

## Lezione 17

### Classificazione dei materiali magnetici

#### Diamagnetismo

Nella tavola degli elementi la dislocazione elettronica è tale che alcuni elementi hanno momento di dipolo magnetico proprio, mentre altri possono non averlo in quanto si annullano sia i momenti orbitali che quelli di spin. In elementi di quest'ultimo tipo si osserva una diminuzione del campo magnetico esterno (diamagnetismo<sup>1</sup>)

Il diamagnetismo è una proprietà che presentano tutte le sostanze comuni, ma è così debole da essere subito mascherato nel caso in cui il materiale sia caratterizzato da un magnetismo di uno dei due altri tipi.

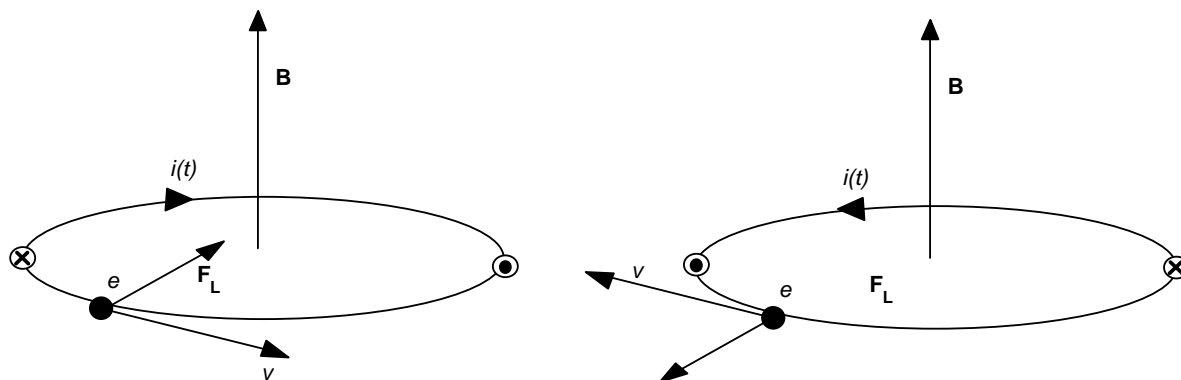
Gli atomi e le molecole di un mezzo materiale, sotto l'azione di un campo magnetico esterno, acquistano un momento magnetico indotto diretto in verso opposto rispetto al campo inducente. Il campo magnetico viene pertanto diminuito all'interno del materiale. Tutte le sostanze presentano un effetto diamagnetico. Nelle sostanze diamagnetiche la suscettività magnetica è minore di zero.

Possiamo studiare l'effetto diamagnetico con semplici considerazioni basate sulla meccanica classica. Supponiamo di scegliere un atomo con un elettrone che, nel suo moto di rivoluzione a velocità  $\omega$  intorno al nucleo, è in equilibrio dinamico a causa della presenza della forza di attrazione ( $F_{\text{Coulomb}}$  - centripeta) del nucleo, che lo costringe a deviare e a percorrere un'orbita circolare:

$$F_c = F_{\text{Coulomb}}$$

$$m_e \omega_e^2 R = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{R^2}$$

L'equilibrio può essere perturbato dalla presenza di un campo magnetico esterno in quanto c'è da considerare l'effetto della forza di Lorentz che agisce sull'elettrone in movimento. Se agisce un campo magnetico avente la stessa direzione dell'asse dell'orbita, la forza di Lorentz, essendo perpendicolare alla velocità  $\mathbf{v}$  dell'elettrone, potrà essere o centripeta oppure centrifuga.



<sup>1</sup> il suffisso *dia* indica separazione, lontano da.

In particolare, può accadere che la forza centripeta aumenti perché la forza di Lorentz ha lo stesso verso della forza di attrazione Coulombiana. In tal caso, per garantire l'equilibrio, deve aumentare la velocità dell'elettrone: ne consegue che si ha un aumento del momento di dipolo magnetico orbitale dell'elettrone.

Nel caso in cui l'elettrone circolasse nella sua orbita con verso opposto, si deduce che si avrebbe una diminuzione della forza centripeta e, di conseguenza, per mantenere l'equilibrio si avrebbe una diminuzione della velocità angolare dell'elettrone e, quindi, del suo momento di dipolo magnetico orbitale.

Supponiamo allora di avere un atomo con due elettroni che, ruotando in verso opposto, danno luogo a momenti di dipolo magnetici orbitali che si fanno reciprocamente equilibrio in assenza di un campo esterno. Anche i momenti di dipolo magnetico di spin si faranno equilibrio. I due momenti orbitali sono uguali in modulo, hanno direzione assiale, ma sono opposti in verso: la loro risultante è nulla. In un materiale diamagnetico non esistono dipoli magnetici permanenti

Immergiamo l'atomo in un campo di induzione  $\mathbf{B}$  uniforme diretto lungo l'asse dell'orbita. Per quanto detto in precedenza, un elettrone aumenterà la sua velocità, mentre l'altro la diminuirà, portando ad uno squilibrio dei momenti di dipolo magnetici orbitali ed alla nascita di un momento di dipolo magnetico orbitale diverso da zero che si oppone al campo esterno applicato e che porta a un indebolimento del campo magnetico complessivo.

Ragionamento analogo potrebbe esser fatto anche nel caso più generale in cui il campo esterno non abbia direzione ortogonale al piano dell'orbita. In tal caso si determina la precessione dell'orbita dell'elettrone, ossia un movimento simile alle rotazioni dell'asse di una trottola, il quale comporta nuovamente una modifica dei momenti originari e produce nuovamente un indebolimento del campo.

Valori tipici della suscettività magnetica  $\chi_m$  per i materiali più comuni nella elettrotecnica sono : Ag  $(-26.4 \cdot 10^{-6})$ ; Au  $(-36.3 \cdot 10^{-6})$ ; Cu  $(-9.6 \cdot 10^{-6})$ . Ricordando che  $\chi_m = \mu_r - 1$ , la permeabilità magnetica dei materiali diamagnetici è di poco inferiore all'unità.

### ***Paramagnetismo***

I materiali paramagnetici sono costituiti da atomi che possiedono un momento di dipolo magnetico permanente, a causa della mancanza di particolari condizioni di simmetria nella struttura degli orbitali elettronici. In questi materiali, allora, all'effetto diamagnetico si sovrappone l'effetto paramagnetico<sup>2</sup>, generalmente preponderante e di segno contrario.

In assenza di campo esterno e in condizioni di equilibrio termodinamico, l'orientazione dei dipoli magnetici è puramente casuale e il vettore magnetizzazione  $\mathbf{M}$  è in ogni punto nullo. In presenza di un campo magnetico esterno si stabiliscono le condizioni di equilibrio tra la tendenza dei dipoli ad orientarsi secondo il campo e l'azione disorientatrice dell'agitazione termica. Ciò dà luogo ad una magnetizzazione del mezzo avente la stessa direzione e lo stesso verso del campo: è questo l'effetto paramagnetico.

Nelle sostanze paramagnetiche la suscettività magnetica è maggiore di uno e il momento magnetico  $\mathbf{M}$  indotto dalla presenza del campo esterno  $\mathbf{B}$  è parallelo e concorde rispetto a  $\mathbf{B}$ .

---

<sup>2</sup> Il suffisso *para* indica affinità.

Lo studio del fenomeno può essere affrontato ricordando lo studio già affrontato della polarizzazione dipolare e della sua dipendenza dalla temperatura.

Si suppone il materiale costituito da tanti dipoli magnetici uguali  $\mathbf{m}_0$ . Indichiamo con  $\theta$  l'angolo formato da un generico dipolo  $\mathbf{m}_0$  con il campo interno  $\mathbf{B}_i$ , e con  $\mathbf{m}_d$  il valore medio del contributo apportato alla polarizzazione magnetica da ciascun dipolo. Per valutare la dipendenza della polarizzazione dipolare dalla temperatura basterà calcolare il rapporto  $\mathbf{m}_d/\mathbf{m}_0$  al variare della temperatura T.

Il rapporto il momento di dipolo medio e il momento di dipolo della molecola può essere descritto dalla funzione di Langevin (L(a)):

$$\frac{m_d}{m_0} = \frac{e^a + e^{-a}}{e^a - e^{-a}} - \frac{1}{a} = \coth a - \frac{1}{a} = L(a)$$

ove  $\frac{(m_0 B_i)}{kT} = a$  ; con k=costante di Boltzmann =  $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$

Il momento magnetico per unità di volume può pertanto essere scritto come:

$$M = Nm_0L(a)$$

dove con N si è indicato il numero di dipoli per unità di volume.

Nel caso del paramagnetismo, come nel diamagnetismo, il campo interno  $B_i$  può essere ritenuto uguale al campo esterno perché gli effetti di magnetizzazione sono estremamente piccoli. Nella maggior parte dei casi, negli esperimenti a temperature ordinarie,  $a$  è molto più piccolo dell'unità (cioè  $m_0 B \ll kT$ ). In questo caso e la funzione di Langevin può essere approssimata dalla sua tangente nell'origine ed assumere l'espressione:

$$L(a) = \frac{a}{3} \Rightarrow M = Nm_0 \frac{a}{3} = N \frac{m_0^2 B}{3kT}$$

Se indichiamo con  $M_{sat} = Nm_0$ , il momento magnetico di saturazione, corrispondente al caso limite in cui tutti i dipoli sono orientati parallelamente al campo, si ha:

$$M = M_{sat} \left( \frac{m_0 B}{3kT} \right)$$

Tale espressione indica che la magnetizzazione paramagnetica è proporzionale al campo esterno e inversamente proporzionale alla temperatura.

Talvolta l'equazione è posta nella forma:

$$M = C \left( \frac{B}{T} \right)$$

conosciuta come legge di Curie, ove C è la costante di Curie.

Valori tipici della suscettività magnetica  $\chi_m$  per i materiali più comuni nella elettrotecnica sono : Al ( $22 \cdot 10^{-6}$ ); Cr ( $312 \cdot 10^{-6}$ ); Pt ( $295 \cdot 10^{-6}$ ). Ricordando che  $\chi_m = \mu_r - 1$ , la permeabilità magnetica dei materiali paramagnetici è di poco superiore all'unità.

## ***Ferromagnetismo***

Esistono sostanze caratterizzate da magnetizzazione eccezionalmente elevata: per valori bassi del campo, il momento magnetico è praticamente quello di saturazione. Esse, inoltre, presentano una magnetizzazione spontanea, ossia un momento di dipolo magnetico per unità di volume diverso da zero anche in assenza di campo esterno. Questi materiali (ferro, nichel, cobalto) sono detti ferromagnetici.

La trattazione del fenomeno può essere svolta in maniera simile a quella dei materiali paramagnetici. Non si possono trascurare, però, termini di ordine superiore dello sviluppo in serie di potenze di  $\alpha$  della funzione di Langevin. Inoltre, al campo interno  $\mathbf{B}_i$  deve essere aggiunto il campo  $\mathbf{B}_w$ , denominato campo di Weiss. Infatti, il solo campo esterno applicato non può rendere ragione della intensa magnetizzazione sperimentalmente osservata. L'origine e la natura di tale campo possono essere dedotte soltanto da considerazione fondate sui risultati della meccanica quantistica. In pratica, si manifesta una speciale interazione quantistica, chiamata accoppiamento di scambio, che ha origine dall'interazione dello spin elettronico di un atomo con quello degli atomi vicini.

Nei materiali ferromagnetici si ha un fenomeno simile a quello dei materiali paramagnetici, ma molto rafforzato ( $\mu_r=10^4$ ). In essi esistono domini (domini di Weiss), ossia zone già magnetizzate la cui grandezza è stata stimata di circa  $10^{-6} \div 10^{-15} \text{ cm}^3$ . In ciascun dominio gli atomi presentano momenti di dipolo magnetico allineati lungo un particolare asse, detto asse di facile magnetizzazione e, pertanto, il singolo dominio si trova già in condizione di saturazione, indipendentemente dalla presenza di un campo magnetico esterno.

In assenza di un campo magnetico esterno, i singoli domini sono orientati in modo aleatorio e il vettore magnetizzazione è nullo. Essi possono, però, orientarsi facilmente anche con campi deboli. In tal caso, i domini che sono orientati come il campo esterno, possedendo energia potenziale minima si trovano in condizioni di equilibrio stabile. I domini adiacenti, invece, tenderanno a orientarsi in direzione del campo esterno secondo un fenomeno chiamato spostamento delle pareti dei domini. La variazione di orientazione dei singoli domini avviene gradualmente e i domini più favorevoli si espandono a danno dei meno favorevoli. Al cessare del campo si può ripristinare la situazione iniziale.

Al crescere del campo magnetico esterno, però, accade che lo spostamento delle pareti non sia più reversibile a causa dei micro difetti della struttura cristallina. Se il campo magnetico esterno continua ad aumentare, ad un certo punto (effetto Barkhausen) le pareti del dominio si espandono di colpo fino al micro-difetto successivo: la magnetizzazione procede a salti, non più in maniera continua a spese di energia spesa a causa degli "atriti" che si incontrano nelle rotazioni dei domini.

Se il campo magnetico è sufficientemente elevato, ogni dominio può risultare praticamente allineato con il campo esterno: a questo punto si ha un fenomeno di saturazione e sono necessari campi molto intensi per apprezzare cambiamenti significativi nella magnetizzazione.

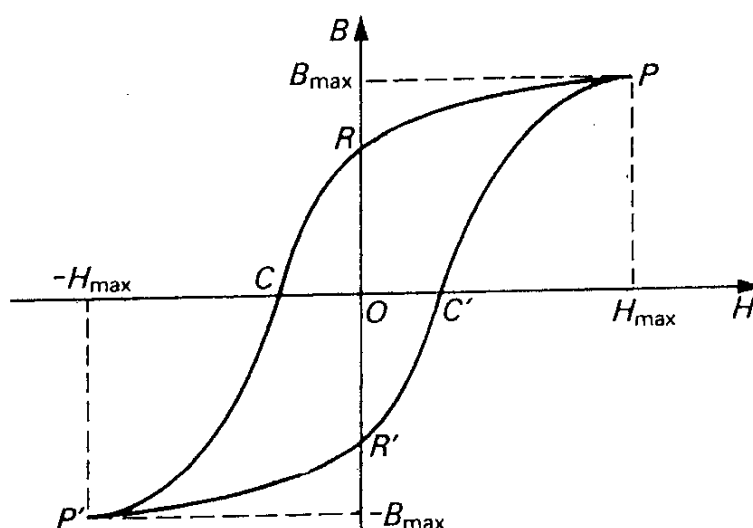
Se il campo magnetizzante ritorna a zero possono rimanere domini orientati in maniera irreversibile, per cui si ha una magnetizzazione permanente del materiale. E' necessaria l'applicazione di una forza coercitiva per ridurre a zero la magnetizzazione.

Se si innalza la temperatura di un materiale ferromagnetico al di sopra di un valore critico, chiamato temperatura di Curie, l'accoppiamento di scambio sparisce e la maggior parte delle sostanze diviene paramagnetica. Per il ferro la temperatura di Curie è di 1043 K.

## 5.1 I materiali ferromagnetici

A differenza dei materiali diamagnetici e paramagnetici, i materiali ferromagnetici, a parità di  $\mathbf{H}$  presentano valori di  $\mathbf{B}$  enormemente più alti (fino a  $10^6$  volte). La relazione che intercorre tra  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$  non è, però, né lineare né univoca. Infatti, la curva che qualitativamente lega i campi  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$  è un tipico ciclo di isteresi, in cui la permeabilità magnetica non solo non è costante, ma dipende anche dalla “storia” del materiale.

Partendo da una situazione per la quale la magnetizzazione è nulla ( $\mathbf{M}=0$ , e quindi  $\mathbf{B}=0$  e  $\mathbf{H}=0$ ), aumentando  $\mathbf{H}$  si osserva un aumento di  $\mathbf{B}$  secondo una curva che è detta curva di prima magnetizzazione. Aumentando  $\mathbf{H}$  si arriva ad un valore di magnetizzazione  $\mathbf{M}$  asintotico (valore di saturazione), che rappresenta il valore limite di magnetizzazione alla quale il materiale può giungere. Diminuendo  $\mathbf{H}$ , particolarmente interessante è il caso di materiale magnetizzato ( $\mathbf{B} \neq 0$ ) in assenza di corrente esterna ( $\mathbf{H}=0$ ); il valore di  $\mathbf{B}$  è detto induzione magnetica residua ( $B_r$ ) ed il fenomeno si presenta abbastanza diffusamente (tipico è il caso della magnetite, che costituisce le comuni calamite). Invertendo il segno di  $\mathbf{H}$ , all'aumentare del suo valore assoluto,  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{M}$  cominciano a decrescere: il campo  $\mathbf{H}$  in corrispondenza del quale  $\mathbf{B}$  è nullo è detto campo magnetico di coercizione ( $H_c$ ). Quando  $\mathbf{H}$  diviene minore del campo di coercizione, anche  $\mathbf{B}$  diviene negativo. Facendo variare  $\mathbf{H}$  con continuità si ottiene il ciclo di isteresi completo.



### *Proprietà fondamentali dei materiali ferromagnetici*

Per la scelta di un materiale ferromagnetico, in base al suo impiego nella tecnica, assumono fondamentale importanza le seguenti proprietà:

1. Induzione di saturazione  $B_s$  e campo  $H_s$  corrispondente. La proprietà è fondamentale nelle apparecchiature di potenza, per le quali è necessario un elevato flusso. Elevata  $B_s$  significa, a parità di flusso, dimensioni minori per il nucleo.
2. Permeabilità iniziale  $\mu_i$  e permeabilità massima  $\mu_{max}$ . Elevata permeabilità significa minor valore di amperspire di eccitazione nelle macchine rotanti o di corrente magnetizzante nei trasformatori. Una elevata permeabilità iniziale è importante nei nuclei per telecomunicazioni, dato il basso valore della corrente magnetizzante, e in

quelli dei trasformatori di misura.

3. Induzione residua  $B_r$  e campo coercitivo  $H_c$ . Fondamentali per la scelta di un magnete permanente;
4. Forma del ciclo.

I materiali ferromagnetici si possono distinguere in due grandi categorie: dolci e duri.

I materiali dolci sono caratterizzati da elevata  $\mu$ , alta  $B_r$ , basso  $H_c$ , piccola area del ciclo. Senza campo si smagnetizzano rapidamente perché  $H_c$  è piccolo.

I materiali duri sono caratterizzati da bassa  $\mu$ , alto  $H_c$ , grande area del ciclo. Restano magnetizzati tanto più a lungo, quanto maggiore è  $H_c$ .

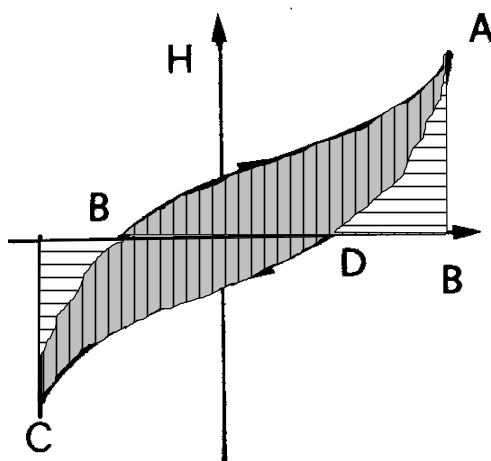
### *Potenza dissipata nei materiali ferromagnetici*

La potenza dissipata nei materiali ferromagnetici a causa delle variazioni di flusso costituisce una delle voci principali di cui tenere conto nella valutazione del rendimento delle macchine elettriche.

In presenza di un campo variabile è necessario fornire energia per consentire le continue variazioni di orientamento dei domini. L'energia dissipata per unità di volume per portare un materiale all'induzione  $B$  vale:

$$W = \int_0^B H dB$$

Ne consegue che, in un ciclo completo, l'energia assorbita per unità di volume è pari all'area del ciclo di isteresi.



Per giustificare la seguente espressione, possiamo calcolare l'energia assorbita da un solenoide di lunghezza  $h$  molto maggiore del suo diametro  $d$ , costituito da  $N$  spire percorse dalla corrente  $i$ . Studiamo la fase di carica del solenoide applicando una tensione costante  $e(t) = E$ :

$$E = Ri + \frac{d\Phi}{dt}$$

In un solenoide il campo di induzione è assiale e uniforme su tutta la sezione  $S$ , per cui:

$$E = Ri + \frac{d(BNS)}{dt}$$

Moltiplicando ambo i membri per  $idt$ , si ha:

$$Eidt = Ri^2 dt + NSidB$$

Il termine  $dW = NSidB$  rappresenta l'energia assorbita dall'induttore quando l'intensità di corrente varia tra  $i$  a  $i+di$ , ossia quando l'induzione passa da  $B$  a  $B+dB$ .

Dividendo per il volume  $V$  del solenoide ( $V = hS$ ), si ottiene l'energia assorbita per unità di volume a seguito della variazione  $dB$  dell'induzione:

$$\frac{dW}{V} = \frac{NSidB}{hS}$$

$$dW_\tau = nidB = HdB$$

In pratica, per determinare la potenza dissipata per isteresi si usa la formula di Steinmetz:

$$p_i = k_i f B_M^\eta$$

dove  $k_i$  è una costante dipendente dal materiale,  $B_M$  è il valore massimo dell'induzione,  $f$  è la frequenza e  $\eta$  è un valore compreso tra 1.6 e 2.

Le perdite per correnti parassite sono perdite dovute a correnti che circolano nella massa di un materiale ferromagnetico, su piani ortogonali alla direzione del vettore  $B$ , variabile nel tempo.

Si possono calcolare con la seguente relazione approssimata:

$$p_c = k_c f^2 B_M^2$$

dove  $k_c$  è una costante dipendente dal materiale,  $B_M$  è il valore massimo dell'induzione,  $f$  è la frequenza.

Per descrivere le perdite di un materiale ferromagnetico si fa riferimento alla *cifra di perdita*  $C_p$  che rappresenta la potenza dissipata in un kg di materiale con induzione variabile con legge sinusoidale alla frequenza di 50Hz e con valor massimo di 1 Tesla).

In prima approssimazione, se il peso del materiale è  $G$ , si può scrivere:

$$p_m = kC_p CB^2$$

Gli unici elementi ferromagnetici sono il ferro, il nickel e il cobalto.

Il **ferro** è l'unico elemento utilizzato allo stato puro come materiale ferromagnetico. Presenta piccole perdite per isteresi (piccola area del ciclo), piccolo  $H_c$  (si smagnetizza facilmente). E' il componente fondamentale di molte leghe ferromagnetiche. Il ferro allo stato puro è difficilmente ottenibile e invecchia magneticamente. Il ferro più puro è il ferro ARMCO

Il **nickel** è un materiale poco interessante allo stato puro. E', però, costituente di molte leghe. Le proprietà del Ni dipendono molto dai trattamenti termici e dalle lavorazioni.

Il **cobalto** non è usato allo stato puro, ma rientra in leghe magnetiche, specie per magneti permanenti. E' un materiale con elevate perdite per isteresi, induzione residua  $B_s$  abbastanza elevata, sebbene ottenibile con  $H_s$  elevato.

	$B_s$ (Tesla)	$B_r$	$H_c$ (As/m)	Area	$\mu_m$	$\mu_i$
Ferro (Fe)	2.15	elevata	4	piccola	7000	250
Nichel (Ni)	0.65	medio-bassa	80	mat. duro	2500	150
Cobalto (Co)	1.8	medio-bassa	800	mat. duro	250	70

Le **leghe ferro-silicio (Fe-Si)** sono usate per i lamierini delle macchine elettriche in quanto il silicio porta ad un forte aumento di resistività e, quindi, ad una forte diminuzione delle perdite per correnti parassite. Per contro, l'induzione residua diminuisce leggermente (circa 2 Tesla), diminuisce la conducibilità termica e, soprattutto, aumenta la fragilità. Di conseguenza, il contenuto di silicio non supera il 2.5% nelle macchine rotanti. Lo spessore dei lamierini varia tra 0.5÷0.35 mm; oltre non conviene andare perché la riduzione delle perdite diviene piccola. La cifra di perdita varia tra 1÷3.5 W/kg; per ridurla ulteriormente è necessario ridurre le perdite per isteresi e, quindi, agire sulla struttura del materiale. Si utilizzano, in tal caso, lamierini a cristalli orientati, le cui proprietà decadono rapidamente in direzioni diverse da quelle di laminazione; tali lamierini, allora, possono essere usati solo se il flusso ha un'unica direzione (trasformatori).

Le **leghe ferro-nickel (Fe-Ni)** sono estremamente interessanti in quanto la presenza del nickel comporta un aumento notevolissimo della permeabilità. Opportuni trattamenti termici possono portare la permeabilità iniziale a valori elevatissimi, fino a circa 10000. Con il 30% di nichel si ottiene una lega non ferromagnetica. Quando la lega è al 78% di nichel si ottiene la permeabilità iniziale massima e la lega si dice di tipo "Permalloy". Il superpermalloy (Fe - Ni 79% - Mn 5%) ha  $\mu_i=50000$  e  $\mu_m=500000$  L'induzione di saturazione è in genere piuttosto bassa (1÷1.5 Tesla), per cui tali leghe non sono utilizzate nelle macchine elettriche e nei trasformatori di potenza, mentre hanno largo impiego nel campo delle comunicazioni elettriche e in quello della strumentazione.

Le **leghe ferro-cobalto (Fe-Co)** si usano per magneti permanenti perché il cobalto è un materiale ferromagnetico duro. Il "permendur" (50% Fe - 50% Co) ha induzione di saturazione elevatissima (2.45 tesla) ed è usata nei poli per elettromagneti.

Nelle applicazioni a d alta frequenza il fenomeno delle perdite è prioritario e, in particolare, il fenomeno delle perdite per correnti parassite. Esistono materiali magnetici non metallici costituiti da ossidi di ferro o ferriti caratterizzati da conducibilità piccolissima. Sono assimilabili a materiali ceramici, dei quali hanno la durezza e la fragilità. Sono utilizzate in alta frequenza per antenne, trasformatori, testine di registrazione, ecc.