

Materiali magnetici

dott. ing. Lucia FROSINI



Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

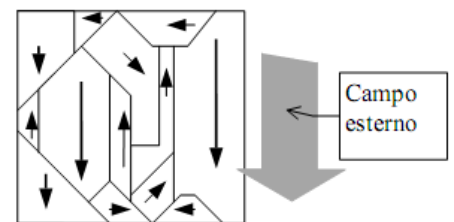
L. Frosini

Materiali ferromagnetici

I materiali ferromagnetici risultano attivi dal punto di vista magnetico, in quanto partecipano alla magnetizzazione attraverso la propria struttura cristallina, interagendo con il campo magnetico H prodotto esternamente.

Il loro comportamento è intuibile attraverso l'analisi del comportamento magnetico della struttura a domini magnetici tipica di questi materiali.

Internamente al dominio esiste un campo magnetico dotato di un orientamento preferenziale. A causa del disordine naturale, i vari domini risultano polarizzati magneticamente in modo casuale.



Tuttavia, sotto l'azione di un campo magnetico esterno, i domini tendono a disporsi in modo da favorire il campo eccitante. L'azione si produce in modo graduale ed è legata all'intensità del campo eccitante. Per campi particolarmente intensi si può arrivare al completo orientamento del materiale (fenomeno della saturazione).

2

Materiali ferromagnetici

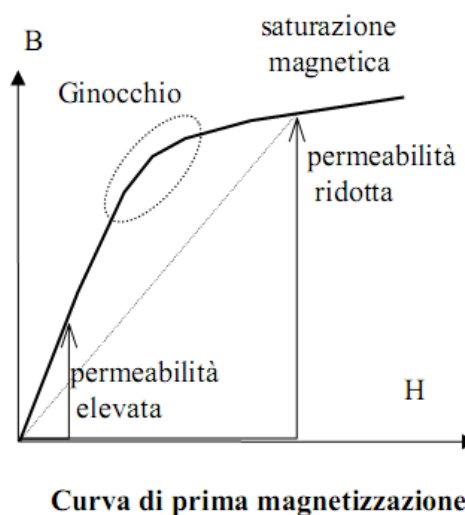
Si attribuisce a B l'effetto risultante generato dal materiale magnetico e dalla corrente di eccitazione, lasciando ad H il significato di campo originato dalla sola corrente di eccitazione.

Ne consegue che per i materiali ferromagnetici non è più sufficiente fornire un valore di permeabilità magnetica relativa ma deve essere fornita la relazione:

$$B = B(H)$$

Tale relazione, per un materiale magnetizzato per la prima volta, variando il campo H da un valore nullo fino ad uno massimo, è rappresentata in figura.

Tale caratteristica viene denominata curva di prima magnetizzazione.



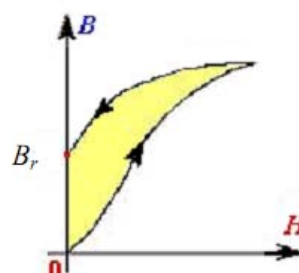
3

Materiali ferromagnetici

La pendenza massima della caratteristica di magnetizzazione di un materiale ferromagnetico risulta $10^3 \div 10^4$ volte la pendenza della caratteristica magnetica del vuoto. Questo significa che, per produrre uguali valori di induzione B , vengono richiesti valori del campo H (e quindi della corrente di eccitazione i) $10^3 \div 10^4$ volte più piccoli nel ferro di quelli necessari nell'aria.

Diminuendo con continuità il campo H dal valore massimo a zero, non si ripercorre più la caratteristica di prima magnetizzazione a causa degli attriti nei moti di orientamento dei domini.

Annullando il campo esterno H , rimane un orientamento residuo dei domini e quindi un valore di induzione residua (B_r). Per annullare l'induzione residua si deve applicare al materiale un campo esterno negativo (cioè di verso opposto al precedente), denominato campo coercitivo (H_c).



4

Materiali ferromagnetici

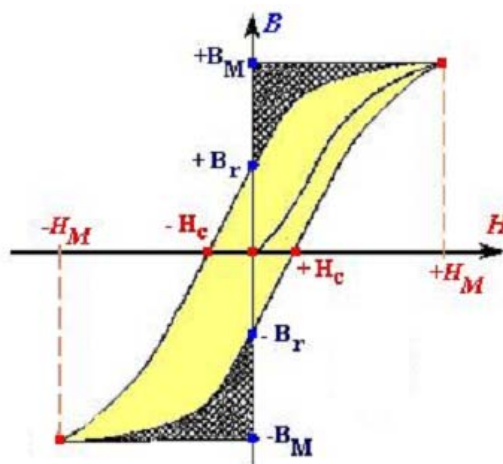
Sotto ponendo il materiale ad una magnetizzazione alternativa (ad es. sinusoidale) si percorrerà un ciclo (ciclo di isteresi).

L'area del ciclo d'isteresi assume il significato di energia per unità di volume perduta nel materiale per un ciclo completo di magnetizzazione.

Tale dissipazione di energia è imputabile agli attriti connessi con il movimento delle pareti dei domini e assume un'espressione del tipo:

$$E_{ist} = k_{ist} B_M^n$$

dove k_{ist} ed n dipendono dal tipo di materiale. Tipicamente n varia tra 1,6 e 2.



5

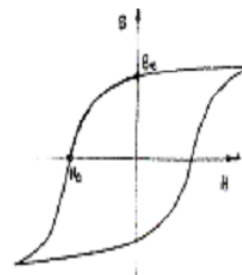
Materiali ferromagnetici

I materiali ferromagnetici sono classificati in due famiglie, a seconda della forma del loro ciclo di isteresi:

- materiali magnetici dolci;
- materiali magnetici duri.



Materiale magnetico dolce



Materiale magnetico duro


I materiali magnetici dolci sono caratterizzati da un ciclo di isteresi stretto e molto pendente (cioè con permeabilità molto elevata) e vengono utilizzati nella realizzazione dei nuclei magnetici delle macchine elettriche.

I materiali magnetici duri sono invece caratterizzati da un ciclo di isteresi molto ampio con valori di induzione residua e campo coercitivo elevati e vengono utilizzati per la realizzazione di magneti permanenti. Vista la forma del loro ciclo di isteresi, questi materiali non possono essere eccitati con campi alternativi in quanto le perdite per isteresi sarebbero troppo elevate.

6

Perdite nei nuclei magnetici

Nei nuclei magnetici delle macchine elettriche, costituiti da materiali magnetici dolci, si hanno perdite di potenza attiva dovute a:

- 1) **Isteresi magnetica**
 - 2) **Correnti parassite**
- }  **PERDITE NEL FERRO**

Entrambi i fenomeni sono legati alla variabilità nel tempo del flusso magnetico.

Sono dette “perdite nel ferro” proprio perché i nuclei magnetici sono costituiti da leghe di ferro.

Nel caso di flusso magnetico costante, tali perdite sono nulle.

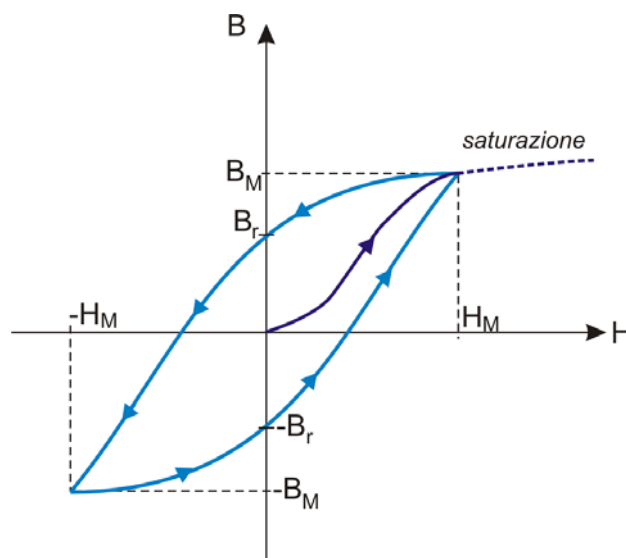
7

Perdite per isteresi

Come già visto, il fenomeno dell'**isteresi magnetica** si manifesta quando un nucleo di materiale ferromagnetico è sottoposto a magnetizzazione ciclica alternativa.

Ciò si verifica, ad esempio, quando un nucleo di materiale ferromagnetico è sede di un flusso magnetico Φ variabile alternativamente nel tempo, in quanto prodotto da una corrente i variabile alternativamente nel tempo.

A causa del fenomeno dell'**isteresi magnetica**, l'energia fornita al nucleo durante la fase di magnetizzazione non viene interamente restituita durante quella di smagnetizzazione, ma, ad ogni ciclo, rimane immagazzinata nel nucleo magnetico una quantità di energia proporzionale all'area del ciclo stesso.



8

Perdite per isteresi

La **potenza persa per isteresi** (= energia persa per unità di tempo) è proporzionale al numero di cicli d'isteresi descritti in un secondo e dipende da:

- **tipo di materiale**, in base a cui varia la forma e la dimensione del ciclo;
- **valore dell'induzione massima B_M** , all'aumentare del quale il ciclo diventa più ampio;
- **frequenza della corrente magnetizzante f** , il cui aumento determina un maggior numero di cicli descritti nell'unità di tempo.

La formula di Steinmetz: $P_{ist} = k_{ist} \cdot f \cdot B_M^n$

permette di calcolare la perdita specifica per unità di volume [W/m³] o per unità di massa [W/kg], a seconda di come viene espressa la costante k_{ist} , che dipende dal **tipo di materiale**.



Utilizzando il ferro-silicio, è possibile ridurre l'area del ciclo di isteresi e, di conseguenza, le perdite per isteresi.

Perdite per correnti parassite

Le **correnti indotte parassite** nascono nei corpi conduttori quando:

- 1) il corpo conduttore è investito da **flusso magnetico variabile nel tempo**;
- 2) il corpo conduttore **si muove** in campi magnetici costanti.

Ciò accade come conseguenza della **legge di Faraday** relativa al fenomeno dell'**induzione magnetica**:

Quando un circuito elettrico si concatena con un flusso magnetico variabile nel tempo, nel circuito elettrico nasce una **f.e.m. indotta**:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt}$$

$\Psi = N \Phi$ è il **flusso concatenato** con N spire.

$\Phi = B A$ è il **flusso magnetico**, che varia:

- 1) quando varia B , ossia quando varia la corrente magnetizzante i ;
- 2) quando varia A , ossia quando la spira si muove o si deforma.

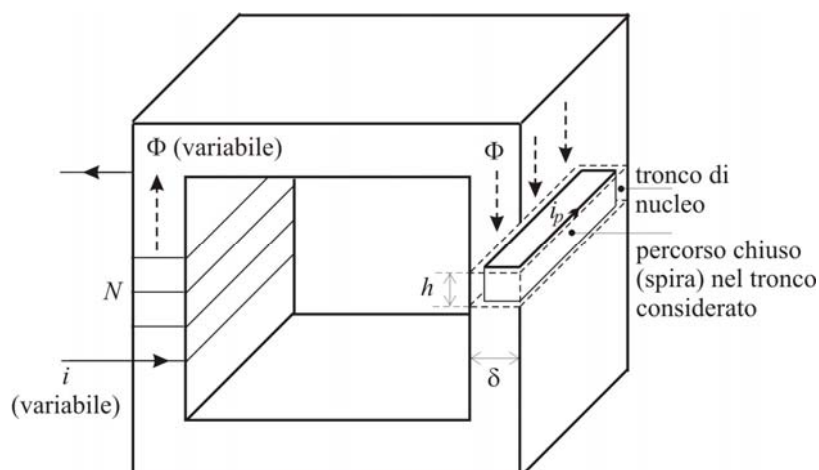
Perdite per correnti parassite

Se la **f.e.m. indotta** agisce in un circuito chiuso di resistenza R , nel circuito si ha circolazione di una **corrente indotta parassita** pari a e/R .

Consideriamo il caso in cui un nucleo in ferro massiccio è sede di un flusso magnetico Φ variabile nel tempo, in quanto prodotto da una corrente magnetizzante i variabile nel tempo (ad es., alternata sinusoidale).

In un piccolo tronco di nucleo di altezza h e spessore δ sono presenti tanti percorsi chiusi (spire).

Poiché il flusso concatenato con queste spire varia nel tempo, esse diventeranno sede di f.e.m. indotte e quindi di correnti indotte parassite i_p .



11

Perdite per correnti parassite



Nel tronco di nucleo considerato si hanno tante correnti indotte parassite.

Queste correnti determinano una dissipazione di energia elettrica in calore nel materiale.

Più alta è la resistività del materiale ρ , più piccola risulterà l'intensità delle correnti parassite e quindi minore sarà la dissipazione di energia elettrica in calore.

La formula:

$$P_{cp} = \frac{k'_{cp} \cdot \delta^2 \cdot f^2 \cdot B_M^2}{\rho} = k_{cp} \cdot f^2 \cdot B_M^2$$

δ = spessore nucleo

permette di calcolare la perdita specifica per unità di volume [W/m^3] o per unità di massa [W/kg], a seconda di come viene espressa la costante k'_{cp} , che dipende dal **tipo di materiale**.

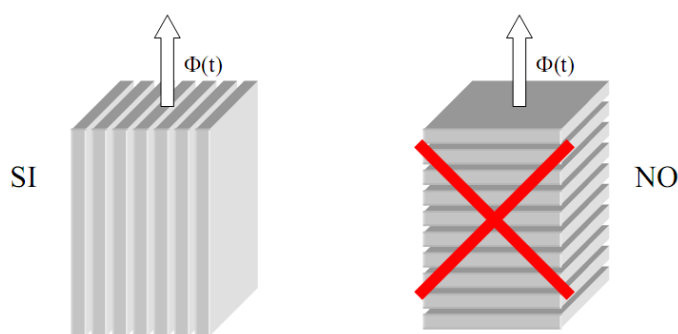
12

Perdite per correnti parassite



Per diminuire gli effetti delle correnti parassite occorre **aumentare la resistenza dei possibili percorsi** che le correnti indotte trovano all'interno nel conduttore investito da flusso magnetico variabile nel tempo:

- suddividendo il nucleo massiccio in tante lamiere sottili, parallele alle linee di flusso (e quindi diminuendo lo spessore δ);
- aumentando la resistività dei materiali impiegati (ad es., utilizzando ferro-silicio anziché ferro dolce: la resistività del ferro-silicio è 4 volte maggiore di quella del ferro dolce).



13

Nuclei magnetici

Proprio al fine di limitare le perdite per correnti parassite, i nuclei delle macchine elettriche in corrente alternata sono generalmente laminati con spessori $\delta = 0,35 \div 0,5$ mm. I lamierini sono isolati tra loro, ad es. con vernici termoindurenti.

L'impiego del **silicio** ha due vantaggi:

- ✚ riduce l'ampiezza del ciclo di isteresi del materiale;
- ✚ aumenta la resistività elettrica ρ del materiale.

Quindi, l'impiego del **silicio** fa diminuire sia le perdite per isteresi, sia le perdite per correnti parassite.

Lo svantaggio è che il silicio rende il materiale molto fragile.

Pertanto, la percentuale di silicio è limitata a un massimo del 5% per i trasformatori e a percentuali inferiori nelle macchine rotanti.

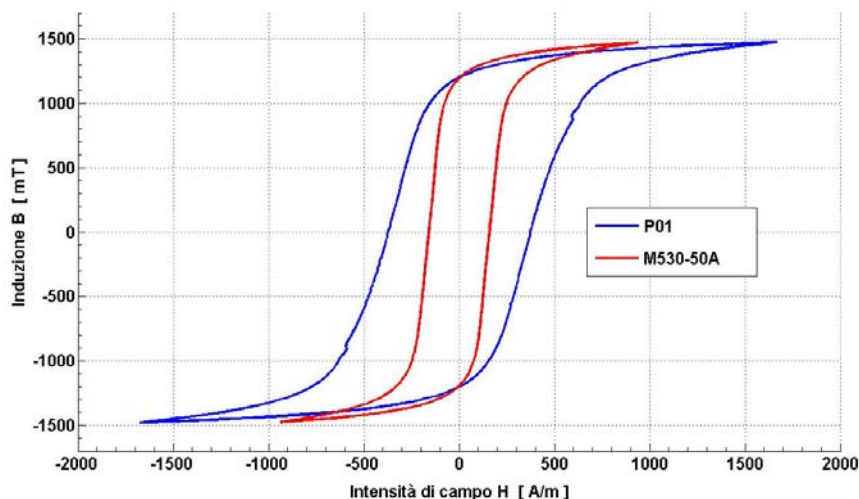
14

Vantaggi dei lamierini in ferro-silicio

Di seguito sono riportate le caratteristiche sperimentali di due lamierini, differenti sia nel materiale che nello spessore, che possono essere utilizzati ad es. per la costruzione dei nuclei di statore e rotore di un motore asincrono:

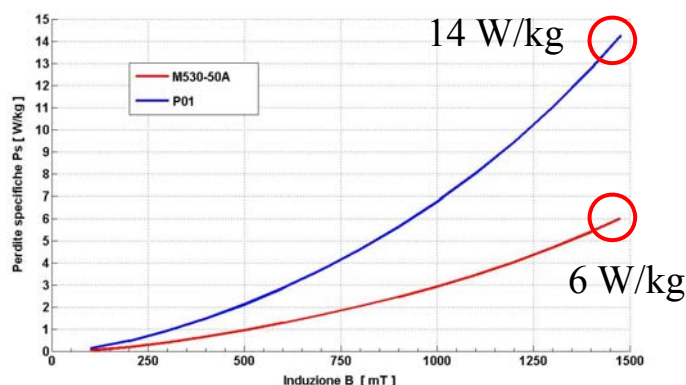
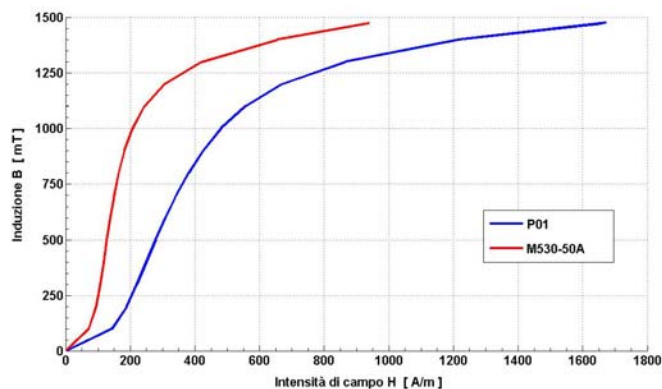
- lamierini in ferro P01 (spessore $\delta = 0,65$ mm)
- lamierini in lega ferro silicio M530-50 A (spessore $\delta = 0,5$ mm)

Cicli d'isteresi dei due materiali a 50 Hz :



Vantaggi dei lamierini in ferro-silicio

Curve di prima magnetizzazione a 50 Hz:



Perdite specifiche a 50 Hz, in funzione dell'induzione B

Lamierini in ferro-silicio

Le perdite nei materiali magnetici dovute a isteresi e a correnti parassite possono essere stimate attraverso le formule semi-empiriche già citate. Tuttavia, nella pratica, generalmente non sono noti i valori delle costanti k_{ist} e k_{cp} .

I produttori di materiali magnetici forniscono però un particolare valore di perdita specifica, determinato sperimentalmente, detto **cifra di perdita**.

La **cifra di perdita** [W/kg] è definita come la perdita specifica, per isteresi e per correnti parassite, che si ha quando un materiale è investito da un campo magnetico alternato sinusoidale a frequenza $f = 50$ Hz con induzione massima fissata B_M .

Generalmente si fa riferimento a $B_M = 1$ T oppure $B_M = 1,5$ T.

Se è nota la cifra di perdita P_0 per $B_0 = 1$ T, allora la perdita specifica P_{fs} per $B_M = 1,2$ T è data da:

$$P_{fs} = P_0 \left(\frac{B_M}{B_0} \right)^2 = P_0 \left(\frac{1,2}{1} \right)^2$$

Lamierini in ferro-silicio: cifra di perdita

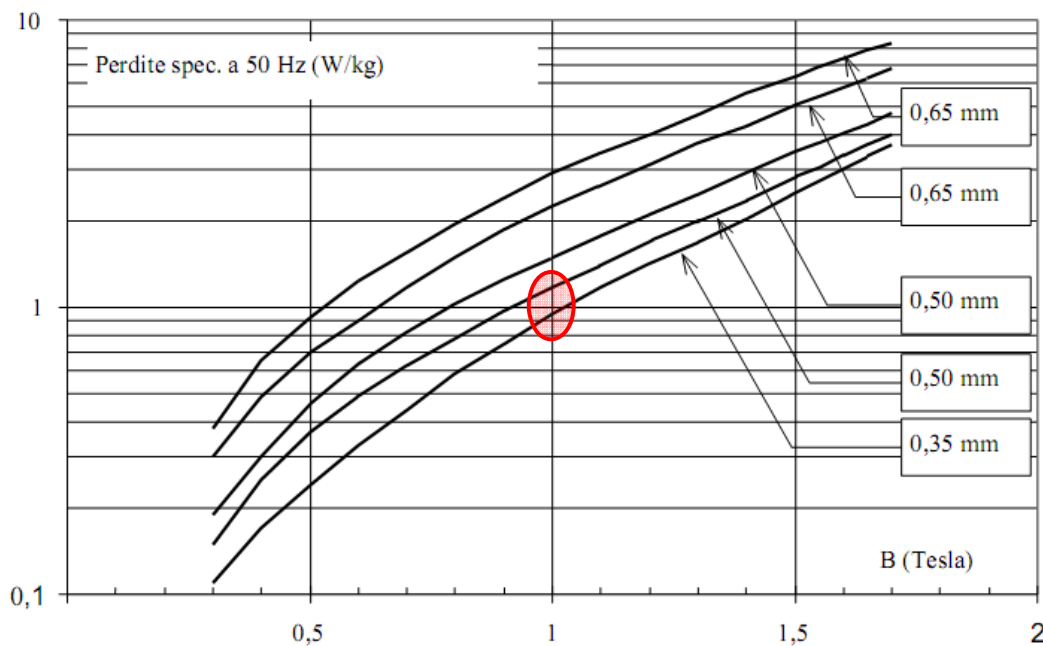
La **cifra di perdita** [W/kg] varia a seconda del materiale e dello spessore del lamierino :

| | $\delta = 0,5$ mm | $\delta = 0,35$ mm |
|--|-------------------|---|
| ■ ferro normale: | 3,6 | - |
| ■ ferro all'1÷1,5% di Si: | 2,2÷2,5 | - lamiera semilegata |
| ■ ferro al 2÷2,5% di Si: | 1,7÷2 | - lamiera legata |
| ■ ferro al 3,5÷4,5% di Si: | 1÷1,2 | 0,8÷1 lamiera extralegata |
| ■ ferro al 3% di Si <u>a cristalli orientati</u> : | | 0,4÷0,5 (nella direzione della laminazione) |

La **cifra di perdita** è generalmente riferita a lamiere nuove: nella valutazione delle perdite nel ferro si deve tenere conto di un loro aumento del 5÷10% per l'invecchiamento del materiale e per le lavorazioni meccaniche a cui i lamierini sono sottoposti durante le fasi di realizzazione dei nuclei magnetici.

Lamierini in ferro-silicio: cifra di perdita

$$P_{ferro} = k_{ist} \cdot f \cdot B_M^n + k_{cp} \cdot f^2 \cdot B_M^2 \left[\frac{W}{kg} \right]$$



Perdite specifiche tipiche di lamiere magnetiche di diverso spessore e diverso tenore di silicio

Per $B_M = 1 \text{ T}$ ($f = 50 \text{ Hz}$):

$\sim 1 \text{ W/kg}$

ferro-silicio a cristalli
NON orientati

Lamierini a cristalli orientati

I **lamierini a cristalli orientati** sono ottenuti da lamiere di alcuni millimetri di ferro silicio al 3% laminate a caldo. Queste lamiere vengono successivamente laminate a freddo e sottoposte, tra una laminazione e l'altra, ad opportuni trattamenti termici, fino a ottenere lamiere di spessore $\delta = 0,35 \text{ mm}$.

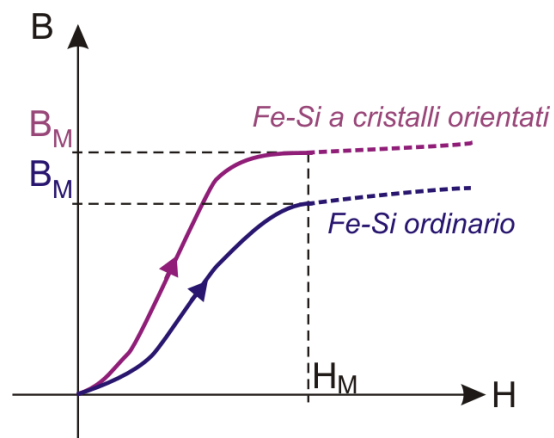
Con questo procedimento, i domini magnetici (cristalli) del materiale si “organizzano” in modo da presentare **proprietà magnetiche decisamente migliori, se soggetti a flussi nella direzione della cristallizzazione**.

La cifra di perdita è $0,4 \div 0,5 \text{ W/kg}$ (con $B_{\max} = 1 \text{ T}$), quando le linee di flusso sono nella direzione della laminazione.

Nella direzione ortogonale al senso di laminazione, le perdite specifiche sono circa 3 volte superiori ($1,5 \div 2 \text{ W/kg}$), ma comunque paragonabili a quelle dei lamierini ordinari in ferro silicio al $2 \div 2,5\%$.

Lamierini a cristalli orientati

Nei lamierini a cristalli orientati, rispetto a quelli ordinari, è più elevata la permeabilità magnetica e aumenta anche il valore massimo di induzione magnetica B che si può ottenere (valore corrispondente al “ginocchio” della curva di magnetizzazione B - H , prima di arrivare alla saturazione), sempre nel caso in cui la direzione della magnetizzazione sia quella della laminazione.

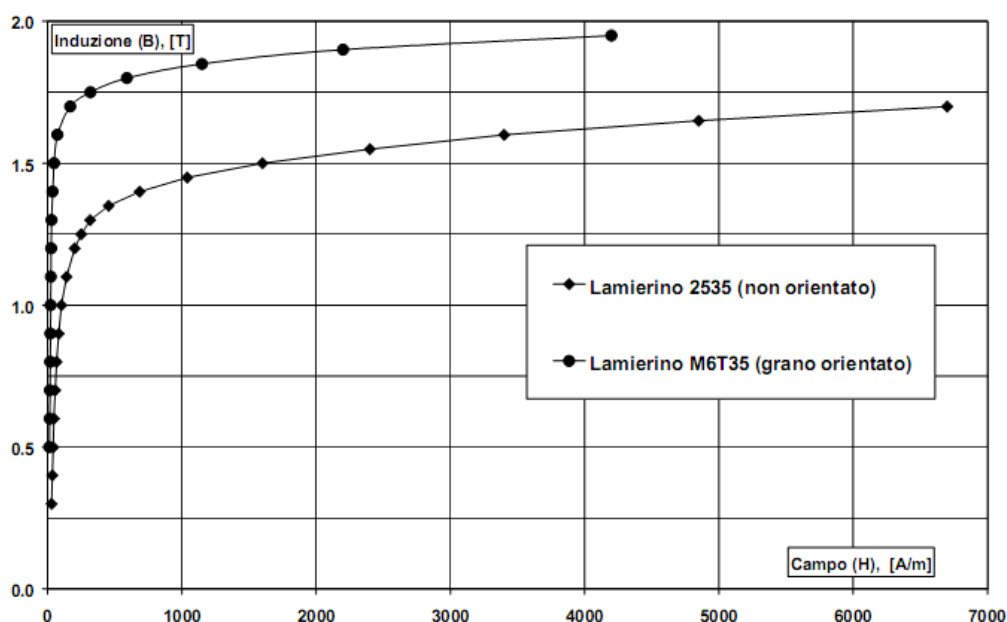


Nella pratica, i lamierini possono essere:

- ✚ in **ferro-silicio** ordinari nelle macchine rotanti e nei trasformatori di piccola potenza;
- ✚ in **ferro-silicio** speciali a **cristalli orientati** in quasi tutti i trasformatori.

21

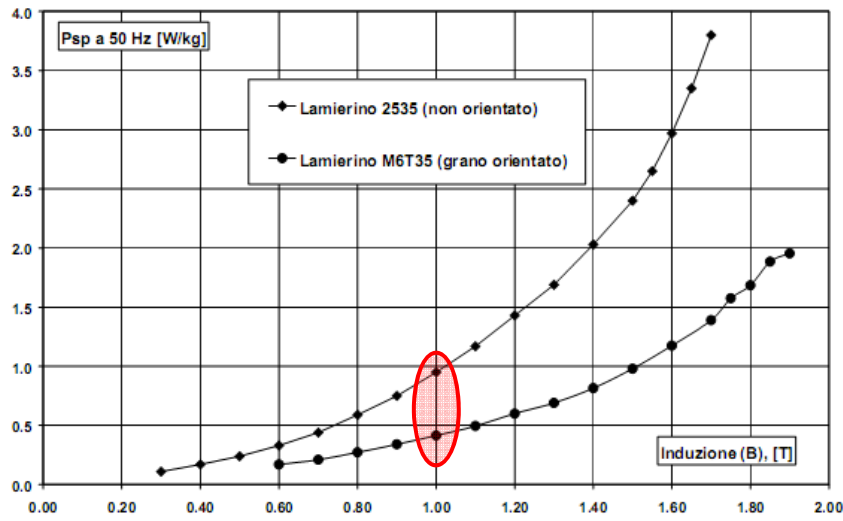
Lamierini a cristalli orientati



Caratteristica B - H a 50 Hz: lamierino a grano non orientato (2535) e a grano orientato (M6T35)

22

Lamierini a cristalli orientati



Perdite specifiche a 50 Hz: lamierino a grano non orientato (2535) e a grano orientato (M6T35)

Per $B = 1$ T ($f = 50$ Hz):

~ 1 W/kg

ferro-silicio a cristalli

NON orientati

~ 0,5 W/kg

ferro-silicio a cristalli

orientati