

1. GENERALITÀ INTRODUTTIVE

1.1 Generalità sull'energia elettrica

L'energia elettrica è largamente presente nella vita contemporanea ed ha sicuramente contribuito in maniera significativa alla rapidissima evoluzione della società negli ultimi due secoli. Tra i principali campi di impiego si possono citare:

- ☞ l'illuminazione;
- ☞ l'azionamento di macchine per sostituire il lavoro degli uomini;

[La possibilità di 'compiere lavoro' utilizzando l'energia elettrica fu intuata già intorno al 1830, appena furono noti i risultati separatamente conseguiti dal danese H.C.Oersted e dall'inglese M.Faraday e che condussero alla nascita dell'elettromagnetismo. La possibilità di ottenere un 'motore elettrico' era, infatti, l'immediata conseguenza di un aspetto dell'interazione tra magnetismo ed elettricità, consistente nella 'nascita' di una forza su di un conduttore percorso da corrente e immerso in un campo magnetico]
- ☞ le comunicazioni;
- ☞ il tempo libero ed il divertimento (musica, video, ...)

Nel presente Corso ci si interesserà soprattutto di 'macchine' e di 'apparecchiature' elettriche.

Gran parte delle macchine utilizzate dall'uomo nell'industria, nelle applicazioni domestiche, nei trasporti e nei servizi in genere, fanno ricorso all'impiego di energia elettrica. Pur non essendo una forma di energia primaria, ma a sua volta ottenuta dalla trasformazione di altre forme di energia, quella elettrica si è imposta per diverse ragioni, tra le quali possono essere citate:

- ✓ l'efficacia delle reti di trasporto e di distribuzione che ne consente la disponibilità anche in luoghi molto distanti da quello di produzione;
- ✓ la relativa semplicità e la precisione con cui è possibile regolarne i parametri per soddisfare le più svariate richieste degli utilizzatori;
- ✓ l'accettabile impatto ambientale prodotto dalle motorizzazioni elettriche;
- ✓ gli elevati valori di rendimento della conversione di energia elettrica in meccanica;
- ✓ le dimensioni contenute dei dispositivi di regolazione.

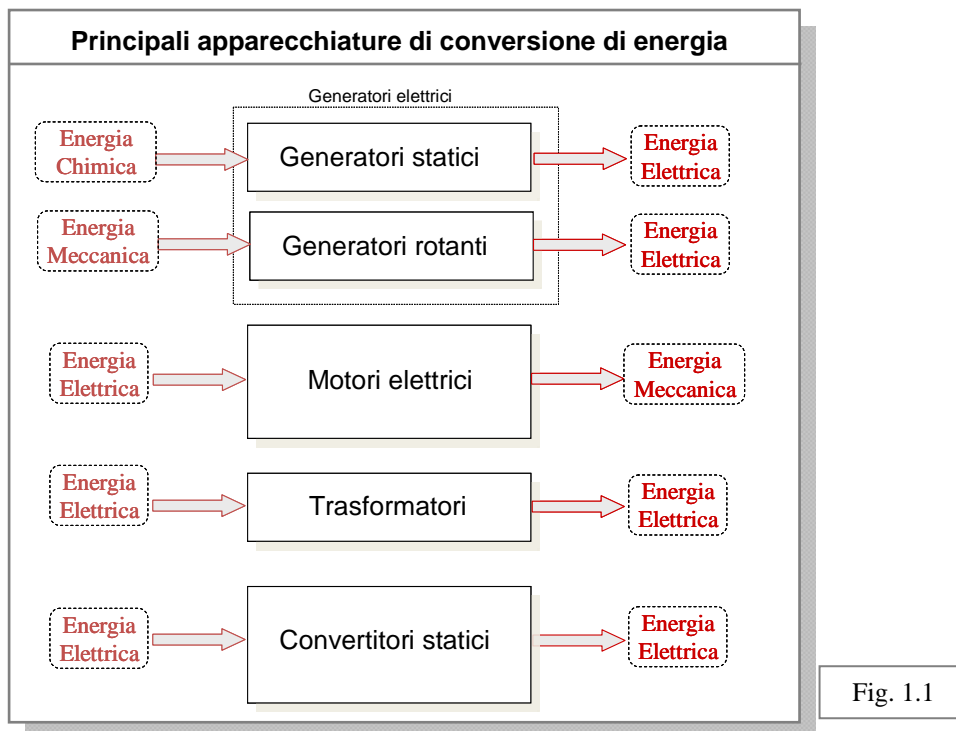
L'energia elettrica può essere generata mediante **generatori**:

- ☞ elettrochimici (batterie, celle a combustibile, ...), di tipo *statico*;
- ☞ elettromeccanici (dinamo, alternatori, ...), di tipo *dinamico*, prevalentemente *rotanti*;
- ☞ di altro tipo (ad es. piezoelettrici).

L'energia elettrica viene, poi, trasmessa e distribuita attraverso opportune **reti di trasmissione** e di **distribuzione** in *corrente alternata sinusoidale* o in *corrente continua*, per essere utilizzata nei diversi modi su sintetizzati.

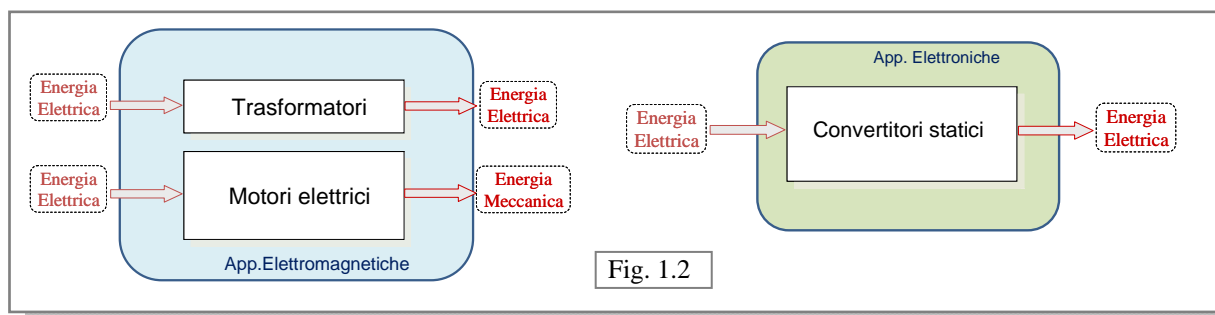
1.2 Conversione dell'energia

Nelle diverse fasi di generazione, trasmissione, distribuzione ed utilizzazione dell'energia elettrica è necessario ricorrere ad apparecchiature di conversione dell'energia, sinteticamente riportate in fig.1.1. Oltre ai generatori, vi sono i *motori elettrici* che effettuano la conversione



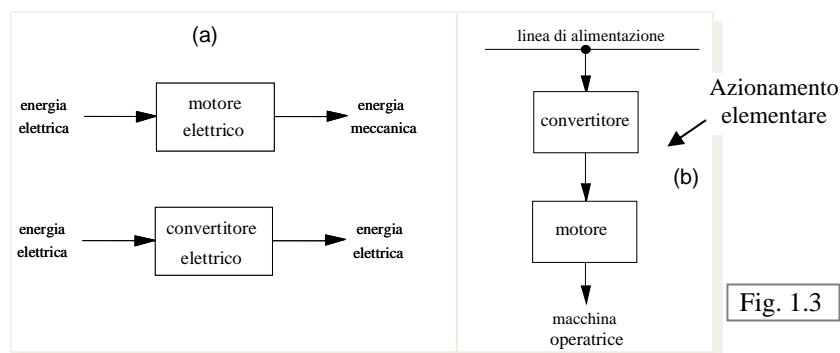
di energia da elettrica a meccanica, i *trasformatori* che effettuano la conversione di energia elettrica in energia elettrica (variando i livelli di tensione e di corrente tra ingresso ed uscita in circuiti in alternata), i *convertitori statici a semiconduttori* che effettuano ancora la conversione di energia elettrica in energia elettrica, e che modificano tra ingresso ed uscita anche il tipo di forma d'onda delle grandezze in gioco (ad es. da continua ad alternata, o da alternata a continua) o grandezze come la frequenza.

Nel presente Corso si farà riferimento (fig.1.2) principalmente ai trasformatori e ai motori elettrici, che dal punto di vista costitutivo sono delle apparecchiature elettromagnetiche, e ai convertitori statici, che sono apparecchiature elettroniche di potenza. Vi è, inoltre, da osservare che le macchine elettriche (intese come convertitori di energia elettrica in meccanica e viceversa) sono reversibili; ciascuna di esse, cioè, può funzionare sia da motore sia da generatore a seconda delle condizioni che si realizzano. Pertanto, almeno a livello di



modellizzazione, le macchine elettriche verranno analizzate in maniera indipendente dal tipo di conversione che effettuano, salvo poi a porre attenzione maggiormente alle caratteristiche di funzionamento da motore, di maggiore interesse per un corso rivolto ad allievi di ingegneria dell'automazione.

Nella parte finale del corso si farà riferimento anche ai primi elementi di azionamenti elettrici, considerando i sistemi con in cascata un convertitore ed un motore (uscita del convertitore=ingresso del motore, fig.1.3) con elementi di regolazione.



1.3 - MATERIALI per le MACCHINE ELETTRICHE

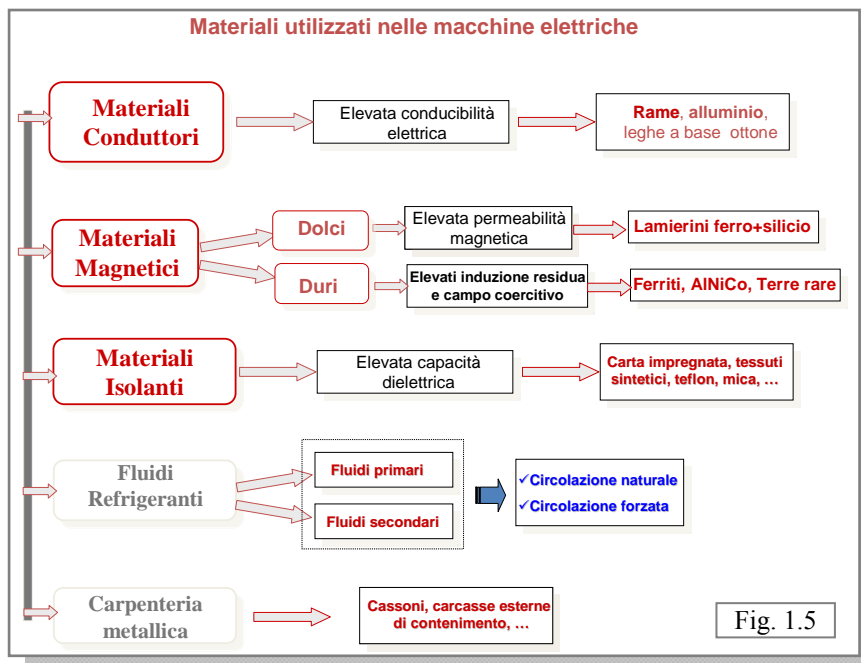
I tipi di materiali utilizzati nelle macchine e nei convertitori elettrici sono sintetizzati in fig. I.4. In questa prima parte non si farà riferimento ai *semiconduttori*, le cui caratteristiche verranno descritte nei capitoli che riguardano i convertitori statici. Non sono trattati neanche i *fluidi refrigeranti* (aria, acqua, olio, ...) e i materiali per i contenitori esterni delle macchine elettriche (con funzione strutturale e di scambio termico); pur ricoprendo un ruolo importante, sono tipicamente trattati in corsi avanzati, in quanto entrano nel dimensionamento delle apparecchiature e non nel principio di funzionamento e/o nelle caratteristiche di funzionamento principali. L'attenzione sarà rivolta, pertanto, ai materiali

Materiali per le macchine e i convertitori elettrici

- Conduttori
- Materiali magnetici
- Isolanti
- Superconduttori
- Refrigeranti
- Carpenteria metallica
- Semiconduttori

Fig. 1.4

evidenziati in fig.1.4 con linea tratteggiata. I *conduttori* e i *materiali magnetici* sono materiali attivi in quanto sede rispettivamente delle correnti elettriche e dei campi magnetici; gli *isolanti* non sono materiali attivi, ma consentono l'affiancamento di più conduttori tra loro e dei conduttori ai materiali magnetici ed alle altre masse presenti, limitando fortemente il funzionamento delle macchine a causa della loro "delicatezza" di cui si parlerà qui di seguito. Una prima grossolana classificazione dei materiali utilizzati nelle macchine elettriche è riportata in fig. 1.5.



1.4 - Materiali conduttori

I materiali conduttori sono utilizzati per realizzare gli *avvolgimenti* delle macchine e delle apparecchiature elettriche. Essi sono sede del passaggio della corrente elettrica, destinata sia alla magnetizzazione dei circuiti magnetici, sia al trasferimento di energia. Nelle macchine elettriche si utilizzano conduttori solidi (salvo applicazioni molto speciali); i materiali più utilizzati sono il *rame elettrolitico* (trafilato), l'*alluminio* ad alto grado di conducibilità (trafilato o in fusione); in alternativa si ricorre a leghe varie utilizzando *rame*, *alluminio*, *nicel*, *zinco*, *stagno* (ad es. *ottone* CuZn, *cupralluminio* CuAl, *bronzo* CuSn).

La caratteristica principale dei materiali conduttori è quella di avere una bassa resistività (o alta conducibilità) al fine di limitare quanto più possibile le cadute di tensione ohmiche ΔV in corrispondenza di un assegnato valore di corrente I ($\Delta V = R I$) e le perdite per effetto Joule ($R I^2$), causa di riscaldamento.

Come è noto, la resistività è una funzione crescente della temperatura, secondo la relazione:

$$\rho_{\vartheta} = \rho_{\vartheta_0} \left[1 + \alpha_{\vartheta_0} (\vartheta - \vartheta_0) \right] = \rho_0 (1 + \alpha_0 \Delta \vartheta) \quad (1.1)$$

in cui ρ_0 è la resistività alla temperatura ϑ_0 ; ρ_{ϑ} è la resistività alla temperatura ϑ ; $\Delta \vartheta = \vartheta - \vartheta_0$, e α_0 è il coefficiente di temperatura a ϑ_0 °C. Dalla 1.1 si deduce che, qualunque sia il materiale conduttore utilizzato, all'aumentare della temperatura aumentano sia le cadute di tensione sia le perdite per effetto Joule.

Nelle tabelle delle caratteristiche dei materiali, la resistività viene spesso riferita al valore corrispondente alla temperatura di 20°C (cioè $\vartheta_0 = 20^\circ C$). Si deve osservare che, a rigore, la dipendenza di ρ dalla temperatura non è lineare, in quanto α non è costante; in realtà, però, nel campo di temperatura di interesse delle macchine elettriche α è poco variabile e si può assumere coincidente con il valore a 20°C. In tab.1.1 sono riportati alcuni valori caratteristici dei principali conduttori utilizzati nelle macchine elettriche.

Materiale	ρ_{20°	α_{20°	Peso specifico
	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	$1/^\circ\text{C}$	kg/dm^3
Argento	0.016	$3.8 \cdot 10^{-3}$	10.49
Rame	0.017	$3.9 \cdot 10^{-3}$	8.89
Oro	0.023	$3.8 \cdot 10^{-3}$	19.32
Alluminio	0.029	$3.7 \cdot 10^{-3}$	2.75
Ottone (Cu _{63%} Zn _{37%})	0.065	$1.5 \cdot 10^{-3}$	8.35
Ferro	0.095	$4.5 \cdot 10^{-3}$	7.75

Tab. 1.1 – Valori medi della resistività ρ a 20 °C, del coefficiente di temperatura α a 20 °C e del peso specifico di alcuni conduttori (l'oro e il ferro sono riportati per comparazione).

Dalla tabella si evince che, nel caso del rame, il raddoppio della resistenza si ha con un aumento di temperatura di circa 250°C rispetto ai 20°C standard. Un $\Delta \vartheta$ di 100°C (plausibile per le normali temperature di funzionamento delle macchine elettriche) produce un aumento di resistenza di circa il 40%.

I conduttori sono realizzati ed utilizzati, tanto con sezione circolare a *filo tondo* o a *piattina*, cioè con sezione rettangolare e spigoli arrotondati (cfr. fig. 1.6). I fili si utilizzano fino a circa 10 mm^2 , mentre le piattine si utilizzano per sezioni maggiori. Quando l'applicazione lo richiede, si

possono usare più fili o più piattine in parallelo, per aumentare la sezione utile di conduttore. Per le piattine esistono in commercio più sezioni con differenti valori della snellezza, cioè del rapporto larghezza/altezza.

Sia i fili tondi sia le piattine sono messi in commercio *nudi* oppure *isolati*, ossia rivestiti esternamente con smalti isolanti di vario tipo, a strato semplice o a strati multipli.

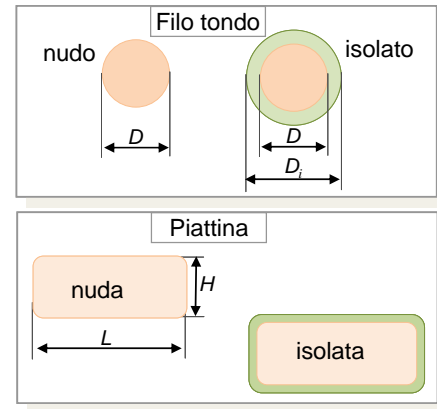


Fig. 1.6

Superconduttori

Alcuni materiali hanno un particolare comportamento: mostrano resistività praticamente nulla al di sotto di una certa temperatura, detta *temperatura di transizione critica* T_c (cfr. fig. 1.7). Per tale motivo sono detti **superconduttori**. Purtroppo tale temperatura è notevolmente inferiore a 0°C e ciò comporta una notevole difficoltà a determinare le situazioni criogeniche opportune affinché il fenomeno si manifesti. Laddove si è in presenza di elevatissime correnti (ad es. negli acceleratori di particelle, o nella levitazione magnetica per il trasporto ad alta velocità) è necessario ricorrere ai superconduttori. Questi ultimi vengono classificati in due grosse categorie:

- **LTS** (*Low Temperature Superconductors*); di bassa T_c , utilizzabili in He liquido; sono quelli noti da maggiore tempo (tra di essi vi è il mercurio con $T_c = 4.1 \text{ K}$);
- **HTS** (*High Temperature Superconductors*); di alta T_c , utilizzabili in N_2 liquido; sono più recenti, ma anche più interessanti perché sono superconduttori a temperature maggiori dei 100 K .

Gli elementi della tavola periodica che possono essere superconduttori sono sintetizzati in fig. 1.8.

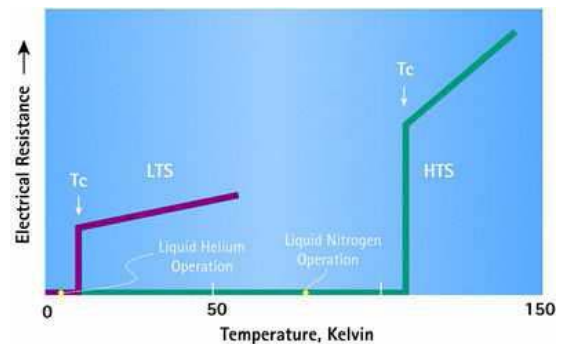


Fig. 1.7 – Andamento della resistività in funzione della temperatura assoluta dei superconduttori ad alta e a bassa temperatura

IA																	VIIA	
	IIA											IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA		
	4 Be											13 Al						
		III B	IV B	V B	VIB	VII B	VIII	IB	II B	30 Zn	31 Ga							
			22 Ti	23 V	42 Nb	43 Mo	44 Tc	44 Ru		48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb					
				73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir		80 Hg	82 Pb							
	57 La																	
		90 Th	91 Pa															

Fig. 1.8 – Elementi che possono essere superconduttori

1.5 - Materiali isolanti elettrici o dielettrici

Sono sostanze con resistività elettrica estremamente elevata ($\rho > 10^{12} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$), tanto che nelle applicazioni pratiche viene assunta di valore infinito.

Negli isolanti non ci sono portatori di carica liberi, pertanto l'applicazione di campi elettrici non implica la circolazione di corrente. [in realtà ogni sostanza può offrire elettroni di conduzione se si dispone di sufficiente energia per strapparli agli atomi di appartenenza; non esistono isolanti perfetti ma solo sostanze definite isolanti perché offrono una resistenza molto grande al passaggio di cariche elettriche].

I termini *isolante* e *dielettrico* sono considerati sinonimi, tuttavia mentre il primo definisce semplicemente l'impossibilità di un materiale di condurre corrente a causa dell'assenza di cariche libere, il secondo è generalmente usato per gli isolanti le cui molecole possono essere polarizzate se soggette ad un campo elettrico.

I materiali isolanti sono elementi non attivi delle macchine elettriche, perché non contribuiscono alla trasformazione di energia, ma servono ad isolare i lamierini magnetici tra loro e soprattutto i conduttori elettrici tra loro e verso massa. I materiali isolanti possono servire anche da supporto per il conduttore (si pensi ad esempio ad un isolatore passante di porcellana per alte tensioni).

Sono i materiali con il maggior costo specifico (costo per unità di peso) e i più delicati tra quelli presenti in una macchina elettrica. Le temperature di lavoro consentite (nel range 100÷200 °C a seconda del materiale specifico) sono, infatti, considerevolmente inferiori a quelle consentite per i conduttori e per i materiali magnetici dolci (comunque > 500°C). Essi sono, quindi, gli elementi che fissano i limiti di potenza, perché vincolano la temperatura massima raggiungibile nelle parti attive. La progettazione di ogni unità elettrica è dunque intimamente connessa alle loro caratteristiche e qualunque ulteriore progresso tecnologico delle macchine elettriche è sempre legato alla tecnologia stessa dei materiali isolanti. Così, ad esempio, lo sviluppo che si è avuto nel campo delle resine sintetiche e nei materiali termo-indurenti ha consentito di aumentare le sollecitazioni elettriche e meccaniche delle macchine elettriche.

Classe	ϑ_{\max}	$\Delta\vartheta_{\max}$	Materiale isolante
	°C	°C	
Y	90		Carta e cartone non impregnati
A	105	65	Carta e cartone impregnati, smalti oleoresinosi
E	120	80	Smalti polivinilacetali, poliuretani
B	130	90	Fibre di vetro impregnate in resine epossidiche, smalti poliuretani modificati. Smalti polivinilacetali modificati se impregnati
F	155	105	Fibre di vetro impregnate in resine poliesteri ed epossidiche. Smalti poliesteri teleftalici, poliuretani modificati, DAGLAS
H	180	140	Smalti poliesterimidici, fibre di vetro e DAGLAS impregnate in vernici classe H
C	200	160	MOMEX: Fibre di vetro e DAGLAS impregnate in resine silconiche. Smalti poliamidico-imidici. Smalti poliesterimidici su conduttori in alluminio.
	220	180	KAPTON. Smalti polimidici. Smalti poliamidimidici su conduttori in alluminio

ϑ_{\max} = temperatura massima

$\Delta\vartheta_{\max}$ = sovratemperatura massima rispetto all'ambiente

Fig. 1.9 – Classi di isolamento secondo CEI e IEC

La normativa nazionale (CEI) e quella internazionale (IEC,...) suddividono i materiali isolanti in classi di isolamento (cfr. fig. 1.9). Esse sono individuate dal valore massimo ammissibile di temperatura di lavoro e dal valore limite di sovratemperatura rispetto all'ambiente; tali limiti non devono essere superati in nessun punto dell'avvolgimento. Le classi di isolamento individuano, a loro volta, classi di macchine sensibilmente diverse dal punto di vista dimensionale.

Le macchine in classe H hanno, ad

esempio, valori di potenza specifica (W/kg) più elevati di quelli in classe F o B.

Alla classe Y appartengono materiali quali il cotone e la carta non impregnati; della classe A fanno parte materiali impregnati quali cotone e presspan; resine epossidiche e materiali polivinilici sono in classe E; mica, fibre di vetro e materiali impregnanti fanno, invece, parte delle classi B, F, H, C, che presentano più elevati valori delle temperature limite di funzionamento.

La normativa internazionale fissa in 40 °C la temperatura ambiente limite: le apparecchiature elettriche sono normalmente dimensionate per lavorare in ambienti con temperature ≤ 40 °C; in tale situazione, del resto molto frequente nelle nostre regioni, il valore di sovratemperatura massima ($\Delta\vartheta_{\max}$) è maggiormente vincolante ai fini della definizione della condizione limite di funzionamento all'interno di una classe di isolamento. Valori più elevati di temperatura sono raggiunti in alcune zone della Terra o in particolari situazioni industriali, in cui i processi di lavorazione comportano forti riscaldamenti ambientali: in tali condizioni è sufficiente rispettare i valori di temperatura massima (ϑ_{\max}).

Temperature maggiori di quelle massime consentite dalla classe producono una riduzione della vita dell'isolante, che segue una legge di tipo pseudo-esponenziale caratteristica del particolare isolante. Per un'ampia gamma di materiali si verifica, con buona approssimazione, la cosiddetta regola del Montsinger, per la quale la vita dell'isolante si dimezza in corrispondenza di un superamento continuativo della temperatura ammissibile di circa 8÷9 °C. Ad esempio, il cotone non impregnato conserva le sue proprietà dielettriche per un periodo di 15÷20 anni, se non è sollecitato a temperature maggiori di 90 °C. A 140 °C (temperatura ampiamente sopportabile dai materiali di classe F, H, e C) la vita si riduce a circa 3 mesi, mentre a 200 °C il cotone può lavorare solo per poche ore.

Siccome, anche in condizioni di regime termico, la temperatura non è uniforme all'interno di una macchina elettrica, è necessario che i valori limite di temperatura non siano superati nel punto più caldo della macchina stessa.

Le **caratteristiche** cui devono soddisfare i materiali isolanti si possono così sintetizzare:

- ✓ **Elevata rigidità dielettrica.** La rigidità dielettrica è il valore del gradiente di potenziale al di sopra del quale si ha la *scarica disruptiva* e si misura in kV/cm. La rigidità dielettrica si intende riferita al materiale inteso come omogeneo e dipende dalla temperatura. In realtà, però, l'omogeneità si può ritenere verificata solo per piccoli spessori; infatti, quanto più lo spessore aumenta, tanto più vi è il pericolo di soffiature nel materiale che riducono la rigidità stessa. Per questa ragione grossi strati di isolante si realizzano incollando, con colla avente rigidità dielettrica maggiore dell'isolante stesso, diversi strati sottili di materiale. Il valore della rigidità dielettrica di un isolante è fornito in genere relativamente a campioni dello spessore di 1 mm. I valori della rigidità elettrica dei materiali isolanti più comuni sono riportati in tab.1.2.
- ✓ **Requisiti meccanici.** Un buon isolante deve poter subire deformazioni senza rompersi almeno nei limiti prescritti dalle norme. Molti buoni isolanti, quali ad es. la bachelite, il vetro, la porcellana, ecc., non sono usati nelle macchine elettriche appunto perché non sono in grado cioè di subire deformazioni.

Tab.1.2 – Rigidità dielettrica di alcuni isolanti

<i>Isolante</i>	<i>Rigidità dielettrica</i>
Olio	80÷150 kV/cm . Gli oli servono anche per il raffreddamento (ad esempio nei trasformatori)
Mica	150÷200 kV/cm per spessori di 0.05 mm. Non ha buoni requisiti meccanici
Micanite	250÷300 kV/cm su spessori di 1 mm. Ha maggiore compattezza della mica ed è composta di mica
Vetro	300 kV/cm circa
Carta	60÷150 kV/cm , per foglio di spessore pari a 0.01 mm. E' uno dei migliori isolanti e viene usato specialmente per i trasformatori, da sola o impregnata con altre sostanze. Presenta lo svantaggio di non essere resistente a strappo per cui se si ha un corto circuito, e conseguentemente una dilatazione dei conduttori, la carta può strapparsi mettendo fuori uso la macchina
Aria	30 kV/cm (a 20°C e 760 mm Hg)

- ✓ **Anigroscopicità.** Un buon isolante non deve essere igroscopico, cioè deve assorbire poca umidità. La presenza di acqua è pericolosa in un isolante: ad es. nell'olio, è sufficiente un contenuto d'acqua pari allo 0.06% per ridurre circa a metà il valore della sua rigidità dielettrica.
- ✓ **Dilatazione.** E' importante specialmente negli isolanti che ricoprono i conduttori. Il coefficiente di dilatazione termica dell'isolante deve essere abbastanza prossimo a quello del metallo da isolare per evitare rotture nell'isolante.
- ✓ **Invecchiamento dell'isolante.** Nel campo di temperature fissato dalla classe di appartenenza, la variazione delle caratteristiche elettriche, termiche e meccaniche deve essere minima. Per questo motivo bisogna essere molto cauti nel sostituire tipo di isolante in una macchina.
- ✓ **Conduttività termica.** Un'elevata conduttività termica è preziosa perché rende più rapida la dispersione del calore dall'interno verso la superficie esterna. Tale dispersione è funzione anche della differenza di temperatura esistente tra l'interno e la superficie esterna: ciascun isolante ha una temperatura massima di lavoro, fissata dalle norme, oltre la quale l'isolante stesso tende a perdere le sue caratteristiche. Un grave problema che si presenta è il fatto che la conduttività termica è legata inscindibilmente alla conduttività elettrica; quanto maggiore è la conduttività termica, tanto maggiore è quella elettrica, pertanto un buon isolante elettrico è anche un buon isolante termico.
- ✓ **Basso angolo di perdita ($\text{tg}\delta$).** Le capacità isolanti di un materiale sono caratterizzate dalle sue caratteristiche dielettriche. Considerando l'isolante nelle stesse condizioni di impiego che si verificano in un condensatore tra le cui armature sia applicata una tensione di valore efficace V , si indica con $\text{tg}\delta$ la tangente trigonometrica dell'angolo $(\pi/2 - \varphi)$ dove φ è l'angolo di sfasamento fra la corrente che attraversa l'isolante e la tensione di alimentazione (fig. 1.10). Nel caso ideale di isolamento perfetto è $\varphi = \pi/2$ e $\delta = 0$. Nel caso reale l'isolante presenta una resistività elevata ma non infinita e, quindi, è sede di perdite. L'angolo $\delta = (\pi/2 - \varphi)$ è detto *angolo di perdita* ed è tanto minore quanto più il dielettrico è isolante. Si è visto sperimentalmente che nel tempo δ aumenta, cioè aumentano le perdite specifiche. Le misure di δ vanno eseguite periodicamente di modo che, in

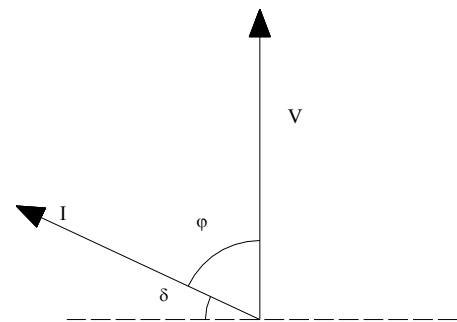


Fig. 1.10- Angolo di perdita.

presenza di una sua brusca variazione si possa evidenziare il deterioramento della resistenza di isolamento della macchina, quindi la necessità della sua sostituzione .

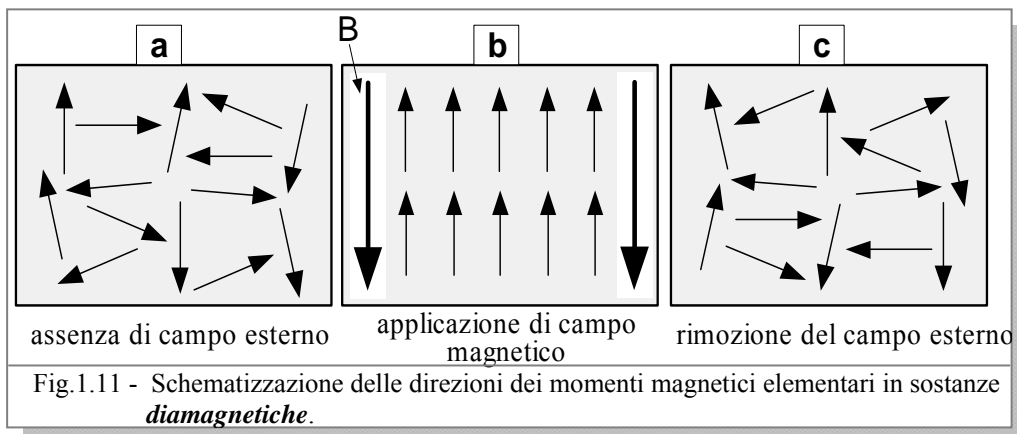
- ✓ *Inattaccabilità* da parte degli agenti esterni. Tali agenti possono essere vapori, acidi o gas provenienti dall'ambiente in cui si trova la macchina, oppure dallo stesso fluido di raffreddamento. Un caso a parte è costituito dagli isolanti esposti agli agenti atmosferici. Per questi motivi gli isolanti vanno scelti in funzione delle caratteristiche dell'ambiente in cui deve lavorare la macchina. Si è anche visto che due dielettrici, pur di elevatissime caratteristiche isolanti, una volta che siano posti a contatto subiscono alterazioni delle loro caratteristiche, per la loro diversa natura chimica.
- ✓ *Compattezza* della struttura. Il materiale deve essere omogeneo, in caso contrario vengono meno le caratteristiche indicate.
- ✓ *Scariche superficiali*. L'isolante deve presentare un elevato valore di tensione per la quale si verifichi la scarica superficiale. Tali scariche dipendono dallo stato della superficie, dalla struttura chimica e dalla sua capacità di assorbire umidità.

1.6 - Materiali magnetici

1.6 a - CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI MAGNETICI

I materiali vengono classificati in base alle proprietà magnetiche che presentano quando sono sottoposti all'azione di un campo magnetico esterno. Una prima suddivisione si deve a M. Faraday che, sulla base dell'osservazione del comportamento macroscopico di alcune sostanze, definì (1845÷1847) *paramagnetiche* quelle che venivano attratte da un generico magnete e *diamagnetiche* quelle che venivano respinte.

In realtà, tutti i materiali reagiscono ad un campo magnetico impresso, anche se tale reazione non è sempre molto evidente. In ogni atomo, infatti, i movimenti degli elettroni intorno ai loro assi e intorno al nucleo possono essere grossolanamente assimilati a 'correnti elettriche' e, come tali, risultano sensibili all'azione di un campo magnetico esterno. La combinazione dei diversi momenti magnetici di 'spin' e di 'orbitale' degli elettroni di un atomo è alquanto complessa e si rimanda a testi specifici di fisica della materia per una più completa comprensione. Senza, quindi, la pretesa di spiegare appieno le motivazioni e/o le correlazioni con la configurazione elettronica, si può affermare che per alcune sostanze gli atomi presentano un momento magnetico risultante nullo, mentre per altre gli atomi si comportano come dipoli magnetici, cioè come dei 'piccoli magneti'. Nel primo caso si ha un comportamento *diamagnetico*, nel senso che la sostanza, sottoposta ad un campo magnetico esterno tende ad indebolirlo, producendo una magnetizzazione in direzione opposta a quella del campo applicato (cfr. fig.1.11), indipendentemente dal verso di quest'ultimo. Un materiale diamagnetico, cioè, non ha momenti magnetici propri, ma soltanto momenti di dipolo indotti da un campo esterno.



Per queste sostanze l'induzione magnetica è, quindi, minore di quella che si avrebbe nel vuoto. Essendo:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J}$$

con \mathbf{J} vettore polarizzazione magnetica (o intensità di magnetizzazione o induzione intrinseca) generata dal materiale magnetizzato. Dalla fig.1.11b si deduce che, in termini di ampiezze, l'equazione precedente si scrive:

$$B = \mu_0 H - J \quad \rightarrow \quad B < \mu_0 H$$

e, cioè, la permeabilità relativa è $\mu_r < 1$.

Un comportamento di questo tipo è evidente nel *bismuto* (già Faraday l'aveva osservato), ma si presenta anche per numerosi altri elementi, tra i quali l'oro, l'argento, il rame, il mercurio, l'idrogeno, l'azoto, il carbonio, i gas nobili. Anche alcuni composti quali l'acqua e il benzene sono diamagnetici (cfr. tab. 1.3).

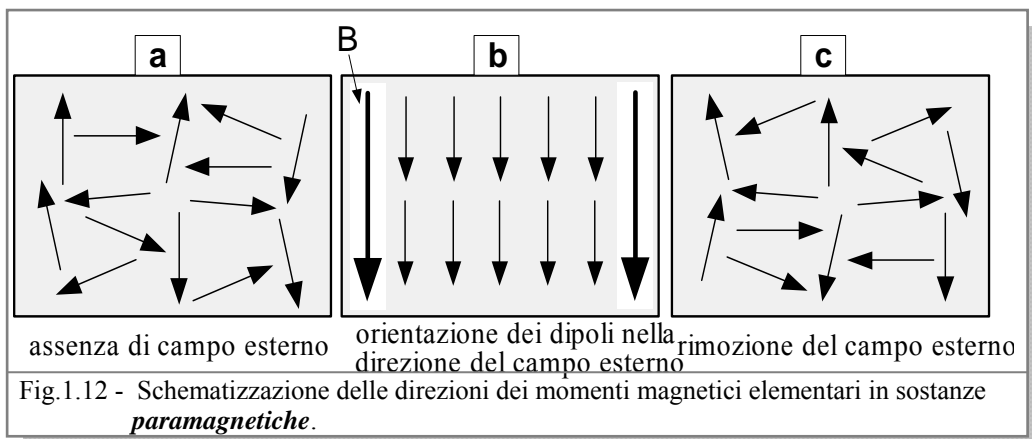
Tab. 1.3 - Valori di permeabilità relativa per alcune sostanze *diamagnetiche* e *paramagnetiche*

Sostanze <i>diamagnetiche</i>		Sostanze <i>paramagnetiche</i>	
	μ_r		μ_r
Bismuto	$1 - 16.3 \cdot 10^{-5} = 0,999840$	Alluminio	$1 + 2.2 \cdot 10^{-5} = 1.00022$
Mercurio	$1 - 3.2 \cdot 10^{-5} = 0,999968$	Platino	$1 + 30 \cdot 10^{-5} = 1.00030$
Rame	$1 - 1.0 \cdot 10^{-5} = 0,999990$	Cromo	$1 + 33 \cdot 10^{-5} = 1.00033$
Acqua	$1 - 0.9 \cdot 10^{-5} = 0,999991$	Cu Cl₂	$1 + 35 \cdot 10^{-5} = 1.00035$

Dalla tabella si deduce anche che la diminuzione di permeabilità nei materiali diamagnetici è molto modesta, per cui frequentemente si assume per questi materiali un comportamento analogo a quello del vuoto con $\mu_r \approx 1$.

Una caratteristica importante del diamagnetismo è la sostanziale indipendenza (della permeabilità μ_r) dalla temperatura.

Le sostanze i cui atomi sono assimilabili a dipoli magnetici (liberi di muoversi l'uno rispetto all'altro) si dicono *paramagnetiche*. In presenza di un campo magnetico esterno, i momenti di dipolo atomici, normalmente orientati in maniera casuale (cfr. fig.1.12a), si dispongono nel verso del campo stesso, rinforzandolo. Al cessare dell'azione esterna i momenti ritornano ad essere orientati in maniera casuale.



La polarizzazione magnetica \mathbf{J} su definita è positiva, per cui l'induzione risultante nel materiale è maggiore di quella che si avrebbe nel vuoto; cioè:

$$B = \mu_0 H + J \quad \rightarrow B > \mu_0 H \quad \rightarrow \mu_r > 1$$

L'alluminio, alcuni elementi di transizione nella tavola periodica e tutti i lantanidi (terre rare) sono paramagnetici. Anche per i materiali paramagnetici si presenta il fenomeno del diamagnetismo, che è però trascurabile in quanto di entità notevolmente inferiore.

In poche sostanze (in genere i metalli), i fenomeni paramagnetici sono sostanzialmente indipendenti dalla temperatura. Come mostrato da Pierre Curie nel 1895, invece, per la gran parte delle sostanze paramagnetiche l'intensità del campo interno prodotto (J/μ_0) in corrispondenza di un fissato campo esterno H , è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta, cioè:

$$\mu_r - 1 = \frac{C}{T} \quad \text{con } C = \text{costante di Curie}$$

Al crescere della temperatura, l'orientamento degli atomi nella direzione del campo esterno è reso più difficile dal moto di agitazione termica degli atomi stessi che tende a prevalere, e la permeabilità relativa tende ad 1.

Dalla relazione precedente si deduce che la permeabilità relativa aumenta al diminuire della temperatura assoluta e che per $\vartheta \leq \vartheta_C$ (con ϑ_C pari alla temperatura di Curie) si ha una magnetizzazione spontanea della sostanza che diventa *ferromagnetica* (come indicato poco più avanti).

Le sostanze paramagnetiche, al di sotto di una certa temperatura (definita per una specifica sostanza) presentano caratteristiche magnetiche profondamente diverse (cfr. ad es. fig.1.13): dopo essere state sottoposte ad un campo magnetico esterno, restano magnetizzate anche quando viene rimosso il campo stesso. Tale fenomeno è detto *ferromagnetismo*, perché è molto evidente nel ferro e proprio sul ferro fu per primo osservato nel 1895 da Pierre Curie. Quest'ultimo aprì la strada alla moderna teoria del magnetismo, *classificando* i materiali in *diamagnetici*, *paramagnetici* e *ferromagnetici*, ed è col suo nome (temperatura di Curie) che si indica la temperatura di transizione tra il comportamento paramagnetico e quello ferromagnetico (fig.1.14).

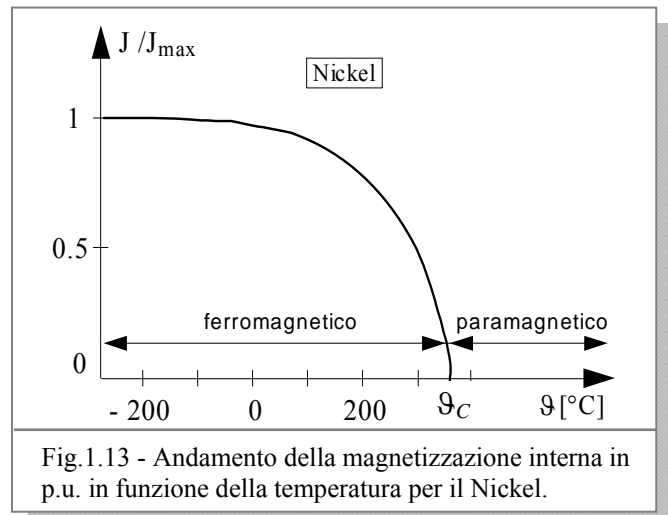


Fig. 1.13 - Andamento della magnetizzazione interna in p.u. in funzione della temperatura per il Nickel.

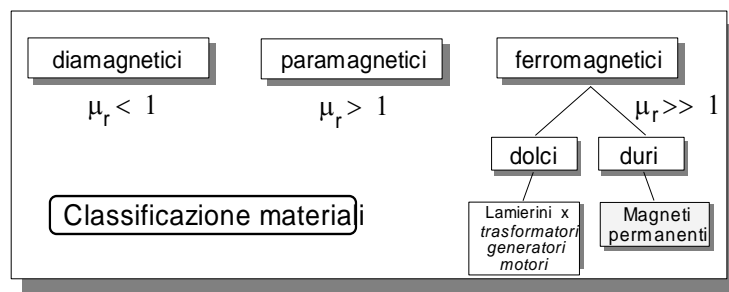


Fig. 1.14 - Classificazione tradizionale dei materiali dal punto di vista magnetico.

Il ferro dolce (Fe) per $\vartheta < 768^\circ C$, il cobalto (Co) per $\vartheta < 130^\circ C$ e il Nickel (Ni) per $\vartheta < 358^\circ C$ sono gli unici tre elementi (tra l'altro consecutivi nella tavola periodica con n. atomico 26, 27 e 28 rispettivamente) che presentano caratteristiche ferromagnetiche a tutte le ordinarie temperature

ambiente. E' per tale motivo che almeno uno di essi è frequentemente presente nei diversi materiali ferromagnetici. Ad essi si aggiunge il Gadolinio (*Gd*, n. atomico 64) per $9 < 16^\circ\text{C}$, il Disprosio (*Dy*, n. atomico 66) e diversi composti come, ad esempio, l'ossido di Cromo (CrO_2). Il fatto che alcune leghe di metalli non ferromagnetici (ad es. 65% rame, 25% manganese e 10% alluminio) abbiano un comportamento ferromagnetico dimostra che non si tratta di una proprietà di alcuni elementi, ma solo di un fenomeno connesso con la disposizione degli orbitali elettronici.

In conclusione, i materiali diamagnetici -debolmente respinti da un magnete- hanno atomi senza momenti magnetici permanenti, ma soltanto dipoli indotti da campi esterni. I materiali paramagnetici -debolmente attratti da un magnete- hanno atomi liberi con momenti magnetici permanenti. I materiali ferromagnetici -fortemente attratti da un magnete- hanno dipoli magnetici costituiti da piccole regioni, dette "domini" (come illustrato più dettagliatamente in seguito), in cui tutti gli atomi hanno i momenti magnetici orientati nella stessa direzione.

1.6 b - MATERIALI FERROMAGNETICI

1.6 b.1- Domini magnetici elementari

All'interno dei materiali ferromagnetici si formano dei domini elementari detti anche domini di Weiss, cioè degli insiemi relativamente piccoli di atomi o molecole (con dimensioni trasversali di circa $0.01 \div 1 \text{ mm}$ e, comunque, almeno pari a 10^3 volte il diametro di un atomo), in ciascuno dei quali i momenti magnetici dei singoli atomi hanno tutti la stessa orientazione. All'interno di un generico dominio, cioè, la magnetizzazione spontanea è pari a quella di saturazione del materiale. Ciascun dominio rappresenta a sua volta un dipolo magnetico, con una propria direzione di magnetizzazione, in genere diversa da dominio a dominio.

Un materiale ferromagnetico, mai precedentemente magnetizzato, presenta una magnetizzazione propria (polarizzazione magnetica) nel complesso nulla (cfr. fig.1.15) o, comunque bassa, perché non vi è sensibile prevalenza di una direzione di orientazione dei domini rispetto alle altre.

Quando viene impresso un campo magnetico esterno, i domini tendono a ruotare e ad orientarsi concordemente alla sua direzione.

Le pareti dei domini, inoltre, tendono a scorrere determinando variazioni nelle dimensioni dei domini stessi: quelli che hanno direzione parallela al campo impresso si ingrandiscono a scapito degli altri. La rotazione dei domini e dei dipoli al loro interno necessita di energia. Più è grande un dominio, più è elevata l'energia necessaria a determinarne la rotazione. In particolare nel ferro si è osservato che per intensità medio-basse del campo impresso si ha

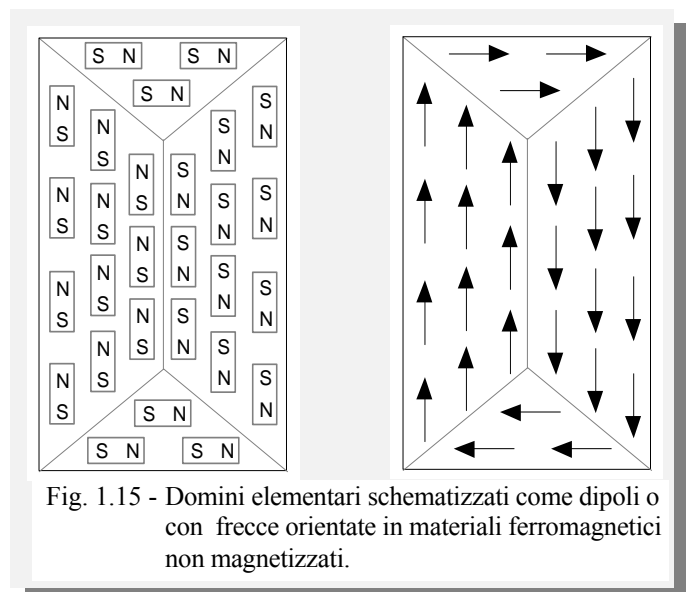


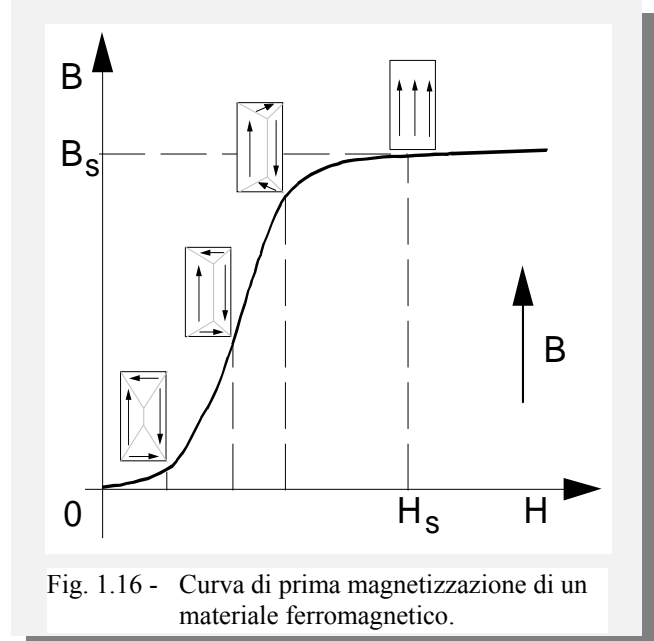
Fig. 1.15 - Domini elementari schematizzati come dipoli o con frecce orientate in materiali ferromagnetici non magnetizzati.

prevalentemente un ingrandimento dei domini, mentre per intensità elevate si ha la rotazione degli stessi. Mentre nei materiali paramagnetici i dipoli atomici vengono orientati su scala microscopica, in quelli ferromagnetici si ha l'orientazione dei domini su scala macroscopica.

L'effetto dell'orientazione dei domini è che l'applicazione di campi esterni anche deboli determina ampie variazioni della magnetizzazione risultante del materiale, che raggiunge valori anche migliaia di volte superiori a quelli originali. Una *prima caratteristica* dei materiali ferromagnetici è, quindi, l'*elevato valore di permeabilità* relativa, cioè $\mu_r \gg 1$.

1.6 b.2- Saturazione magnetica

Con un campo esterno sufficientemente elevato, in seguito allo scorrimento delle pareti dei domini, scompaiono tutti i domini aventi direzione di magnetizzazione diversa da quella esterna e si viene a formare un unico dominio. La direzione di magnetizzazione dell'unico dominio rimasto ruota fino a diventare parallela a quella del campo impresso (cfr. fig.1.16). In questa condizione è ovviamente massimo il contributo del materiale ferromagnetico al campo complessivo: si dice che si è raggiunta la *saturazione magnetica*. In fig.1.16 è rappresentata schematicamente l'orientazione crescente dei domini nella direzione del campo esterno (supposta costante e verticale in figura) all'aumentare dell'intensità di quest'ultimo fino alla saturazione. Dalla stessa figura si deduce un'ulteriore caratteristica dei materiali ferromagnetici consistente nella non costanza della permeabilità al variare dell'intensità del campo impresso, a differenza di quanto avviene per i materiali diamagnetici e paramagnetici.



Quando viene rimosso il campo esterno, i domini tendono a disporsi disordinatamente ed a riassumere le dimensioni originarie, ma non ritornano completamente alla condizione iniziale. Permane, infatti, una certa prevalenza di orientazione dei domini nella direzione del campo al quale sono stati sottoposti. Il corpo assume, cioè, le caratteristiche di un magnete artificiale (in contrapposizione ai magneti naturali, per i quali si ritiene che la magnetizzazione sia conseguenza dell'esposizione casuale a campi esterni, ad esempio dovuti a fulmini).

1.6 b.3- Isteresi magnetica

L'opposizione alle variazioni di orientamento dei domini si manifesta non solo quando varia l'intensità del campo esterno impresso, ma anche nel caso in cui cambia la direzione di quest'ultimo. La riorganizzazione dei domini all'interno di un materiale ferromagnetico segue, cioè, con ritardo le variazioni del campo impresso. Questo fenomeno, detto *isteresi magnetica*, si

presenta in maniera più o meno accentuata in tutti i materiali ferromagnetici, e determina la loro caratteristica principale, consistente nella capacità di conservare un momento magnetico risultante anche in assenza di campo impresso dall'esterno.

Se, quindi, dopo che un corpo di materiale ferromagnetico 'vergine' è stato magnetizzato fino

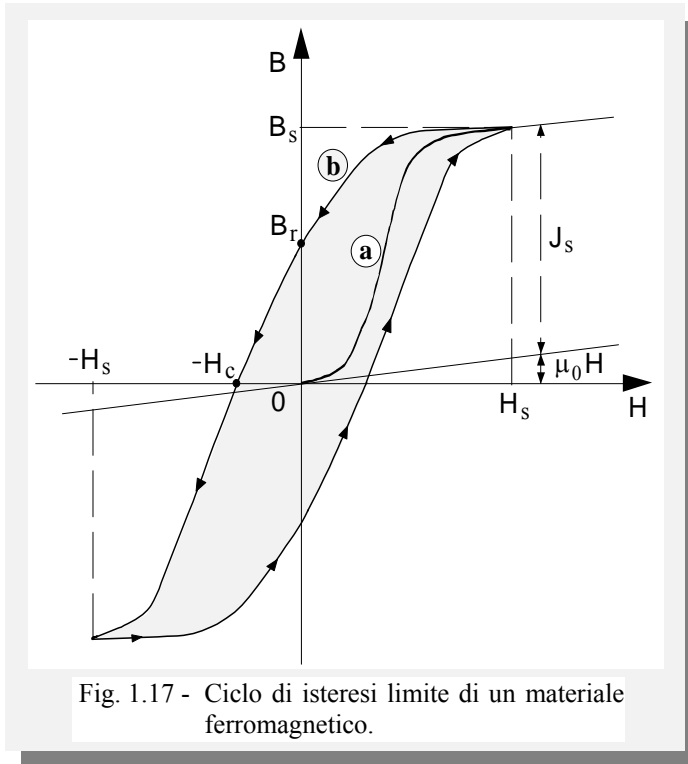


Fig. 1.17 - Ciclo di isteresi limite di un materiale ferromagnetico.

alla saturazione (tratto **a** in fig.1.17), si riduce progressivamente l'intensità del campo esterno applicato, l'induzione risultante segue l'andamento **(b)** in figura. Il valore B_r assunto quando il campo esterno viene completamente rimosso ($H=0$) è detto *induzione residua*. Per ridurre ulteriormente l'induzione bisogna applicare un campo esterno di direzione opposta a quella precedente (2° quadrante in figura, valori negativi di H). Il valore $|H_c|$ necessario ad azzerare completamente l'induzione è detto *campo coercitivo*. Continuando a diminuire il campo H fino ad un valore simmetrico del massimo precedentemente raggiunto, si passa nel 3° quadrante e si raggiunge l'induzione di

saturazione $-B_s$. Se, a questo punto, ci si riporta progressivamente ad H_s , si ottiene la classica curva chiusa di fig.1.17, detta **ciclo di isteresi**. In realtà, quello descritto è il cosiddetto *ciclo limite*, in quanto rappresenta la massima area delimitata nel piano $B-H$ da una magnetizzazione alternativa. Esternamente al ciclo limite non vi è alcuno stato di magnetizzazione possibile per il materiale preso in esame. Applicando campi esterni con valori massimi $H_{max} < H_s$, tali da non portare il materiale in saturazione, si avrebbero cicli di isteresi più interni (fig.1.18); per valori $H_{max} > H_s$ i due

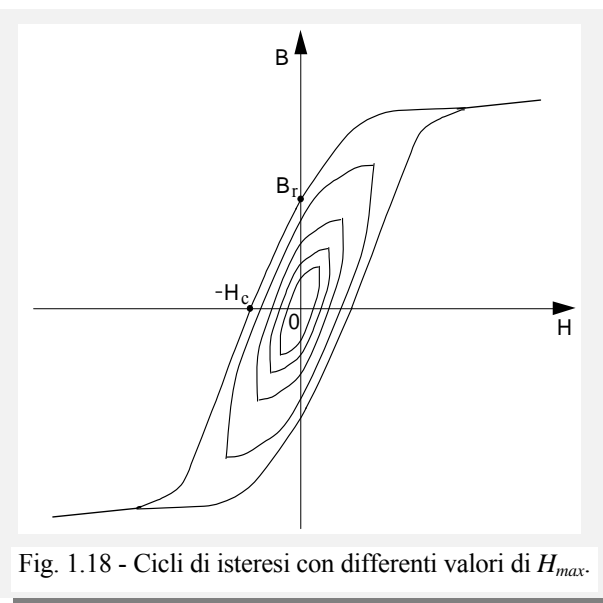


Fig. 1.18 - Cicli di isteresi con differenti valori di H_{max} .

tratti ascendenti e discendenti del ciclo vanno a coincidere con la retta di equazione:

$$B = J_s + \mu_0 H \quad (1.2)$$

rappresentata in fig.1.19. Nella stessa figura è riportato anche il ciclo di isteresi $J(H)$ riferito alla polarizzazione magnetica o intensità di magnetizzazione o induzione intrinseca J . Si è, inoltre, indicato con J_s la polarizzazione di saturazione che resta costante per valori del campo maggiori di H_s . Come deducibile dalla (1.2), i valori di induzione e di polarizzazione residua coincidono, cioè:

$$J_r = B_r,$$

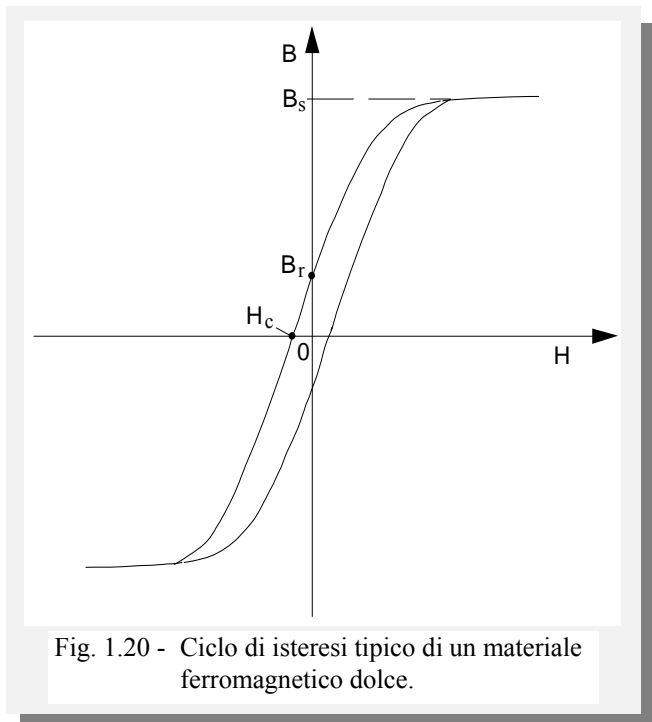
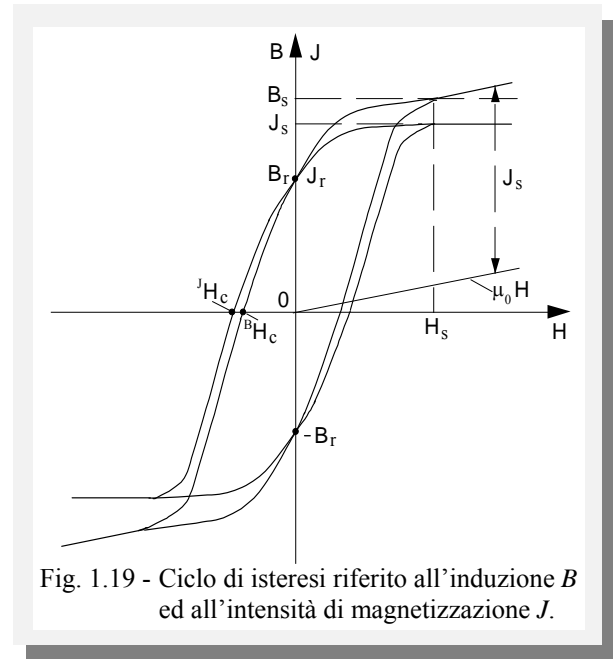
mentre il campo coercitivo JH_c necessario ad azzerare J è in valore assoluto maggiore di quello BH_c che porta a zero l'induzione. Quando $J=0$ il materiale è completamente smagnetizzato, cioè l'orientamento dei domini non ha alcuna direzione preferenziale. Dalla fig.1.19 si deduce anche che nel primo quadrante l'induzione intrinseca J è sempre minore dell'induzione complessiva B ; mentre avviene il contrario nel secondo quadrante. Per alcuni materiali (ad es. AlNiCo) la differenza tra le due curve è molto piccola; per altri (ad es. le ferriti) è invece tutt'altro che trascurabile.

La forma del ciclo di isteresi ed i suoi punti singolari sono molto importanti per definire le caratteristiche dei materiali ferromagnetici. In particolare l'*area del ciclo* è una misura di quanto forte (“dura”) sia l'opposizione del materiale alla magnetizzazione ed alla smagnetizzazione. I materiali ferromagnetici vengono solitamente suddivisi in *dolci* e *duri* a seconda che l'area del ciclo è piccola o grande rispettivamente.

1.6 b.4- Materiali ferromagnetici dolci

Vengono definiti *dolci* i materiali ferromagnetici che hanno il ciclo di isteresi stretto e valori elevati di permeabilità (elevata pendenza, cioè, della linea media del ciclo); offrono, in definitiva, scarsa opposizione alla magnetizzazione, nel senso che l'induzione segue rapidamente le variazioni del campo. A fronte, quindi, di un'elevata induzione di saturazione (1.8÷2.2 T), i valori di induzione residua e di campo coercitivo sono bassi (cfr. fig.1.20). Sottoposti a magnetizzazione ciclica, inoltre, i materiali dolci presentano basse perdite per isteresi.

E', questo, il caso del ferro puro, degli acciai al silicio (3÷4% di Si, con elevatissimi valori di permeabilità e basse perdite per isteresi), delle leghe ferro-nickel denominate 'Permalloy' o 'Supermalloy' (78÷79 % Ni, 15÷20 % Fe, più eventualmente altri componenti, con elevatissima permeabilità iniziale), delle ferriti zinco-manganese che, avendo resistività molto elevate, presentano basse perdite per correnti parassite e sono quindi utilizzate in applicazioni ad elevata frequenza,



delle leghe ferro-cobalto, delle leghe ferro-alluminio-silicio e di numerosi materiali amorfi. Nell'ambito delle macchine elettriche questi materiali dolci, usati in genere come lamierini (nello statore e nel rotore dei motori asincroni, in continua, sincroni, ...), svolgono la funzione di "via" delle linee di forza del campo magnetico. Mantenendo bassi i valori di riluttanza dei circuiti magnetici, contribuiscono a migliorare l'accoppiamento magnetico tra i diversi avvolgimenti, consentendo, così, la riduzione delle dimensioni di macchina e l'incremento del rendimento. I materiali dolci sono impiegati con successo nei circuiti magnetici dei trasformatori e dei motori elettrici, nelle testine di lettura e scrittura dei dischi da computer o dei nastri di registrazione, per i quali è richiesto che la magnetizzazione vari rapidamente.

1.6 b.5- Materiali ferromagnetici duri

Sono, invece, detti *duri* i materiali magnetici con marcata isteresi, cioè con elevata 'opposizione' all'orientazione dei domini nella direzione di un campo esterno ed alla successiva smagnetizzazione. I cicli di isteresi di questi materiali sono larghi e tozzi (cfr. fig.1.21) ed in qualche caso di forma praticamente rettangolare (cfr. fig.1.22); sono caratterizzati da non elevate

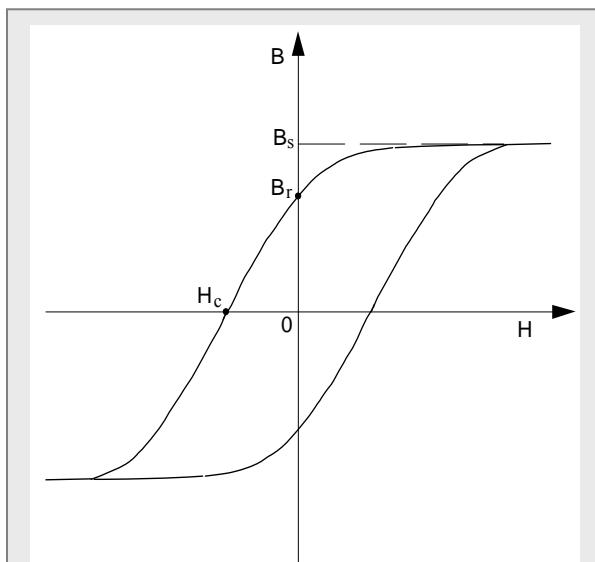


Fig. 1.21 - Ciclo di isteresi tipico di un materiale ferromagnetico duro.

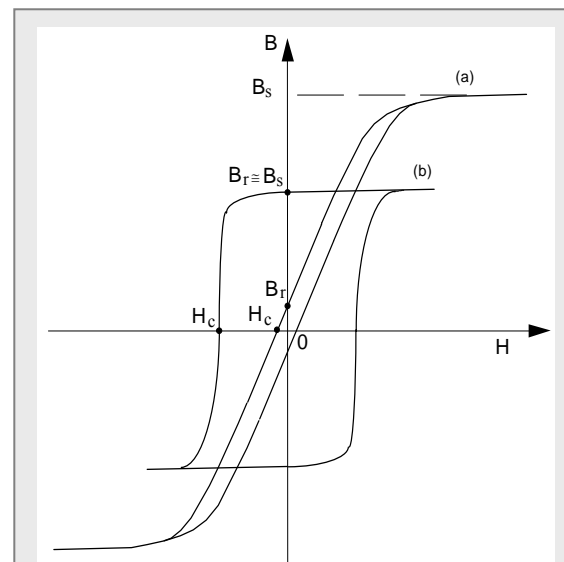


Fig. 1.22 - Confronto qualitativo tra i cicli di isteresi limite di un materiale magnetico dolce (a) e duro (b).

induzioni di saturazione ($0.4 \div 1.2$ T), ma elevati valori di induzione residua e di campo coercitivo.

Per essi è maggiormente pronunciata la caratteristica dei materiali ferromagnetici di rimanere magnetizzati anche quando il campo esterno viene azzerato: si prestano, pertanto, ad essere impiegati come magneti permanenti. Alcuni tipi di questi ultimi (in particolare quelli alle *terre rare*) conservano la magnetizzazione non solo quando si annulla il campo esterno, ma anche in presenza di elevati campi impressi aventi direzione opposta a quella di magnetizzazione. In maniera duale, sono ovviamente necessari elevatissimi valori del campo magnetico esterno per raggiungere la saturazione. Siccome l'isteresi è fortemente influenzata dalla presenza di impurità, i magneti permanenti sono in genere 'drogati' con altri elementi al fini di inibire (o, almeno, contrastare) la rotazione dei domini magnetici e lo slittamento delle loro pareti. Ciò è, in genere, accompagnato ad

un corrispondente decremento del flusso prodotto dal magnete, perché viene a ridursi la percentuale di materiale ferromagnetico puro. Tra i materiali ferromagnetici duri si possono citare le leghe ferro-alluminio-nickel-cobalto (AlNiCo), gli acciai martensitici, numerosi composti intermetallici contenenti terre rare e metalli di transizione.

Nelle memorie di massa dei computer (floppy e hard-disk), nei nastri per cassette musicali, nei poli di eccitazione di motori elettrici (a collettore o brushless) si usano i materiali duri perché è richiesto il mantenimento di una magnetizzazione persistente.

Dalla tab.1.4 si deduce che i materiali magnetici dolci differiscono da quelli duri principalmente per i valori della permeabilità e del campo coercitivo.

Ai materiali dolci e duri appartengono anche le ferriti, che, sono più propriamente dei materiali *ferrimagnetici*. Si tratta di ossidi ceramici composti da ossido di metallo bivalente + ossido di ferro Fe_2O_3 . Se il metallo è Cd, Co, Cu, Mg, Mn, Ni, Zn, le ferriti sono ‘dolci’; se, invece, il metallo è Ba o Sr, le ferriti sono materiali ‘duri’; si ha, infine, la magnetite se il metallo è Fe.

Tab. 1.4 - Alcuni valori caratteristici di materiali ferromagnetici dolci e duri

		Materiali magnetici							
		dolci				duri			
		<i>Ferro ordinario</i>	<i>Permalloy</i> (78.5% Ni, 21.5% Fe)	<i>Supermalloy</i> (79% Ni, 15% Fe, 5% Mo, 0.5% Mn)	<i>Ferrite</i> Zn-Mn	Acciai al cromo, tungsteno	AlNiCo	Ferrite di bario	NdFeB
Permeabilità iniziale	μ_r	800	10.000	100.000	2.000	30	4	1	20
Permeabilità massima	$\mu_{r,max}$	10.000	50.000	300.000	3.000				
Induzione residua	B_r [T]	0,9	0,6	0,6	0,15	1,1	0,73	0,35	1,2
Campo coercitivo	H_c [A/m]	20	4	0,4	20	5.000	34.000	200.000	400.000

1.6 b.6- Curva di media magnetizzazione

Con riferimento ai diversi cicli di isteresi di fig.1.18, si può considerare la curva ‘luogo dei punti di vertice’ dei diversi cicli, detta *curva di media magnetizzazione* (fig.1.23) Essa non è molto distante dalla curva di prima magnetizzazione (curva *a* in fig.1.17) ed è anche prossima alla curva media dei cicli di isteresi (curva media di magnetizzazione). La curva di media magnetizzazione rappresenta un legame funzionale biunivoco tra H e B e viene impiegata nella modellizzazione semplificata dei circuiti magnetici, per i quali sarebbe complesso

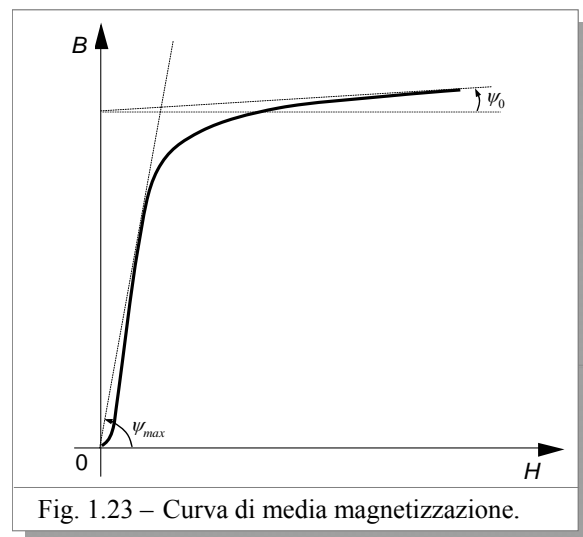


Fig. 1.23 – Curva di media magnetizzazione.

portare in conto la relazione polidroma tra H e B e viceversa. Come si evince dalla fig.1.23, la curva parte con bassa pendenza in corrispondenza di bassi valori di induzione, presenta un ‘ginocchio’ in corrispondenza del quale si ha la permeabilità massima $\mu_{max} = \operatorname{tg} \psi_{max}$ e, per un ulteriore aumento di H o B , la curva diminuisce sensibilmente la sua pendenza fino a diventare una retta inclinata sull’orizzontale di un angolo $\psi_0 = \operatorname{arctg} \mu_0$ (saturazione magnetica)

1.6 b.7- Correnti parassite

Siccome i materiali magnetici sono anche conduttori elettrici, quando sono sottoposti a magnetizzazione alternativa, le tensioni indotte nella sezione trasversale rispetto alla direzione di \mathbf{B} producono delle correnti (cfr. fig.1.23a). Queste ultime sono dette *correnti parassite* e danno luogo a delle perdite indesiderate, dette *perdite per correnti parassite*, che si sommano alle perdite per isteresi di cui si è detto. Per contrastare questo fenomeno si cerca di aumentare la resistività elettrica del materiale magnetico con l'impiego di 'drogaggi' opportuni (in genere si aggiunge silicio sino ad una percentuale ponderale del 5%). Oltre certi limiti non è ovviamente possibile andare, anche per non alterare le caratteristiche magnetiche e di resistenza meccanica del materiale. Il provvedimento che viene preso è, quindi, quello della *laminazione*; cioè, in luogo del nucleo magnetico *massiccio*, si utilizzano più lamierini sovrapposti e isolati elettricamente l'uno dall'altro. Come si può evincere dalla fig.1.24b, il percorso delle correnti parassite viene fortemente aumentato e, quindi, con

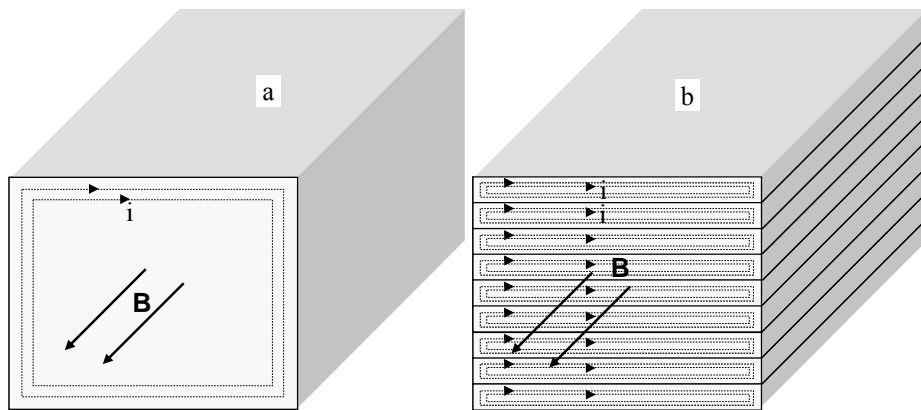


Fig. 1.24 – Nucleo magnetico massiccio (a) e laminato (b)

resistenze più elevate si riduce il valore delle correnti parassite e, di conseguenza, si riducono le perdite dovute a questo fenomeno. Più sottili sono gli spessori dei lamierini magnetici, minori sono le perdite per correnti parassite. In generale i lamierini hanno in genere spessore di:

0.20÷0.35 mm per i trasformatori

0.50 mm per le macchine rotanti

Dalla letteratura sull'argomento si ha che, in condizioni di magnetizzazione alternativa con forma d'onda sinusoidale, le perdite per correnti parassite risultano proporzionali al quadrato della frequenza f , al quadrato dell'induzione massima B_M ed al quadrato dello spessore di lamierino Δ :

$$P_{cp} = k_{cp} f^2 B_M^2 \Delta^2 \quad (1.3)$$

in cui il coefficiente k_{cp} dipende dal tipo di materiale e dal volume di materiale considerato.

L'isolamento dei lamierini può essere assicurato da vernici isolanti o mediante particolari processi termochimici; tali isolanti devono avere piccoli spessori per assicurare elevati valori del *coefficiente di stipamento* (o di *laminazione*) $k_s = S_{Fe}/S_{L,Fe}$; in genere $k_s = 0.96 \div 0.99$. Il coeff. di stipamento è il rapporto tra la sezione netta di ferro S_{Fe} (quella dei lamierini magnetici nudi) e la sezione lorda di ferro $S_{L,Fe}$ (quella dei lamierini compresi dell'isolante).

1.6 c – PERDITE NEL FERRO

Come già anticipato ai paragrafi precedenti, i circuiti magnetici delle macchine elettriche sono sedi di perdite quando sono sottoposti a magnetizzazione alternativa. I fenomeni che danno luogo a queste perdite sono due: l'isteresi magnetica e le correnti parassite.

Le perdite per correnti parassite si calcolano con la relazione (1.3).

Le perdite per isteresi si possono calcolare con la formula di Steinmetz:

$$P_i = k_i f B_M^{1,6} \quad (1.4)$$

o con quella di Richter;

$$P_i = k_i f B_M^2 \quad (1.5)$$

valida per valori di induzione elevati ($>1 T$). Le perdite per isteresi dipendono dal quadrato dell'induzione massima (che definisce l'ampiezza dell'area del ciclo di isteresi) e dalla frequenza (numero di cicli percorsi nell'unità di tempo)

[La (1.5) è la versione semplificata della formula di Richter completa: $P_i = (a B_M + b B_M^2) f$].

In definitiva, le perdite complessive che si hanno in un certo volume di materiale magnetico sottoposto a magnetizzazione alternativa sono dette **perdite nel ferro** e sono espresse da:

$$P_{Fe} = P_i + P_{cp} = k_i f B_M^2 + k_{cp} f^2 B_M^2 \Delta^2 = (k_i f + k_{cp} f^2 \Delta^2) B_M^2 \quad (1.6)$$

I lamierini ferromagnetici sono caratterizzati dalla cosiddetta “cifra di perdita” C_P , tabellata dai costruttori di lamierini stessi. Essa rappresenta le perdite nel ferro globali (per isteresi e correnti parassite) di 1 kg di materiale sottoposto a magnetizzazione alternativa a 50 Hz (o 60 Hz) con forma d'onda di induzione sinusoidale avente valore massimo $B_M = 1 T$. In taluni casi viene fornito il valore della perdita specifica (W/kg) a 1.5 T o a 1.7 T. Per ovviare agli errori del riporto delle perdite ad una induzione di lavoro B_M , in luogo della sola cifra di perdita, i costruttori di lamierini forniscono la curva $P_{Fe}(B_M)$ delle perdite specifiche al variare dell'induzione di lavoro (a 50 Hz e a 60 Hz)

1.6 d – LAMIERINI ISOTROPI E ANISOTROPI

I lamierini magnetici vengono realizzati con processi di laminazione ‘a caldo’ (a temperature a cui la lamiera di partenza è incandescente e più facilmente lavorabile, fig.1.25) o ‘a freddo’ (per ottenere particolari caratteristiche quali la planarità e la uniformità di spessore con tolleranze più spinte, o la resistenza meccanica). In questi casi i lamierini risultano magneticamente *isotropi*, hanno cioè la stessa permeabilità magnetica lungo tutte le direzioni. Questi lamierini sono utilizzati nelle macchine rotanti e nei trasformatori di piccola potenza.

Un altro tipo di lamierino, introdotto già alla fine degli



Fig.1.25 – Laminazione a caldo

anni '50, è detto “*a grano orientato*” o “*a cristalli orientati*”. E’ una lega di ferro e silicio in cui, mediante un rigoroso controllo della composizione chimica e con delle particolari procedure di laminazione a freddo e ricottura, si determinano caratteristiche magnetiche nella direzione di laminazione di gran lunga superiori a quelle degli altri tipi di lamierini laminati a caldo o a freddo.

I vantaggi dei lamierini a grano orientato si possono sintetizzare in:

- elevati valori di permeabilità magnetica nella direzione di laminazione;
- bassi valori delle perdite per magnetizzazione lungo la direzione di laminazione;
- fattore di stipamento molto alto con elevata planarità dei lamierini;
- il fornitore è in grado di *assicurare* le caratteristiche magnetiche del materiale, che può essere utilizzato direttamente, senza trattamenti preliminari;
- l'utilizzatore deve eventualmente provvedere ad un trattamento termico intorno agli 800 °C per il ripristino delle caratteristiche magnetiche di partenza, se alterate dalle fasi di lavorazione del nucleo magnetico del trasformatore.

I lamierini a grano orientato si presentano fortemente *anisotropi* dal punto di vista magnetico; hanno, cioè, elevata permeabilità magnetica lungo la direzione di laminazione e molto bassa nella direzione ortogonale (raggiunge valori inferiori a quelli dei materiali isotropi non a cristalli orientati).

1.6 e – ISOLAMENTO DEI LAMIERINI

Se i lamierini magnetici non sono isolati, sulla loro superficie esterna si forma uno strato di ossido che aumenta la resistenza superficiale e che, ad esempio, renderebbe (al limite) utilizzabili i lamierini per applicazioni in cui essi non sono sottoposti ad elevate differenze di potenziale, come, ad esempio, nei poli principali delle macchine in corrente continua.

Da alcuni decenni, ormai, i lamierini vengono forniti già isolati, su una o su entrambe le facce. Si utilizzano rivestimenti inorganici (come la Carlyte, brevettata dalla società ARMCO) oppure vernici organiche a base di resine fenoliche, aventi le seguenti caratteristiche:

- spessori estremamente sottili (pochi micron) in maniera da ottenere elevati valori dei fattori di laminazione (o stipamento);
- elevata resistività elettrica per mantenere alta la resistenza interlamierini;
- elevata aderenza alle superfici di acciaio, in maniera da non distaccarsi durante la tranciatura o l'eventuale punzonatura, o durante il funzionamento del trasformatore;
- mantenimento delle proprie caratteristiche anche dopo trattamento termico distensivo (a circa 800-850 °C) dei lamierini;
- non alterabilità in presenza dell'olio o di altri fluidi refrigeranti del trasformatore, nel senso della conservazione delle proprie caratteristiche dielettriche da un lato e non contaminazione dell'olio dall'altro.

Il rivestimento svolge anche una funzione protettiva contro l'ossidazione che si manifesta durante il raffreddamento dei lamierini sottoposti a ricottura o durante il loro stoccaggio.

1.6f- TRATTAMENTI TERMICI DEI LAMIERINI A CURA DELL'UTILIZZATORE

In generale i lamierini vengono forniti "pronti per l'uso" senza necessità di dover ricorrere a trattamenti termici aggiuntivi. Frequentemente, però, le sollecitazioni meccaniche determinate nei lamierini dalla tranciatura (con cesoie) o dalla punzonatura ne modificano le caratteristiche magnetiche in maniera sensibile, determinando un incremento delle perdite nel ferro ed una diminuzione della permeabilità.

Al fine di alleggerire le tensioni interne e riprendere le proprietà magnetiche originali è necessario un *trattamento termico distensivo*. Questo processo può essere realizzato su pacchi di lamierini introdotti in un forno chiuso in cui l'aria viene sostituita da una particolare atmosfera non ossidante, oppure sui lamierini singoli in un forno continuo. In entrambi i casi è necessario evitare pericolose sollecitazioni termiche.

Nel caso di trattamento di pacchi di lamierini è innanzitutto importante che la base (pianale) su cui essi sono appoggiati sia il più possibile piana, per evitare deformazioni. La temperatura da raggiungere è di circa 800 °C; il riscaldamento deve essere controllato (anche mediante sonde) in maniera da non superare nel punto più caldo la temperatura di 820÷830 °C, assicurando almeno 760°C nei punti più freddi. Il trattamento può durare da 1 a 5 ore a seconda della larghezza dei lamierini, dell'altezza del pacco e della configurazione del forno. Il raffreddamento fino a 350÷400 °C deve essere effettuato senza elevati gradienti di temperatura, con una rapidità di variazione di temperatura al massimo pari a 25 °C/ora.

Nel caso di trattamento termico dei lamierini singoli, i tempi sono molto più ridotti, perché è più facile ottenere il riscaldamento uniforme ed il conseguente rilassamento dei lamierini. In genere, i lamierini devono permanere ad una temperatura di circa 800 °C per un tempo variabile da 30 secondi a 2 minuti, e devono essere raffreddati fino a circa 400 °C in circa 30 secondi.

L'esperienza pratica ha mostrato che la rapidità di riscaldamento e di raffreddamento nei processi di trattamento termico hanno importante influenza nel mantenimento della planarità dei lamierini. Eccessivi gradienti di temperatura dovuti a riscaldamenti o raffreddamenti troppo rapidi o non uniformi, determinano espansioni differenziate dal centro verso i bordi dei singoli pezzi, con conseguente ondulazione nel lamierino. Una volta manifestatasi, questa ondulazione non può essere più rimossa ed è causa di aumento di perdite nel trasformatore.

Questi trattamenti di ricottura eliminano anche i ronzii dei lamierini e migliorano la planarità degli stessi.