

# RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro.

Parte due: MATERIALI USATI NELLE MACCHINE  
ELETTRICHE

A cura della Redazione

## 2.1 - Materiali conduttori

*I materiali conduttori vengono utilizzati per la realizzazione degli avvolgimenti e delle loro connessioni. Quelli più frequentemente usati sono il rame e l'alluminio.  
La resistività di questi metalli varia con la temperatura.*

Il materiale di più largo impiego per la costruzione degli avvolgimenti è il rame, seguito dall'alluminio.

Altri metalli e leghe vengono utilizzati per accessori e applicazioni particolari. Il rame usato in elettrotecnica è ottenuto per raffinazione elettrolitica (rame elettrolitico).

Questo tipo di rame, caratterizzato da notevole purezza (99,90%) è stato unificato nella sua composizione dalla tabella UNI 5649-71 e viene designato nel seguente modo: CU-ETP UNI 5649-71.

Le norme CEI ammettono per il conduttore di rame allo stato ricotto, una resistività massima di  $0,01724 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Questo valore può essere assunto come valore medio nel calcolo della resistenza teorica dei conduttori per avvolgimenti reperibili in commercio. Si deve però tenere presente che altri fattori, come le tolleranze sulle dimensioni e sulla uniformità della sezione, il grado di incrudimento, ecc. intervengono a variare la resistenza del conduttore.

La resistività dipende dalla temperatura e ogni materiale è caratterizzato da un coefficiente di temperatura ( $\alpha$ ) il quale corrisponde all'aumento di valore di una resistenza inizialmente di 1 ohm

per la variazione di temperatura di un grado.

Il coefficiente di temperatura non è costante e per il rame tende a diminuire all'aumentare della temperatura.

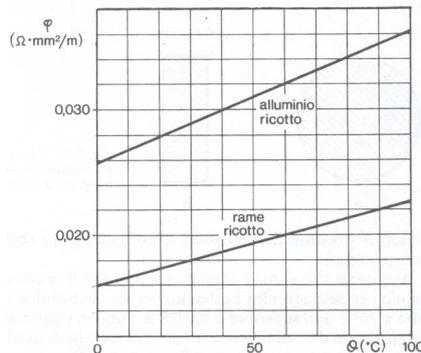


Figura 2.1 - Andamento della resistività del rame e dell'alluminio in funzione della temperatura.

L'andamento della resistività del rame ricotto in funzione della temperatura è riportato nel grafico della figura 2.1.

Si osserva che il valore della resistività dipende anche dal grado di ricottura del materiale, come si può rilevare dalla tabella 2.1 che per i conduttori di più comune impiego fornisce anche il valore del peso specifico (densità).

Nelle macchine elettriche vengono impiegati conduttori di rame di sezione circolare o piattine a sezione rettangolare con spigoli arrotondati (Figura 2.2).

Nelle tabelle 2.2 e 2.3 sono riportate le caratteristiche dei fili e delle piattine di uso più frequente.

In certe applicazioni si utilizzano anche conduttori in lastra di piccolo spessore (decimi di millimetro) e di notevole larghezza (fino a 1 000 mm).

I fili e le piattine devono essere rivestiti di isolante come verrà illustrato nei successivi paragrafi.

Per quanto riguarda l'alluminio si possono fare considerazioni analoghe. L'alluminio per elettrotecnica è ottenuto per via elettrolitica e deve presentare una resistività a 20 °C non superiore a 0,0278 Ω · mm<sup>2</sup>/m (materiale ricotto).

Generatori elettrici rotanti	
Generatore sincrono (o alternatore)	Converte energia meccanica in elettrica sotto forma di grandezze alternate
Dinamo	Converte energia meccanica in elettrica sotto forma di grandezze continue
Motori elettrici	
Sincrono o asincrono	Converte energia elettrica alternata in energia meccanica
A corrente continua	Converte energia elettrica continua in energia meccanica
Trasformatori e convertitori	
Trasformatore	Modifica i parametri (tensione e corrente alternata) della potenza elettrica
Convertitori rotanti	Converte grandezze alternate in continue e viceversa e grandezze alternate in alternate di diversa frequenza, ecc.
Raddrizzatore	Converte le grandezze elettriche alternate in continue
Invertitore	Converte le grandezze elettriche continue in alternate

Materiale	Densità (kg/dm <sup>3</sup> )	Stato fisico	Resistività a 20 °C (Ω mm <sup>2</sup> /m)	Coefficiente temperatura a 20 °C (x10 <sup>-3</sup> )
Rame	8,90	ricotto crudo	0,01724 0,01777	3,93 3,91
Alluminio	2,70	ricotto crudo	0,0278 0,02826	4,0 4,0
Argento	10,49	-	0,0164	3,8
Platino	21,4	-	0,100	3,6
Ferro	7,86	-	0,0978	0,005
Ferro al silicio	7,8	-	0,03-0,06	0,005
Bronzo	8,81	-	0,05+0,1	1,25
Ottone	8,40	-	0,06+0,08	1,9
Piombo	11,4	-	0,21	4,3

Tabella 2.1 - Caratteristiche dei materiali conduttori più comuni.

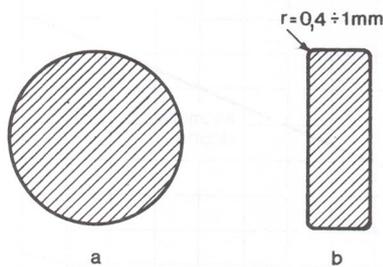


Figura 2.2 - Forma dei conduttori:

a - sezione circolare;

b - piattine rettangolari a spigoli arrotondati.

Il coefficiente di temperatura dell'alluminio è un po' più elevato di quello del rame ( $4 \cdot 10^{-3}$  a 20 °C) per cui la resistività segue una legge un po' diversa in funzione della temperatura. Anche per l'alluminio il coefficiente di temperatura tende a diminuire con l'aumentare della temperatura. L'alluminio incrudito presenta resistività un po' più elevata di quella del metallo ricotto. Per altri dati si può fare ancora riferimento alle tabelle 2.1 - 2.2 e 2.3.

L'alluminio può essere usato in alternativa al rame solo in alcuni tipi di avvolgimenti in quanto la sua maggiore resistività (1,5 volte circa quella del rame) implica un maggior ingombro. Inoltre esso presenta caratteristiche meccaniche piuttosto scadenti. I vantaggi consistono nel minor peso specifico (0,30 volte circa quello del rame) e sul minor costo.

Leghe di rame quali l'ottone (rame+ zinco) ed il bronzo (rame+ stagno) sono usate per le morsetterie. Per la designazione si usano le sigle OT (per l'ottone) e B (per il bronzo) seguite dalla percentuale di uno dei metalli componenti.

Diametro nominale (mm)	Sezione teorica (mm <sup>2</sup> )	Diametro nominale (mm)	Sezione teorica (mm <sup>2</sup> )	Diametro nominale (mm)	Sezione teorica (mm <sup>2</sup> )
1,2	1,131	2,5	4,908	3,8	11,34
1,3	1,327	2,6	5,309	3,9	11,95
1,4	1,539	2,7	5,725	4,0	12,56
1,5	1,766	2,8	6,157	4,1	13,20
1,6	2,010	2,9	6,605	4,2	13,85
1,7	2,269	3,0	7,068	4,3	14,52
1,8	2,544	3,1	7,547	4,4	15,20
1,9	2,835	3,2	8,042	4,5	15,90
2,0	3,141	3,3	8,553	4,6	16,62
2,2	3,801	3,5	9,621	4,8	18,09
2,3	4,154	3,6	10,18	4,9	18,86
2,4	4,524	3,7	10,75	5,0	19,63

Tolleranze sul diametro nominale: ± 0,03 mm

Tabella 2.2 - Diametri e sezioni dei fili di rame e alluminio di impiego più frequente.

Larghezza (mm)	Spessore (mm)													
	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	
2,5	1,86	2,36	2,79	3,29	3,79	4,19	4,69	5,94						
3,0	2,26	2,86	3,39	3,99	4,49	5,09	5,69	7,19	8,45					
3,5	2,66	3,36	3,99	4,69	5,29	5,99	6,69	8,20	9,95	11,7				
4,0	3,06	3,86	4,59	5,39	6,09	6,89	7,69	9,45	11,5	13,5	15,5			
4,5	3,46	4,36	5,19	6,09	6,89	7,79	8,45	10,7	13,0	15,2	17,1	19,4		
5,0	3,86	4,86	5,79	6,79	7,69	8,69	9,45	12,0	14,5	16,6	19,1	21,6	24,1	
5,5	4,26	5,36	6,39	7,49	8,49	9,59	10,5	13,2	16,0	18,4	21,1	23,9	26,6	
6,0	4,66	5,86	6,99	8,19	9,29	10,5	11,5	14,5	17,5	20,1	23,1	26,1	29,1	
6,5	5,06	6,36	7,59	8,89	10,1	11,4	12,5	15,7	19,0	21,9	25,1	28,4	31,6	
7,0	5,46	6,86	8,19	9,59	10,9	12,3	13,5	17,0	20,5	23,6	27,1	30,6	34,1	
7,5		7,36	8,79	10,3	11,7	13,2	14,5	18,2	22,0	25,4	29,1	32,9	36,6	
8,0		7,86	9,39	11,0	12,5	14,1	15,5	19,5	23,5	27,1	31,1	35,1	39,1	
8,5		8,36	9,99	11,7	13,3	15,0	16,5	20,7	25,0	28,9	33,1	37,4	41,6	
9,0		8,86	10,6	12,4	14,1	15,9	17,5	22,0	26,5	30,6	35,1	39,6	44,1	
9,5		9,36	11,2	13,1	14,9	16,8	18,5	23,2	28,0	32,4	37,1	41,9	46,6	
10,0		9,86	11,8	13,8	15,7	17,7	19,5	24,5	29,5	34,1	39,1	44,1	49,1	
10,5			12,4	14,5	16,5	18,6	20,5	25,7	31,0	35,9	41,1	46,4	51,6	
11,0			13,0	15,2	17,3	19,5	21,5	27,0	32,5	37,6	43,1	48,6	54,1	
11,5			13,6	15,9	18,1	20,4	22,4	28,2	34,0	39,4	45,1	50,9	56,6	
12,0			14,2	16,6	18,9	21,3	23,5	29,5	35,5	41,1	47,1	53,1	59,1	
13,0			15,4	18,0	20,5	23,1	25,5	32,0	38,5	44,6	51,1	57,6	64,1	
14,0			16,6	19,4	22,1	24,9	27,5	34,5	41,5	48,1	55,1	62,1	69,1	
15,0			17,8	20,8	23,7	26,7	29,5	37,0	44,5	51,6	59,1	66,6	74,1	
	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0									
Raggi di arrotondamento (mm)														
N.B. Le sezioni tengono conto dell'arrotondamento degli spigoli.														

Tabella 2.3 - Sezioni delle piattine di rame e alluminio di impiego più frequente.

## 2.2 - Materiali ferromagnetici

*Con i materiali ferromagnetici si realizzano i circuiti magnetici. Essi presentano permeabilità magnetica molto elevata.*

Per realizzare i circuiti magnetici delle macchine elettriche si usano materiali denominati ferromagnetici per la loro proprietà di avere una elevata permeabilità. È noto che questa grandezza, indicata con il simbolo  $\mu$ , può essere dedotta dalle curve di magnetizzazione facendo il rapporto fra l'induzione  $B$  e la corrispondente forza magnetica  $H$ . Per ogni materiale ferromagnetico i fabbricanti forniscono quindi queste curve, che sono di fondamentale importanza nella progettazione dei circuiti magnetici al fine di determinare il punto più conveniente al quale far lavorare il materiale.

Le caratteristiche essenziali dei materiali ferromagnetici sono le seguenti:

- permeabilità ( $\mu$ ): attitudine di un materiale ad esaltare i fenomeni magnetici, il cui valore è variabile con l'induzione;
- induzione di saturazione ( $B_s$ ); valore intorno al quale la pendenza della curva in condizioni estreme diventa circa uguale a quella del vuoto, in quanto il materiale magnetico non dà più alcun apporto all'aumento dell'induzione  $B$ .
- l'induzione residua  $B_r$  relativa ad ogni determinato valore di induzione massima ( $B_s$ ) del ciclo di isteresi;
- la forza di campo coercitiva  $H_c$  necessaria per annullare l'induzione residua.

In figura 2.3 è evidente il significato delle grandezze sopra citate.

In figura 2.4 sono rappresentate le curve di magnetizzazione dell'acciaio temprato, della ghisa, del ferro fucinato.

I materiali suddetti si usano per realizzare circuiti magnetici che funzionano con forze magnetomotrici costanti.

*Un materiale magnetico sottoposto a magnetizzazione variabile diventa sede di perdite dovute a/l'isteresi magnetica e a correnti parassite.  
Per limitare le perdite si usano lamierini di ferro al silicio.*

Quando un materiale magnetico deve lavorare con f.m.m. alternative, si devono prendere in considerazione anche altri aspetti ed in particolare le perdite che si manifestano nel circuito magnetico stesso e che sono da attribuire a due diversi fenomeni: isteresi e correnti parassite.

A causa del fenomeno di isteresi e della presenza del ciclo relativo, durante la magnetizzazione viene fornita al materiale una energia non interamente restituita nella successiva fase di smagnetizzazione. Questa perdita di energia che viene dissipata in calore, è proporzionale all'area del ciclo di isteresi che deve quindi essere la più piccola possibile.

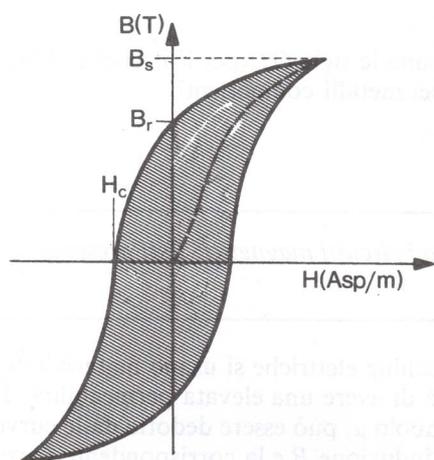


Figura 2.3 - Andamento del ciclo di isteresi e significato delle induzioni di saturazione ( $B_s$ ), residue ( $B_r$ ) e della forza di campo coercitiva ( $H_c$ ).

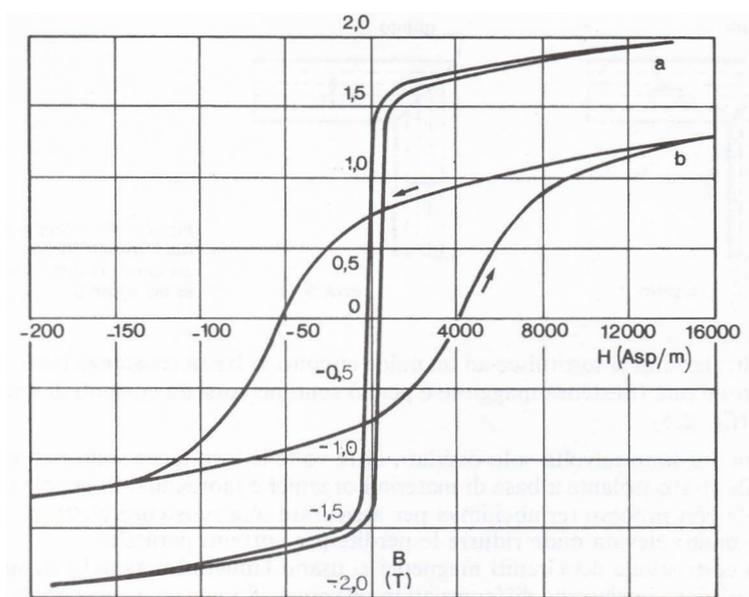


Figura 2.4 - Curve di magnetizzazione dell'acciaio, della ghisa e del ferro fucinato:  
a - ferro fucinato e acciaio non temperato;  
b - ghisa e acciaio temperato.

Le perdite per correnti parassite sono invece dovute al fatto che la presenza di un flusso alternativo provoca nello stesso materiale magnetico f.e.m. indotte. Essendo il materiale magnetico buon conduttore, si ha anche la circolazione di correnti parassite e quindi la formazione di perdite che si manifestano anch'esse sotto forma di calore.

Per ridurre le perdite si adottano diversi provvedimenti tra i quali i seguenti principali:

- si aumenta la resistività del materiale utilizzando leghe di ferro al silicio (in misura non superiore al 3,5%).
- si sostituisce la massa metallica massiccia con una serie di lamierini isolati tra

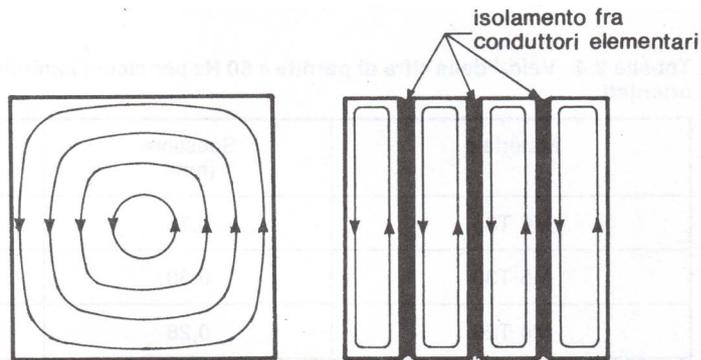


Figura 2.5 - Andamento delle correnti parassite in corpi metallici massicci e laminati.

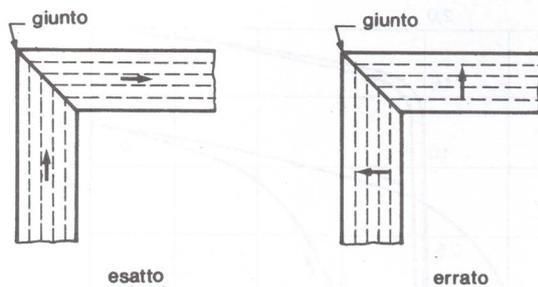


Figura 2.6 - Montaggio di lamierini a cristalli orientati. La freccia indica la direzione dell'asse dei cristalli.

loro; in altri termini si sostituisce ad un unico circuito di bassa resistenza tanti circuiti che offrono una resistenza maggiore e perciò sono percorsi da correnti di minor intensità (Figura 2.5).

I lamierini sono talvolta solo ossidati, altre volte le loro facce sono ricoperte da un sottile strato isolante a base di materiali organici e inorganici, in genere silicati oppure trattate con processi termochimici per assicurare una resistenza elettrica interlamellare molto elevata onde ridurre le perdite per correnti parassite.

Nella costruzione dei circuiti magnetici si usano lamierini magnetici di spessore e caratteristiche intrinseche differenziati in relazione all'impiego a cui sono destinati. I lamierini magnetici legati al silicio vengono contraddistinti con la cosiddetta cifra di perdita che corrisponde alle perdite per unità di peso, espresse in watt per kilogrammo ad una induzione e a una frequenza assunte come riferimento.

Uno speciale tipo di lamierino è quello cosiddetto a cristalli orientati usato per la realizzazione dei nuclei dei trasformatori.

Questi lamierini sono ottenuti per mezzo di particolari processi di lavorazione a freddo e debbono essere usati soltanto nel senso della laminazione (direzione dell'asse dei cristalli) (Figura 2.6). Richiedono a volte l'osservanza di alcune norme di lavorazione, ad esempio, ricottura dopo il taglio e la tranciatura.

Gli spessori normalmente usati sono di - 0,35 - 0,30 - 0,27 mm. Nella tabella 2.4 sono forniti i valori della cifra di perdita per alcuni lamierini tipici.

Si deve però tenere presente che la cifra di perdita varia con l'induzione per cui può essere preferibile ricorrere alle curve della Figura 2.7.

Dei lamierini vengono forniti dai fabbricanti anche dati riguardanti la caratteristica di magnetizzazione, come indicato nei grafici delle Figura 2.8.

Materiale	Spessore (mm)	Cifra di perdita a 1,5 T e 50 Hz (W/kg)
M6 T35	0,35	1,10
M5 T30	0,30	0,95
M4 T28	0,28	0,87

Tabella 2.4 - Valori della cifra di perdita a 50 Hz per alcuni lamierini magnetici del tipo a cristalli orientati.

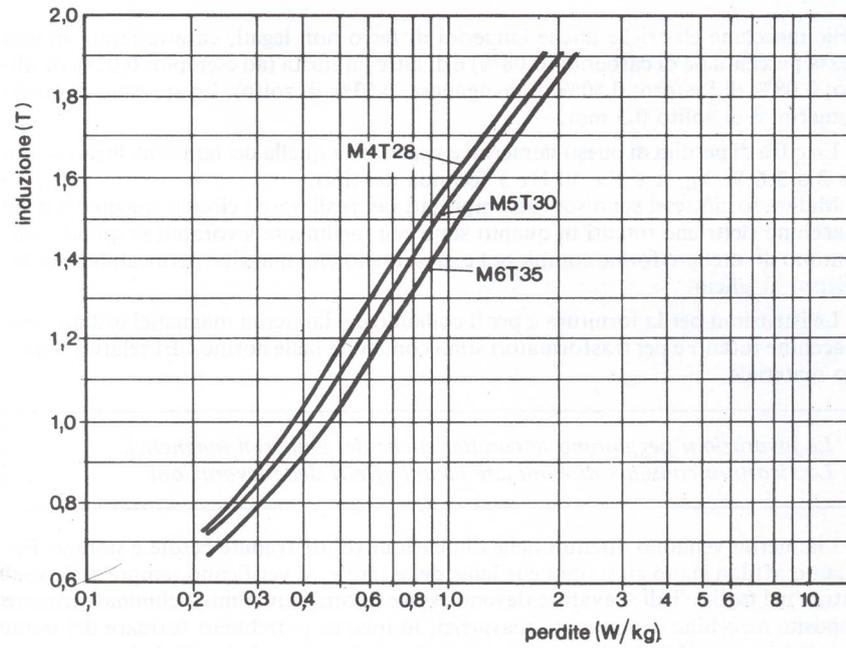


Figura 2.7 - Andamento della cifra di perdita in funzione dell'induzione, a 50 Hz, per alcuni i tipi di lamierini.

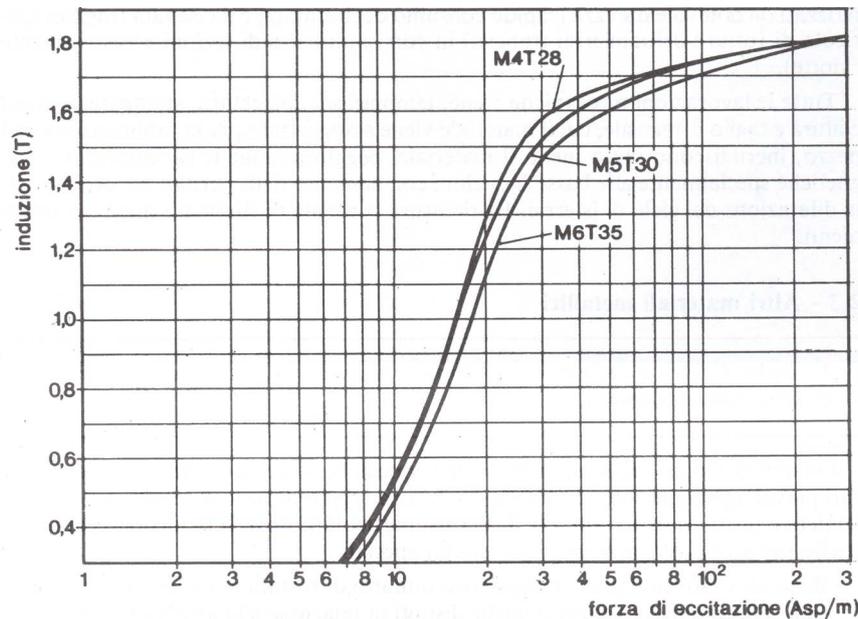


Figura 2.8 - Caratteristiche di magnetizzazione di alcuni tipi di lamierini.

Oltre ai lamierini al silicio normali e a cristalli orientati, si usano nella costruzione delle macchine elettriche anche lamierini di ferro non legati, caratterizzati da una bassa percentuale di carbonio (0,08%) e di altre impurità (ad esempio: 0,02% di silicio; 0,08% di fosforo; 0,50% di manganese; 0,03% di zolfo). Lo spessore di questi lamierini è di solito 0,5 mm.

La cifra di perdita di questi lamierini è superiore a quella dei lamierini legati (varia da 2 a 3,6 W/kg, a 1 T e 50 Hz a seconda dei tipi).

Malgrado ciò, essi sono sovente impiegati per realizzare i circuiti magnetici delle macchine elettriche rotanti in quanto sono più facilmente lavorabili (e quindi consentono di ottenere forme complesse) e presentano una maggior permeabilità dei lamierini al silicio.

Le istruzioni per la fornitura e per il collaudo dei lamierini magnetici ordinari per macchine rotanti e per trasformatori sono contenute nelle norme CEI relative a questo materiale.

*Le lavorazioni peggiorano le caratteristiche dei lamierini magnetici. La ricottura consente di eliminare alcuni effetti delle lavorazioni.*

I lamierini vengono ottenuti nelle dimensioni volute tramite cesoie e stampi. Per quanto affilati siano gli stampi e le lame delle cesoie, si verificano sempre delle sbavature nel taglio. Tali sbavature devono essere ridotte al minimo o eliminate tramite apposite macchine denominate sbavatrici, in quanto potrebbero formare dei ponti di collegamento elettrico fra i lamierini rendendo in tal modo inutile la laminazione.

Il problema delle sbavature è particolarmente sentito nei lamierini al silicio, caratterizzati da notevole durezza (rapido consumo degli stampi) e da elevata fragilità (pericolo di rotture dei lamierini tranciati in corrispondenza di sezioni eccessivamente ridotte).

Tutte le lavorazioni meccaniche come, laminazione, piegatura, stampatura, tranciatura e taglio d'utensile, cui il materiale viene assoggettato per la fabbricazione del pezzo, incrudiscono più o

meno il materiale, peggiorandone le caratteristiche magnetiche specialmente alle basse induzioni con aumento delle perdite per effetto della dilatazione del ciclo di isteresi. La ricottura consente di eliminare questi inconvenienti.

### 2.3 - Altri materiali metallici

*Le leghe di ferro e carbonio sono impiegate per la realizzazione di carcasse e di altre parti strutturali.*

I materiali ferrosi impiegati nella costruzione delle macchine elettriche sono utilizzati prevalentemente sotto forma di semilavorati (getti di fusione, di ghisa e acciaio; lamiere e profilati di acciaio, ecc.). Per usi particolari, dove si richiedono caratteristiche superiori, vengono impiegati acciai speciali.

Gli acciai sono caratterizzati dal carico unitario di rottura a trazione (ad esempio, 37 - 44 - 60 kg/ mm<sup>2</sup>) e vengono anche distinti in relazione alla loro saldabilità e fragilità.

Le ghise, ossia le leghe di ferro e carbonio con una percentuale dal 2,5 al 4,5% di carbonio, si dividono fondamentalmente nelle tre categorie: ghisa grigia, ghisa bianca e ghisa malleabile.

La ghisa grigia si presta alla fusione dei getti e per questo motivo viene usata per la costruzione di carcasse, supporti e basamenti di macchine rotanti di media o gran de potenza.

La ghisa bianca è molto più dura e fragile della precedente ed è quindi di difficile lavorazione, serve per la fabbricazione dell'acciaio.

La ghisa malleabile ha proprietà intermedie fra la ghisa grigia e l'acciaio e viene usata per realizzare parti meccaniche soggette a sollecitazioni superiori a quelle che potrebbe sopportare la ghisa grigia che è piuttosto fragile. Con la ghisa malleabile si possono realizzare getti con pareti sottili e di forme complesse. Con particolari tipi di ghisa si possono realizzare anche parti magnetiche di macchine elettriche non soggette a flussi variabili, adottando induzioni non superiori a 1,2 ÷ 1,3 T.

### 2.4 - Materiali isolanti

*I materiali isolanti hanno la funzione di separare corpi conduttori tra i quali esiste una differenza di potenziale.*

*La loro caratteristica fondamentale è la rigidità dielettrica.*

Per isolanti (o dielettrici) si intendono i materiali la cui resistività è almeno 10<sup>12</sup> volte quella dei conduttori per cui in essi il movimento libero delle cariche elettriche è limitatissimo.

Gli isolanti possono essere gassosi, liquidi e solidi.

Dal punto di vista elettrico è di fondamentale importanza la rigidità dielettrica, cioè il valore del gradiente di potenziale elettrico al quale il materiale perde le sue caratteristiche isolanti.

La rigidità dielettrica si dovrebbe esprimere secondo il Sistema Internazionale, in V/m ma si preferisce indicarla in kV/mm in quanto questa unità di misura è più comoda.

Il valore della rigidità dielettrica di un isolante non è univoco ma dipende da diversi fattori, quali la forma della tensione applicata, la durata di applicazione della stessa, la forma degli elettrodi, lo

spessore, la temperatura, la pressione, il contenuto di umidità, ecc. Per questa ragione essa deve essere riferita a condizioni convenzionali ben definite.

Altra caratteristica importante dei dielettrici è la permittività  $\epsilon$ , o costante dielettrica, che per l'aria e il vuoto può essere assunta pari a:

$$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ F / m} = 8,86 \text{ pF / m}$$

Per gli altri materiali si esprime di solito in forma relativa ( $\epsilon_r$ ) rispetto a quella assunta dall'aria ( $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ )

I materiali solidi devono presentare anche buone caratteristiche meccaniche, in quanto ad essi è sovente affidata anche una funzione strutturale, ed inoltre devono anche essere facilmente lavorabili.

Dal punto di vista chimico gli isolanti devono presentare una buona stabilità in funzione della temperatura e della tensione elettrica.

### **Isolanti gassosi**

*L'aria è l'isolante gassoso più diffuso.  
La rigidità dielettrica dei gas dipende dalla pressione.  
I gas possono anche essere usati per trasmettere calore.*

Nelle macchine elettriche l'isolante gassoso più usato è l'aria la cui rigidità dielettrica a temperatura ambiente e a pressione atmosferica è intorno a 4 kV/mm.

Nei generatori elettrici di grande potenza viene anche utilizzato l'idrogeno sotto pressione che deve però essere mantenuto in circuito chiuso per evitare la formazione di miscele esplosive.

### **Isolanti liquidi**

*I liquidi isolanti possono essere naturali o sintetici. Essi si usano anche per trasmettere il calore.  
Gli oli minerali sono sensibili all'umidità e sono infiammabili.*

Tra i liquidi rivestono grande importanza gli olii minerali naturali ottenuti dalla distillazione del petrolio.

L'olio minerale adatto per usi elettrotecnici ha una rigidità dielettrica intorno a 20 kV/mm, costante dielettrica relativa di 2,2 e peso specifico di 0,88 kg/dm<sup>3</sup>.

Si deve tenere presente che l'olio minerale è caratterizzato da un aumento di volume di circa l'8% per un incremento di temperatura di 100 °C per cui nelle macchine che ne prevedono l'impiego si deve provvedere alla compensazione.

L'olio minerale ha una temperatura di infiammabilità intorno a 140 °C per cui questa temperatura non deve mai essere raggiunta.

È importante osservare che la composizione dell'olio minerale è variabile a seconda del luogo di provenienza. La sua rigidità dielettrica inoltre è fortemente influenzata dal contenuto d'umidità. È quindi necessario provvedere al trattamento sotto vuoto e a caldo per estrarre l'acqua assorbita

dall'ambiente e conservare l'olio in contenitori protetti dall'atmosfera.

Altri inconvenienti consistono soprattutto nella tendenza dell'olio a formare fanghi per effetto combinato dell'ossigeno, della temperatura e per effetto catalitico del rame. Questi fanghi riducono la rigidità dielettrica e rendono l'olio più viscoso, limitando la sua capacità di asportare calore per convezione.

Un certo successo ebbero in passato i policlorodifenili, commercialmente noti sotto il nome di Askarel, che non essendo infiammabili potevano essere utilizzati nelle installazioni in cui si doveva ridurre al minimo il pericolo di incendio. Studi relativamente recenti hanno però messo in luce che questi prodotti presentano una bassa biodegradabilità e se dispersi nell'ambiente costituiscono un pericolo per la salute.

Alcune disposizioni della Comunità Economica Europea, alle quali anche il nostro paese è tenuto ad attenersi, hanno proibito l'impiego degli Askarel.

In loro sostituzione, sempre in relazione al problema della infiammabilità, sono stati proposti altri liquidi (ad esempio quelli siliconici) il cui costo è però molto più elevato.

## **Isolanti solidi**

*Gli isolanti solidi possono essere di origine organica o inorganica.*

*La vita degli isolanti organici è fortemente influenzata dalla temperatura.*

Gli isolanti solidi impiegati nella costruzione delle macchine sono numerosissimi, specie ora che si fa anche largo uso di resine sintetiche.

L'esperienza dimostra che i materiali isolanti di origine organica (cioè composti a base di carbonio, idrogeno e ossigeno) tendono a perdere le loro caratteristiche meccaniche per effetto della temperatura.

All'interno della struttura la temperatura provoca infatti la frattura dei legami esistenti tra le molecole che ha come conseguenza l'infrangimento del materiale che si danneggia più facilmente se sottoposto ad urti e vibrazioni.

Gli isolanti vengono classificati in base alla temperatura massima alla quale essi possono funzionare per una conveniente durata (ad esempio, 20 anni).

Nella tabella 2.5 sono riportate le classi di temperatura stabilite dalle norme CEI e per ciascuna di queste si fornisce un elenco dei materiali più comuni usati nella costruzione delle macchine elettriche. Nella stessa tabella sono anche indicati gli impregnanti (oli e resine) più comunemente usati.

Si fa presente che la temperatura non è la sola sollecitazione a cui l'isolamento è sottoposto. Altre sono la tensione elettrica, le dilatazioni, gli sforzi meccanici, la luce, l'umidità, ecc.. Sarebbe quindi più logico definire le classi in relazione a combinazioni delle varie sollecitazioni. Questo problema risulta però così complesso, che in pratica ci si deve basare soprattutto sull'esperienza.

A completamento di quanto sopra riportato, nella tabella 2.6, si forniscono alcune informazioni supplementari sulla rigidità dielettrica e la costante dielettrica dei materiali e dei sistemi isolanti solidi più comuni.

Classe	Temperatura max ammessa (OC)	Isolanti solidi	Impregnanti
Y	90	Cotone, seta naturale, carta e prodotti derivati, legno, resine formaldeiche, polietilene, polistirolo, cloruro di polivinile, gomma naturale.	-
A	105	Cotone e seta naturale, carta e prodotti derivati, legno, resine poliesteri a catene trasversali, smalti oleoresinosi.	Olii minerali naturali e sintetici, vernici asfaltiche, vernici naturali o sintetiche, resine naturali.
E	120	Smalti a base di acetato di polivinile, resine poliuretatiche, epossidiche, poliammidiche, poliesteri a catene trasversali, policarbonato.	Vernici a base di resine sintetiche, resine poliesteri e epossidiche.
B	130	Fibre di vetro, amianto, agglomerati di mica (con o senza supporto), smalti di politereftalato.	Vernici a base di resine sintetiche, resine poliesteri ed epossidiche.
F	155	Fibre di vetro, amianto, agglomerato di mica (con o senza supporto), smalti a base di poliesteri imidici.	Resine alchidiche, epossidiche, poliesteri poliuretatiche, siliconoalchidiche.
H	180	Fibre di vetro, amianto, agglomerati di mica (con o senza supporto), elastomeri al silicone, smalto a base polimidica.	Resine siliconiche.
200	200	Mica, porcellana e altri materiali ceramici, vetro, quarzo, politetrafluoroetilene.	-

Tabella 2.5 - Classi di temperatura per i materiali isolanti solidi.

Materiale	Costante dielettrica relativa	Rigidità dielettrica (*) (kV/mm)
Amianto	-	4
Carta ben impregnata	3 ÷ 4	80
Carta secca	1,6 ÷ 2	7 ÷ 30
Cotone impregnato	-	20 ÷ 30
Gomme (naturali e sintetiche)	3 ÷ 4,5	15 ÷ 25
Legno impregnato	-	2,5
Mica	5 ÷ 7	60 ÷ 100
Porcellana	4,5 ÷ 6,5	20 ÷ 38
Resine sintetiche	-	10 ÷ 40
Smalti	-	50 ÷ 100
Vetro	4,5 ÷ 10	30 ÷ 150
Resine poliesteri (Mylar)	3,3	200
Resine aramidiche (Nomex)	2,25	21

(\*) Con tensione applicata a 50 Hz linearmente crescente, tempo alla scarica 60 s.

Tabella 2.6 - Valori della costante dielettrica relativa e della rigidità dielettrica di alcuni materiali isolanti solidi.