano arrestate od assorbite le linee di forza, come qualcuno potrebbe essere indotto a pensare. Il problema della schermatura di un campo magnetico è assai complicato: non si può infatti pensare di disporre a caso un rivestimento attorno ad un componente o circuito. I fattori da prendere in considerazione sono:

1) **Tipo di campo magnetico:** se cioè il campo stesso sia: 1) relativamente stabile, come quello terrestre o quello che si sviluppa da un magnete permanente o da un circuito a corrente continua, oppure 2) variabile, come quello risultante da generatori di corrente alternata, oppure 3) una combinazione di campi stabili e variabili.

2) **Intensità del campo magnetico:** se sono presenti tanto campi a corrente continua quanto ad alternata, si deve conoscere la forza di ciascuno di essi.

3) **Attenuazione richiesta:** l'attenuazione, o efficacia dello schermo (SE) può essere espressa in decibel:

$$SE = 20 \log_{10} (H_{\text{esterno}}/H_{\text{interno}})$$

Una SE di 20 dB indica una attenuazione di 10:1; 40 dB corrispondono a 100:1; 60 dB corrispondono a 1000:1.

Questi dati non assicurano però una sufficiente conoscenza del tipo ideale di schermatura da operarsi caso per caso; a tale conoscenza si giunge solo dopo anni di esperienza di progetto.

4) **Forme d'onda dei campi a corrente alternata:** se la componente a corrente alternata del campo che interferisce è irregolare, l'intensità di picco è importante.

5) **Frequenza dei campi a corrente alternata:** generalmente, più elevata è la frequenza, più semplice è schermare; problemi di interferenza al di sopra dei 200 kHz non vengono generalmente considerati. Per questo tipo di schermatura si utilizzano solitamente materiali di elevata conducibilità.

Nel 1954, la «Divisione di isolamento magnetico» della Perfection Mica ha realizzato materiali di schermatura (più propriamente detti «barriere magnetiche») denominati con le sigle NETIC e CO-NETIC. Queste leghe presentano discreti vantaggi rispetto ai materiali utilizzati fino ad allora per il medesimo scopo (minori rischi nella loro produzione e nel maneggiarli, possibilità di esser tagliati o sfilacciati per ap-

plicazioni ingegneristiche). Le principali caratteristiche delle leghe NETIC sono la grande capacità di trasporto (deviazione) del flusso e la bassa retentività. Le leghe CO-NETIC, sono state realizzate per campi magnetici di scarsa intensità. Tali materiali sono facilmente lavorabili e possono essere fabbricati in innumerevoli configurazioni. Una protezione può combinare tanto gli schermi elettromagnetici quanto quelli elettrostatici.

Il materiale NETIC viene generalmente usato in campi di elevata intensità dato che esso non satura completamente, ma raggiunge solo una certa percentuale di attenuazione. Il materiale CO-NETIC viene invece utilizzato in campi di bassa intensità, in modo da sfruttarne le sue alte caratteristiche di attenua-

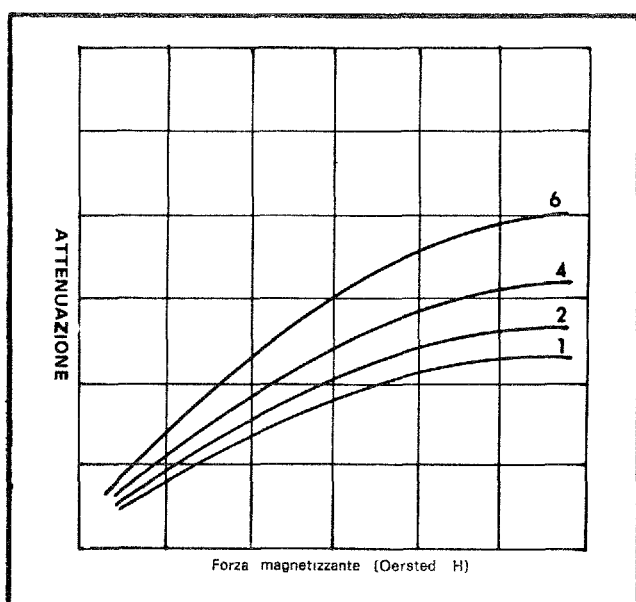


Fig. 40 - Nel diagramma è riportata la efficienza relativa di schermatura ottenuta mediante strati successivi di materiale NETIC. Una zona d'aria fra gli strati può parzialmente attenuare il campo perturbante.

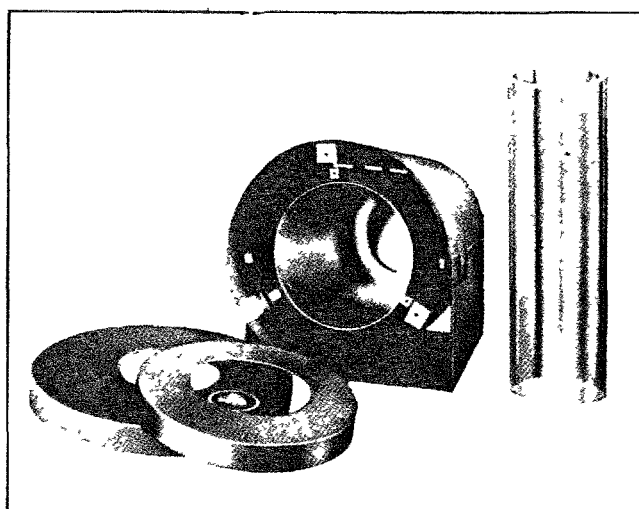


Fig. 41 - Camera a zero gauss (Perfection Mica Co.).

zione. Il diagramma in figura 39 illustra i valori che si riferiscono ad entrambi i materiali.

Dal momento che il costo dei materiali cresce generalmente in modo diretto con la loro permeabilità, il progettista di schermi utilizza generalmente il materiale a permeabilità inferiore che consenta una effettiva schermatura dell'elemento preso in considerazione. Lo spessore del materiale può essere variato per ottenere un aumento di permeabilità; allo scopo si possono utilizzare diversi strati di materiale. La costruzione di più strati di schermo dipende dal modo in cui si vuole opporsi all'azione del campo di interferenza. Se un apparecchio deve essere schermato da una interferenza magnetica, generalmente uno strato inferiore di materiale CO-NETIC, viene circondato da uno o più strati di materiale NETIC a più bassa permeabilità e più alta saturazione. Se è invece l'apparecchio stesso che viene schermato a generare la interferenza magnetica, allora si inverte la successione degli strati: gli strati NETIC vengono posti all'interno, ed uno strato CO-NETIC conclude lo schermo.

I materiali di schermatura magnetica sono sensibili a perturbazioni esterne: un abuso può anche provocare una perdita delle loro qualità di schermo, ed in tal caso essi devono essere trattati di nuovo per riottenere le loro caratteristiche originarie.

Camera a zero gauss

Una caratteristica camera a zero gauss è costituita da tre sistemi di schermatura concentrici ad elevata permeabilità CO-NETIC poco sensibili a perturbazioni esterne con uno strato interno in alluminio (vedi fig. 41). Un sistema ad avvolgimento Helmholtz può esservi incorporato in modo tale che un campo magnetico possa esservi generato per la calibrazione di magnetometri ed altri apparecchi di rilievo.

Misurazioni di magnetismo terrestre

I parametri fondamentali del magnetismo terrestre sono: 1) l'angolo di declinazione (D) fra il meridiano magnetico (cioè, il piano contenente il vettore magnetico) ed il meridiano geometrico; 2) l'intensità orizzontale (H), cioè la forza massima magnetica nel piano orizzontale; 3) l'intensità verticale (Z), forza massima nel piano geograficamente verticale; 4) l'intensità totale (F), massimo della forza magnetica indipendentemente dalla sua direzione; 5) l'inclinazione (I), angolo fra la direzione del campo e il piano orizzontale; 6) la componente della forza verso il nord geografico (X), e 7) la componente della forza verso l'est geografico, Y.

X, Y e Z sono vettori, H e F grandezze scalari, D ed I sono angoli. Se tre elementi sono noti, è possibile ricavare tutti gli altri. Gli elementi che vengono misurati con maggior frequenza sono D, H ed I.

Le misure vengono comunemente espresse in gamma, unità di misura universalmente accettata per le misure del magnetismo terrestre; un gamma equivale a 10^{-5} gauss, o 10^{-9} tesla. L'intensità massima totale del magnetismo terrestre è di 0,4-0,5 gauss