

MATERIALI MAGNETICI DOLCI (SMC, SOFT MAGNETIC COMPOSITES)

Matteo Viganò - Stame S.r.l. Arosio, CO -

Riassunto

Si espongono inizialmente delle considerazioni di opportunità sull'esigenza di limitare i consumi energetici. Una semplice analisi della ripartizione dei consumi nazionali evidenzia come una quota non trascurabile dei consumi di energia elettrica sia collegata a motori per applicazioni di larga serie. Questa constatazione suggerisce i possibili vantaggi di impiego della metallurgia delle polveri per soluzioni tecniche innovative. Dopo una serie di richiami di elettrotecnica si mostra come il rendimento dei motori elettrici, per quanto molto più elevato di motori di altro tipo, sia comunque limitato superiormente dalle perdite nel ferro. Questa constatazione ha finora impedito l'impiego di materiali sinterizzati tradizionali per i quali il processo termico genera una diminuzione inaccettabile della resistività e la conseguente impossibilità di impiego per eccessive perdite per correnti parassite nel nucleo. L'impiego di polveri di nuova concezione, costituite da granuli di ferro puro rivestiti di strati isolanti, consente di ridurre sostanzialmente i possibili effetti negativi delle perdite per correnti parassite. In questo modo si possono realizzare componenti da polveri in grado di funzionare correttamente fino a frequenze dell'ordine di 1000 Hz. Si espongono poi delle indicazioni di ordine progettuale, secondo le quali i materiali SMC offrono ai progettisti una ulteriore possibilità per il loro lavoro: la tridimensionalità. Si conclude con la presentazione di alcuni esempi e con delle indicazioni di tipo generale sui possibili vantaggi delle nuove soluzioni, anche in termini di riciclabilità a fine vita.

Introduzione

Secondo recenti autorevoli affermazioni [1], largamente condivisibili, "Il tema dell'energia è, e sempre più lo sarà nel futuro, di grande attualità: l'energia, e in particolare quella elettrica, è un bene prezioso che non va assolutamente sprecato. Contenere i consumi energetici non significa necessariamente abbassare la qualità della vita. In particolare vanno ottimizzate tutte le trasformazioni dell'energia dalla fase della produzione a quella dell'utilizzazione finale. Sarebbe certamente impensabile concepire la vita moderna senza elettricità. Un settore che offre interessanti margini di risparmio energetico è quello relativo alle molteplici applicazioni dei motori elettrici. Sotto il profilo tecnico, esistono tre elementi che possono concorrere ad incrementare l'efficienza energetica di un azionamento:

- il giusto dimensionamento del motore in relazione al ciclo di lavoro richiesto;
- l'alimentazione di motori non direttamente dalla rete ma tramite invertitori a tensione e frequenza variabili;
- l'utilizzo di motori ad alta efficienza".

Un rapporto dell'ENEA, [2], riporta considerazioni analoghe: "La nostra società si trova ad affrontare due sfide fondamentali: reperire ed assicurare le risorse energetiche per sostenere la crescita e lo sviluppo economico dei Paesi sviluppati e, ancor più, di quelli in via di sviluppo; mitigare i processi di cambiamento climatico in atto garantendo la protezione dell'ambiente. Trovare un equilibrio fra queste esigenze ci obbliga a realizzare una vera e propria transizione verso un sistema energetico ed uno sviluppo più sostenibile: il prezzo del fallimento potrebbe essere catastrofico. La tecnologia ci offre gli strumenti per realizzare questa transizione; occorre la disponibilità a cambiare comportamenti e a mettere in atto politiche adeguate".

Per l'Italia, sempre secondo l'ENEA: "L'aumento della domanda di energia riguarda soprattutto i settori residenziale e terziario".

La ripartizione dei consumi di elettricità nel nostro Paese è illustrata nelle figure 1 e 2 [2]. In figura 3 [3] si riporta la suddivisione dei consumi di elettricità, per usi domestici. Come si può rilevare, i motori elettrici, sia nel settore industriale che in quello domestico, consumano elevate quantità di energia. Per questo motivo, qualsiasi novità tecnica che possa contribuire a ridurre i consumi, a parità di prestazioni, è una sfida da affrontare sistematicamente. Poiché qualsiasi impiego domestico implica una larga diffusione della soluzione tecnica impiegata, sono evidenti le possibilità che la metallurgia delle polveri, tipica tecnologia di produzione di massa, può offrire, in termini di costo e di apertura alle innovazioni.

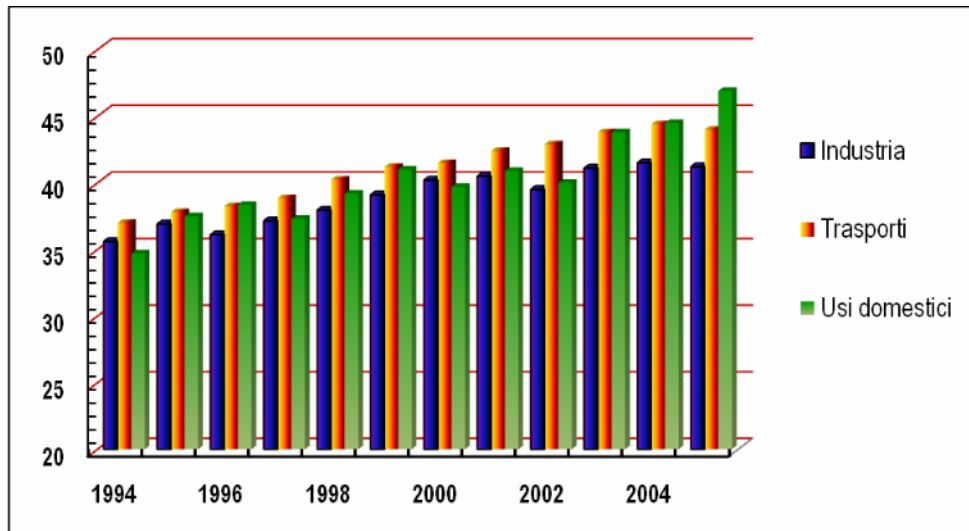


Figura 1 – Consumi d’energia in Italia (MTEP, 10⁶ tonn. equivalenti di petrolio) ripartiti per macrosettore.

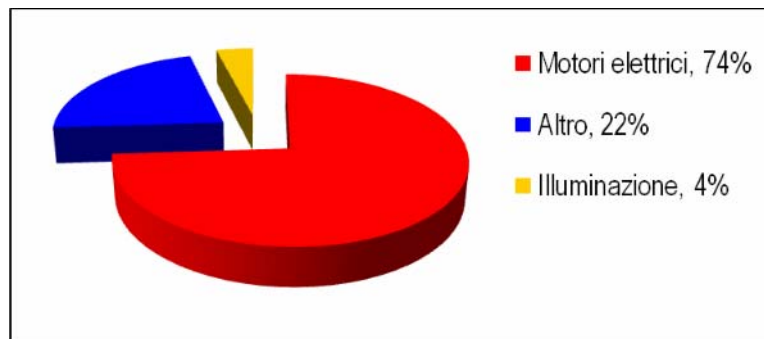


Figura 2 – Ripartizione tipica dei consumi elettrici in Italia.

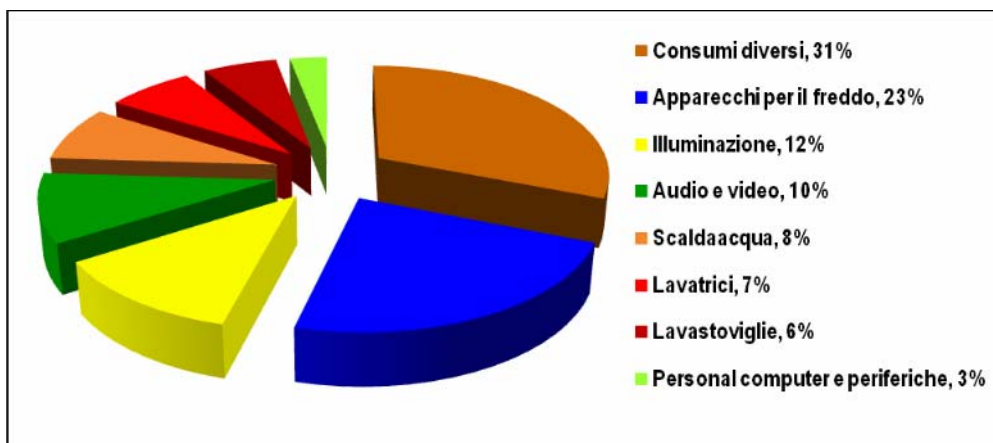


Figura 3 – Ripartizione tipica dei consumi di elettricità, per usi domestici, in Italia.

Richiami sommari di elettrotecnica

Come insegna la termodinamica, il rendimento di qualsiasi motore non è mai unitario, poiché si hanno sempre perdite – o dissipazioni – di energia. Nel caso dei motori elettrici, comunque caratterizzati da rendimenti ben più elevati di quelli termici, le perdite sono di natura meccanica ed elettromagnetica. L’elenco di quelle di tipo elettromagnetico [4] comprende:

- perdite negli elementi conduttori,
- perdite nei nuclei magnetici,
- perdite negli isolamenti.

In questa sede è opportuna una breve descrizione delle perdite nei nuclei magnetici. Ancora da [4], “Nei nuclei magnetici delle macchine elettriche si verificano perdite di potenza attiva dovute a due particolari

fenomeni legati alla variabilità nel tempo del flusso magnetico: isteresi magnetica e correnti parassite (o correnti di Foucault). Queste perdite, che si trasformano in calore, costituiscono le perdite nel ferro. Esse si manifestano solo nei nuclei magnetici interessati da flusso variabile nel tempo; nel caso di flusso magnetico costante esse sono nulle”.

Perdite per isteresi magnetica

Quando un nucleo di materiale ferromagnetico è sottoposto a magnetizzazione ciclica alternativa si manifesta il fenomeno dell'isteresi magnetica. L'energia fornita al nucleo durante la fase di magnetizzazione dal circuito magnetizzante non viene interamente restituita durante quella di smagnetizzazione. Per ogni ciclo, una quantità di energia proporzionale all'area del ciclo stesso rimane immagazzinata nel nucleo magnetico. Nel bilancio energetico della macchina, la potenza persa per isteresi è sottratta a quella fornita alla macchina e non trasformata in altra forma di potenza utile. I fattori da cui dipende la perdita per isteresi sono:

- tipo di materiale, in base al quale cambiano la forma e le dimensioni del ciclo di isteresi e, quindi, il valore dell'energia persa per ogni ciclo;
- valore dell'induzione massima raggiunta durante il ciclo, all'aumentare del quale il ciclo d'isteresi diventa più largo e, di conseguenza, cresce il valore della perdita;
- frequenza della corrente magnetizzante, il cui aumento determina un maggior numero di cicli descritti nell'unità di tempo e, pertanto, un maggior valore della perdita per isteresi, [4].

Le considerazioni precedenti sono sintetizzate nella seguente formula, detta di Steinmetz:

$$P_i = k_i f B_M^n \quad (1)$$

nella quale

P_i indica il valore della potenza unitaria (o specifica) persa per isteresi;

k è una costante che dipende dal tipo di materiale e, a seconda di come viene considerata, con la (1) permette di calcolare la perdita specifica per unità di volume (W/m^3) o per unità di massa (W/kg);

f è la frequenza;

B_M è l'induzione massima del nucleo.

Il coefficiente n è detto esponente di Steinmetz e normalmente assume i valori:

$$n = 1,6 \quad \text{per } B_M < 1 \text{ T}$$

$$n = 2 \quad \text{per } B_M \geq 1 \text{ T}$$

Secondo la (1) per diminuire le perdite per isteresi il ciclo dovrebbe essere il più stretto possibile nel senso dell'intensità del campo magnetico (vedi figura 4).

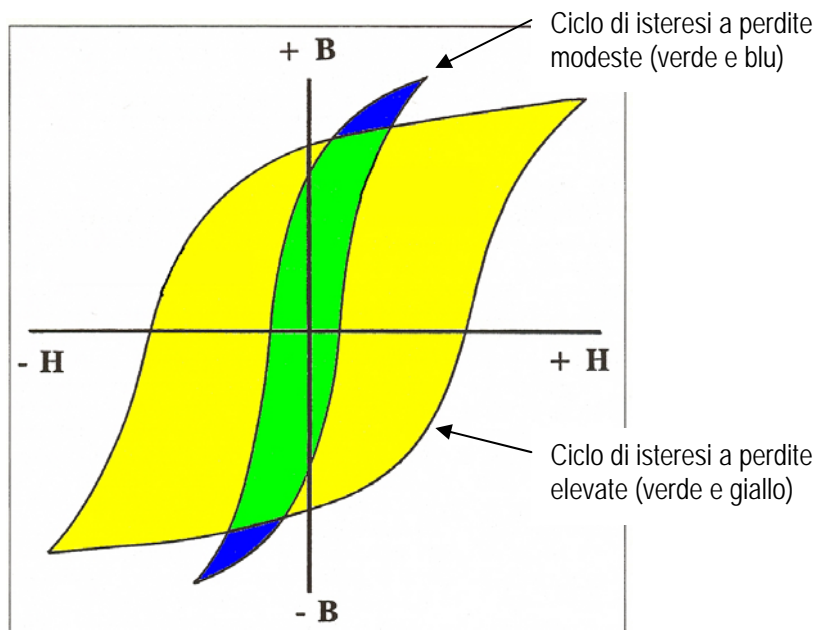


Figura 4 – Rappresentazione schematica di perdite per isteresi di diverso valore.

Perdite per correnti parassite

Una delle principali leggi dell'elettromagnetismo [4], nota come legge di Faraday-Neumann-Lenz, stabilisce che quando un circuito elettrico si concatena con un flusso magnetico variabile nel tempo, nel circuito viene indotta una tensione che si oppone alla variazione del flusso. Se tale tensione agisce in un circuito chiuso di resistenza R determina la circolazione di una corrente, inversamente proporzionale alla resistenza.

È possibile dimostrare analiticamente che la perdita specifica per correnti parassite che si ha in una lamiera magnetica di spessore s e resistività ρ , sottoposta a magnetizzazione sinusoidale con frequenza f e induzione massima B_M è data da:

$$P_{cp} = k \frac{s^2 f^2 B_M^2}{\rho} \quad (2)$$

nella quale

k è un coefficiente dipendente dal tipo di materiale; a seconda di come esso viene espresso, la (2) fornisce la perdita specifica per unità di volume o di massa;

Inglobando s e ρ nella costante tipica del materiale si ottiene:

$$P_{cp} = k_{cp} f^2 B_M^2 \quad (3)$$

Le relazioni (2) e (3) ci dicono che [4]:

- le perdite aumentano con il quadrato della frequenza e, quindi, sarebbe conveniente che la stessa avesse un valore piccolo. Su questo fattore, però, non si può influire, poiché esso è legato al regime di alimentazione della macchina;
- le perdite aumentano con il quadrato di B_M che, pertanto, non dovrebbe essere troppo elevata; anche questa grandezza è legata però al funzionamento della macchina e alla necessità di ridurre le dimensioni dei nuclei magnetici (a parità di flusso, un maggior valore di induzione fa diminuire la sezione del nucleo);
- per ridurre le perdite per correnti parassite occorre aumentare la resistività del materiale magnetico utilizzato. È opportuno ricordare, infatti, che il cosiddetto “ferro” è caratterizzato non solo da una elevata permeabilità, ma è anche un buon conduttore (termico ed elettrico) e, come qualunque altro conduttore, quando viene investito da un flusso di induzione variabile nel tempo, diventa sede di un campo di densità di corrente che finisce per essere causa di ulteriori perdite;
- sempre nell'ambito delle soluzioni tecniche correnti, poiché la potenza P_{cp} è direttamente proporzionale al quadrato dello spessore della lamiera, una drastica diminuzione delle correnti parassite e della relativa perdita si ottiene laminando il nucleo in senso parallelo alla direzione di magnetizzazione, ossia costituendo il nucleo con lamiere sottili, isolate tra loro mediante vernici, foglio di carta o semplicemente dall'ossido che si forma sulle superfici dei lamierini esposte all'aria. Poiché le correnti parassite si sviluppano su piani perpendicolari alla direzione di magnetizzazione, la laminazione interrompe le linee di corrente e ne permette lo sviluppo solo entro lo spessore del lamierino.

In forma schematica, la riduzione delle perdite per correnti parassite nei lamierini è illustrata nella figura 5.

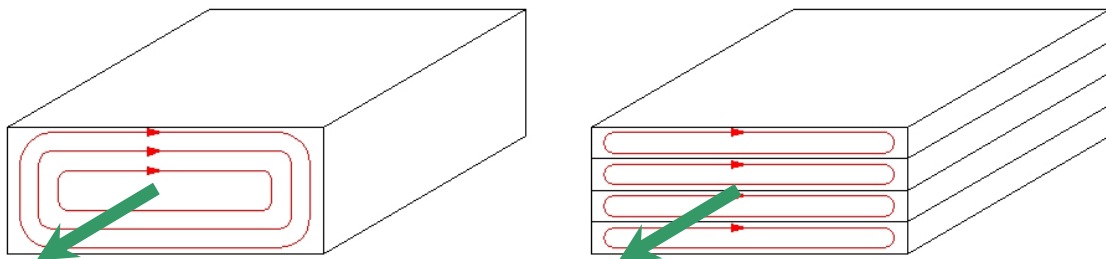


Figura 5 – Rappresentazione schematica delle perdite per correnti parassite in un pezzo pieno (lastra) e in un pacco di lamierini sottili di uguale spessore totale, in presenza di un campo magnetico variabile nel tempo.

Si consideri, infatti, il nucleo ferromagnetico di sinistra nella figura 5, investito da un campo di induzione magnetica supposto, per semplicità, diretto ortogonalmente alla sezione retta del nucleo e variabile nel tempo, ad esempio con legge sinusoidale, come avviene nella maggior parte dei casi concreti. Il nucleo può essere immaginato come costituito da un complesso di “gusci” concentrici, ciascuno assimilabile ad una spira, di spessore infinitesimo, concatenata con le linee di flusso del vettore induzione. La legge di Lenz assicura che lungo ciascuna spira (guscio) si manifesta, per induzione, una forza elettromotrice (FEM) indotta che farà circolare una corrente: l'intero volume del nucleo sarà, allora, sede di un campo di densità di corrente indotta, causa di fenomeni dissipativi che finiranno per riscaldare il nucleo.

Solitamente, con lo scopo di ridurre le perdite nel nucleo, si:

- aumenta la resistività del ferro, mediante l'aggiunta di silicio (intorno a 1%);
- evitano i nuclei massicci.

La sezione richiesta del nucleo si realizza mediante sovrapposizione di sottili lamierini isolati fra loro; la dipendenza delle perdite dal quadrato dello spessore s consente di conseguire un notevolissimo beneficio dall'adozione della struttura a lamierini. I singoli lamierini vengono isolati fra loro mediante l'interposizione di un idoneo isolante. In molti casi, però, come già anticipato, viene ritenuto adeguato lo strato di ossido che si forma spontaneamente sulla superficie di un materiale ferroso lasciato sotto l'azione dell'aria e dell'umidità.

Se si immagina di passare da un pacco di lamierini ad un insieme di barrette corte, opportunamente disposte, con superfici isolate, come schematizzato in Figura 6, si può ipotizzare una drastica ulteriore riduzione delle perdite per correnti parassite. La configurazione di destra suscita l'idea di una possibile utilizzazione di materiali granulari ad alta permeabilità ma con superfici rivestite di strati isolanti sottili. Per estensione, si può immaginare di passare dalla disposizione ordinata di elementi geometrici definiti, schematizzata nella parte destra della figura 6, ad una disposizione “densa” di corpuscoli isolati come indicato in figura 7 (ripresa, con modifiche, da [5]).

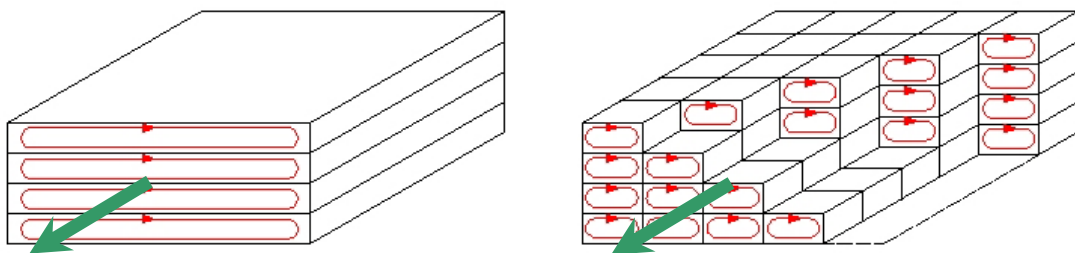


Figura 6 – Rappresentazione schematica delle perdite per correnti parassite in un pacco di lamierini sottili o in un insieme di piccoli prismi isolati di uguali ingombri esterni, in presenza di un campo magnetico variabile nel tempo.

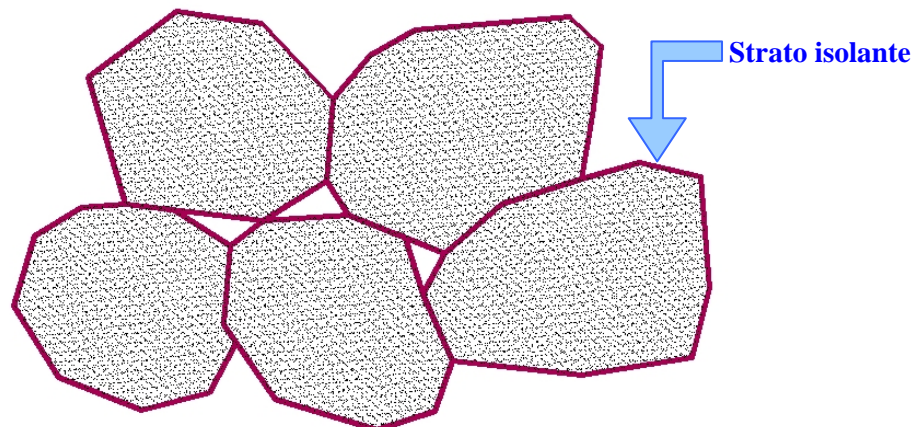


Figura 7 – Rappresentazione schematica della realizzazione di un nucleo magnetico costituito da granuli di ferro puro a superfici isolate (da [5] con modifiche).

Permeabilità magnetica e resistività dei materiali ferrosi da polveri

Dalle considerazioni precedenti risulta chiara l'esigenza di una elevata resistività di qualsiasi materiale ferroso basato su polveri metalliche. Questa esigenza non è compatibile con una normale sinterizzazione, per quanto volutamente inquinata ("ossidante") possa essere l'atmosfera protettiva. La figura 8, infatti, mostra che alla temperatura minima di corretta sinterizzazione del ferro, circa 1100°C, il rapporto H_2 / H_2O [6] dovrebbe essere inferiore ad 1 per garantire la sopravvivenza dell'eventuale ossido di ferro.

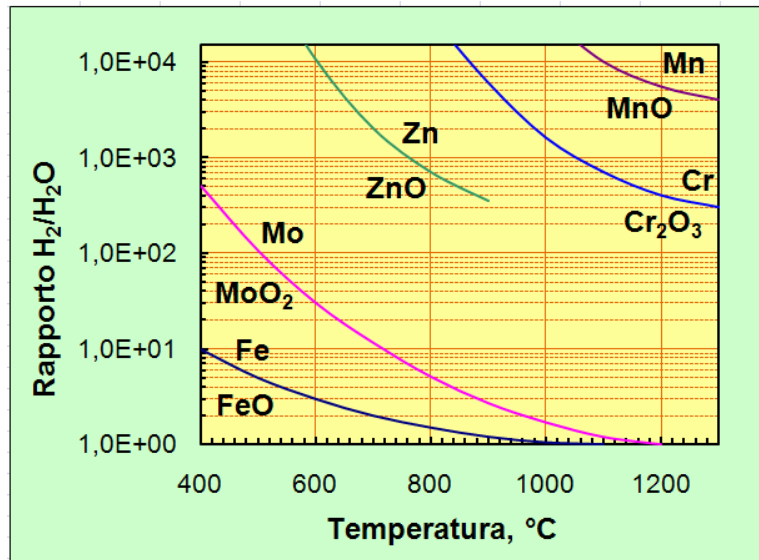


Figura 8 – Condizioni di equilibrio fra ossidazione e riduzione, a diverse temperature, in atmosfere H_2/H_2O .

L'argomento resistività dei materiali metallici sinterizzati è stato uno dei primi studiati in epoca pionieristica in metallurgia delle polveri. Nella figura 9, ad esempio, si riporta il grafico della resistività di provini di ferro (ottenuti da polveri di diversa origine) dopo pressatura alle pressioni indicate sull'asse delle ascisse (curve nella parte superiore della figura) e dopo sinterizzazione a 1200°C in idrogeno [7]. Questa figura conferma l'asserzione relativa alla figura precedente, poiché la sinterizzazione comporta una diminuzione di almeno un ordine di grandezza della resistività, a parità di pressione di pressatura. L'effetto della sinterizzazione, ai fini di una diminuzione significativa della resistività, risulta ancora più evidente dalla figura 10, nella quale si riporta la curva della resistività di provini ottenuti da polvere di nichel carbonile pressati a 589 MPa, in funzione della temperatura di riscaldamento fino a quella massima di sinterizzazione e delle successive temperature in raffreddamento. Per confronto, nella stessa figura, si riporta la curva della resistività del nichel puro, in funzione della temperatura [8]. La figura 10 indica chiaramente che l'effetto positivo della temperatura (collegamento irreversibile tra le particelle) prevale, da un certo punto in poi, sull'aumento di resistività derivante da un aumento di temperatura. Per completezza, in figura 11 [6], si riporta il confronto fra conducibilità termica ed elettrica di metalli sinterizzati diversi in funzione della porosità. Le fasce in colore permettono di inserire la legge teorica [9]:

$$\lambda_s = \lambda_m(1 - 2\varepsilon) \quad (4)$$

nella quale

- λ_s è la conducibilità (elettrica o termica) del materiale sinterizzato a porosità ε ,
- λ_m è la conducibilità (elettrica o termica) del materiale compatto di uguale composizione e stato strutturale di quello sinterizzato,

In tempi relativamente più recenti, le variazioni di conducibilità elettrica nella pressatura di polveri di ferro puro sono state studiate, sperimentalmente, anche da Leheup e Moon [10].

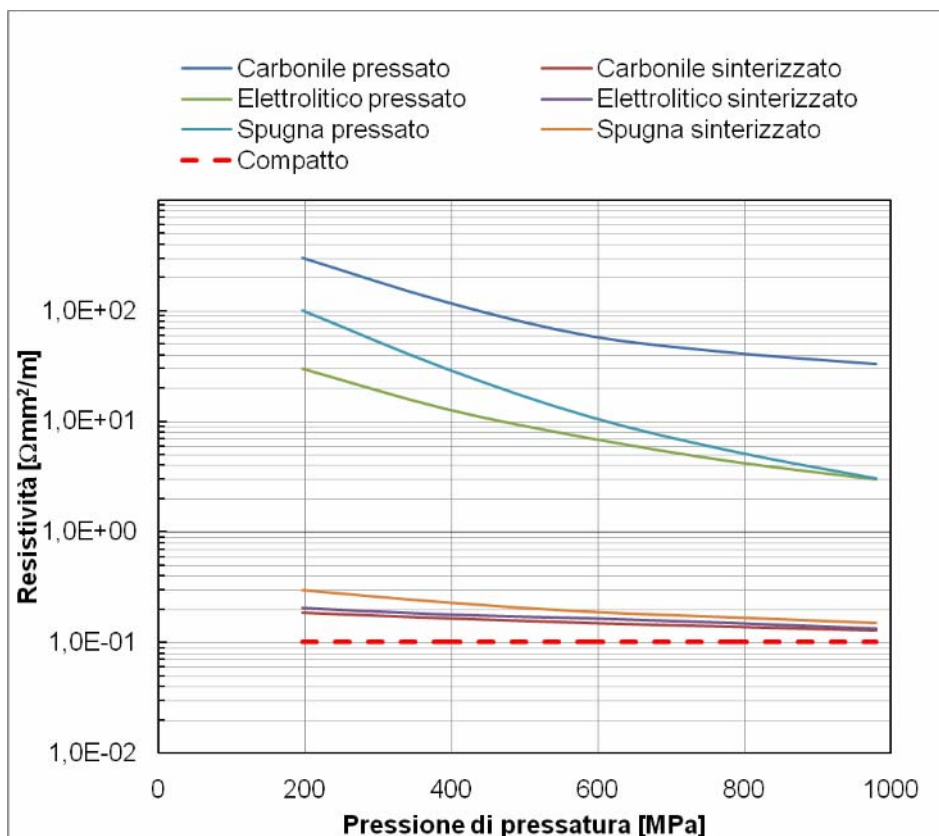


Figura 9 – Influenza delle condizioni di pressatura e sinterizzazione sulla resistività di provini di ferro da polveri di varia origine.

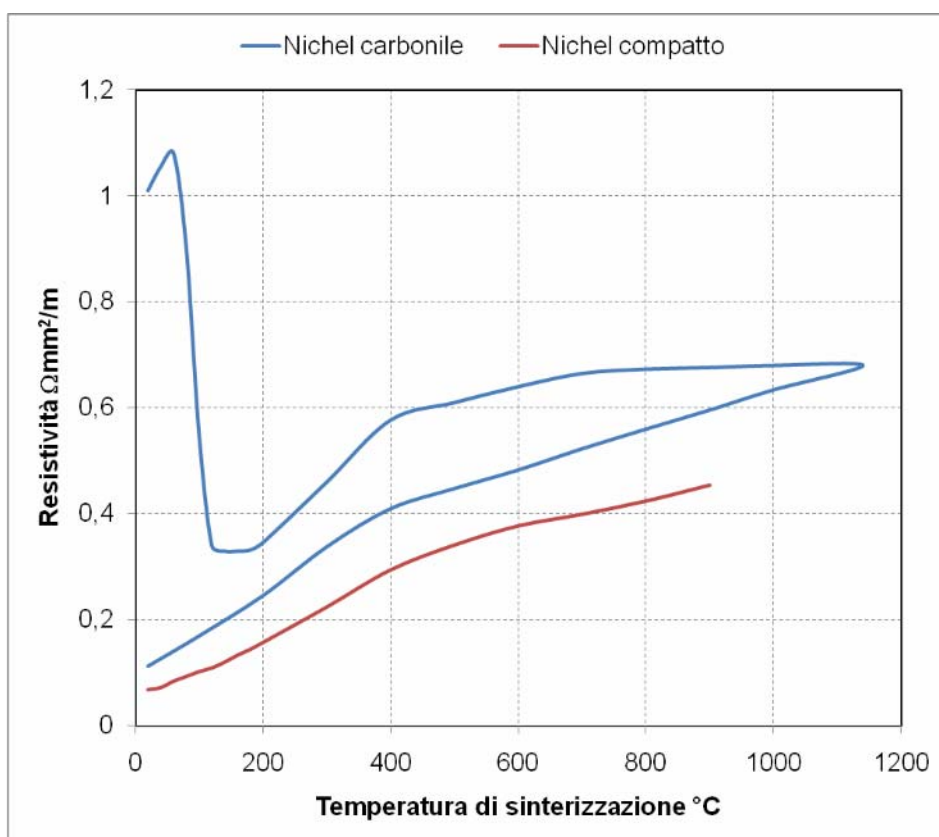


Figura 10 – Influenza della temperatura di riscaldamento (e raffreddamento) sulla resistività di provini da polveri di nichel carbonile pressata a 589 MPa. Per confronto si riporta, in rosso, la curva della resistività del nichel puro, completamente denso, in funzione della temperatura.

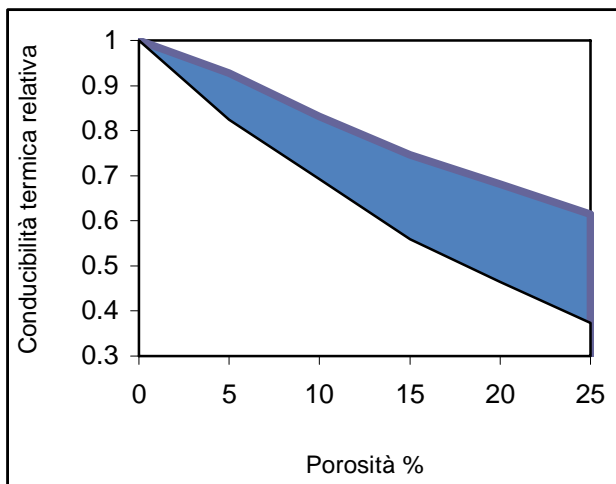


Figura 11 – Conducibilità termica normalizzata di diversi materiali metallici sinterizzati.

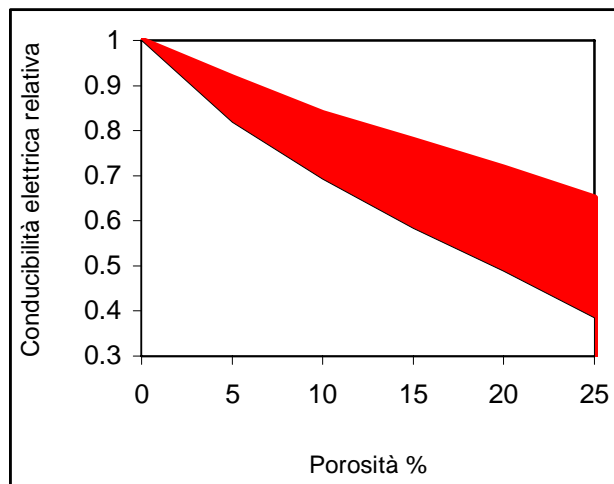


Figura 12 - Conducibilità elettrica normalizzata di diversi materiali metallici sinterizzati.

Polveri di ferro puro a granuli isolati per applicazioni magnetiche dolci

Sostanzialmente i materiali magnetici dolci composti (SMC, Soft Magnetic Composites) sono costituiti da particelle di polvere di ferro rivestite con uno strato polimerico elettricamente isolante, come già anticipato nella figura 7. Le proprietà elettromagnetiche e meccaniche [5 – 11] dei componenti finiti dipendono:

- dal tipo di materia prima,
- dalla densità di pressatura,
- dal tipo di “cottura”.

La densità di pressatura dipende sia dal tipo e dalla quantità di lubrificante aggiunto che dalla tecnica adottata per addensare il materiale (a temperatura ambiente o con modesto riscaldamento della polvere). Il rivestimento polimerico è stato studiato e messo a punto in modo da renderlo resistente alla pressatura. In altri termini, le elevate pressioni di contatto e gli scorrimenti relativi fra superfici adiacenti non riescono a lacerare, asportare o distruggere gli strati isolanti che ricoprono i singoli grani di polvere.

In questo particolare processo si parla di “cottura” e non di sinterizzazione perché, come visto precedentemente, la sinterizzazione vera e propria causerebbe uno scadimento inaccettabile delle proprietà funzionalmente richieste. Allo stesso modo, il trattamento termico non deve distruggere o modificare irreversibilmente le proprietà isolanti del rivestimento. Altra funzione essenziale della cottura è quella di ridurre significativamente gli effetti negativi dell’incrudimento causato dalle deformazioni plastiche in pressatura. L’insieme combinato di queste esigenze limita, oggi, a meno di 600°C la temperatura di trattamento. La cottura a 500°C fa aumentare di 4 volte la resistenza a trazione del materiale. L’atmosfera protettiva, anche ricordando la figura 8, non deve avere caratteristiche riducenti ma, al contrario, proprietà che favoriscano l’ossidazione del ferro.

A titolo di esempio, in figura 13 si riporta un granulo di polvere SMC Somaloy™ 500 della Höganäs [11]. Le dimensioni massime delle particelle sono generalmente inferiori a 0,2 mm.

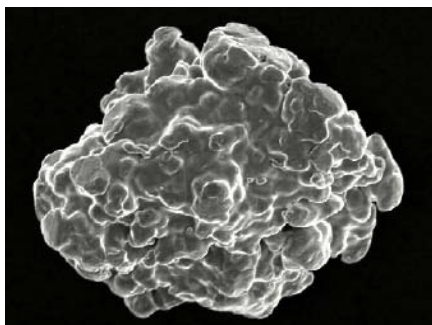


Figura 13 – Granulo di polvere SMC Somaloy™ 500, Cortesia Höganäs AB.

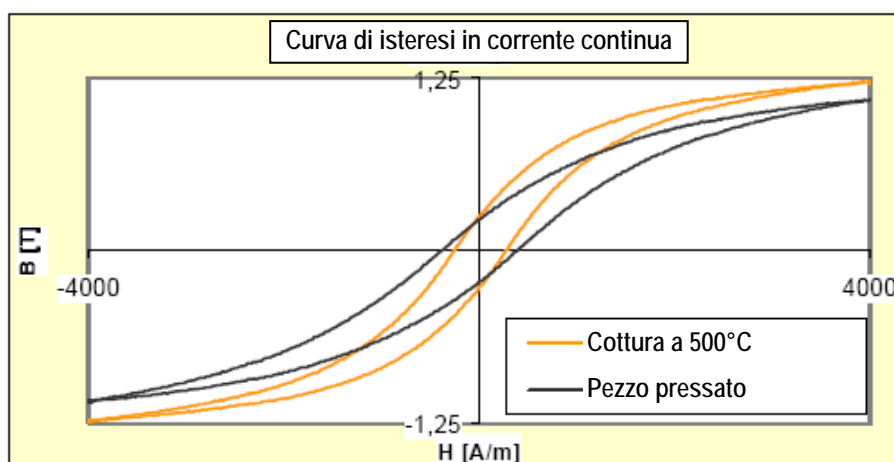


Figura 14 – Curve di isteresi dopo pressatura e dopo cottura a 500°C [da 5].

Le curve di figura 14 [5] indicano chiaramente l'effetto di attenuazione dell'incrudimento derivante dalla "cottura" della polvere Somaloy™ 500. L'effetto della densità sulle curve tipiche B-H, sempre per la polvere Somaloy™ 500, è illustrato in figura 15 [da 12].

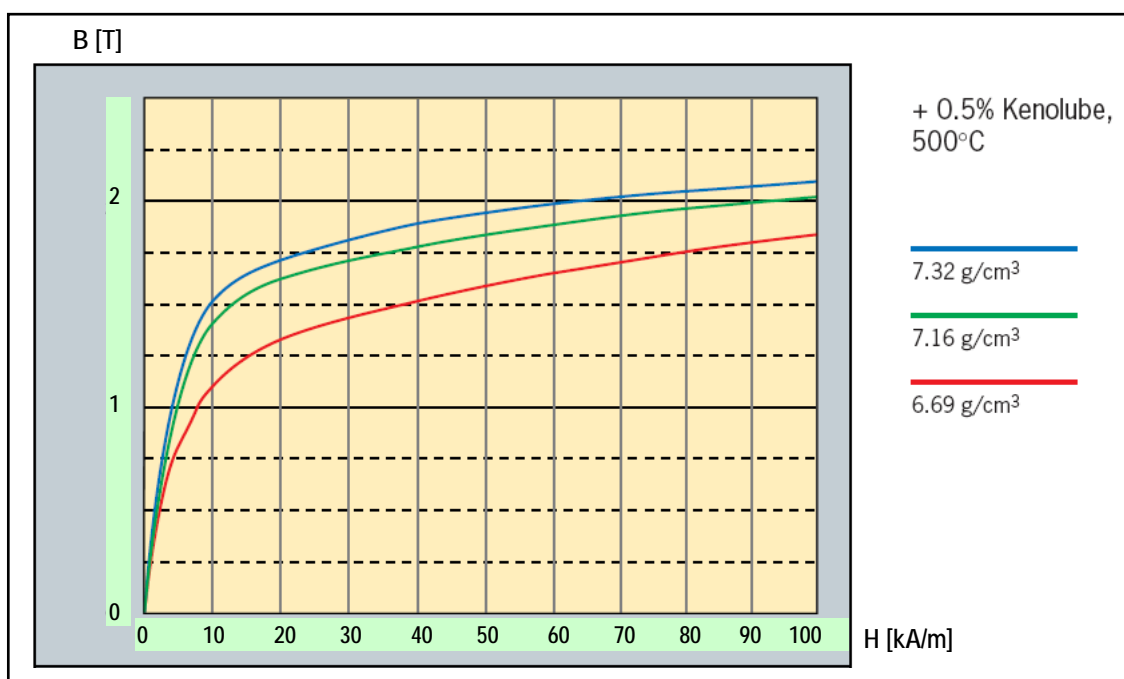


Figura 15 – Curve tipiche di B-H in funzione della densità del materiale, polvere Somaloy™ 500 [da 12].

Le perdite nel nucleo in funzione della frequenza o dell'induzione per il materiale Somaloy™ 500 a densità di 7,36 g/cm³ sono riportate nelle figure 16 e 17. Per completezza, in figura 18 si mettono a confronto le perdite totali di nuclei di materiale composito dolce (Somaloy™ 500) con quelle di lamierini tradizionali. Come si può rilevare, nel caso di materiale cotto a 500°C, la curva delle perdite totali nel nucleo coincide sostanzialmente con quella di nuclei di lamierino sottile di ferro - silicio spessi 0,45 mm.

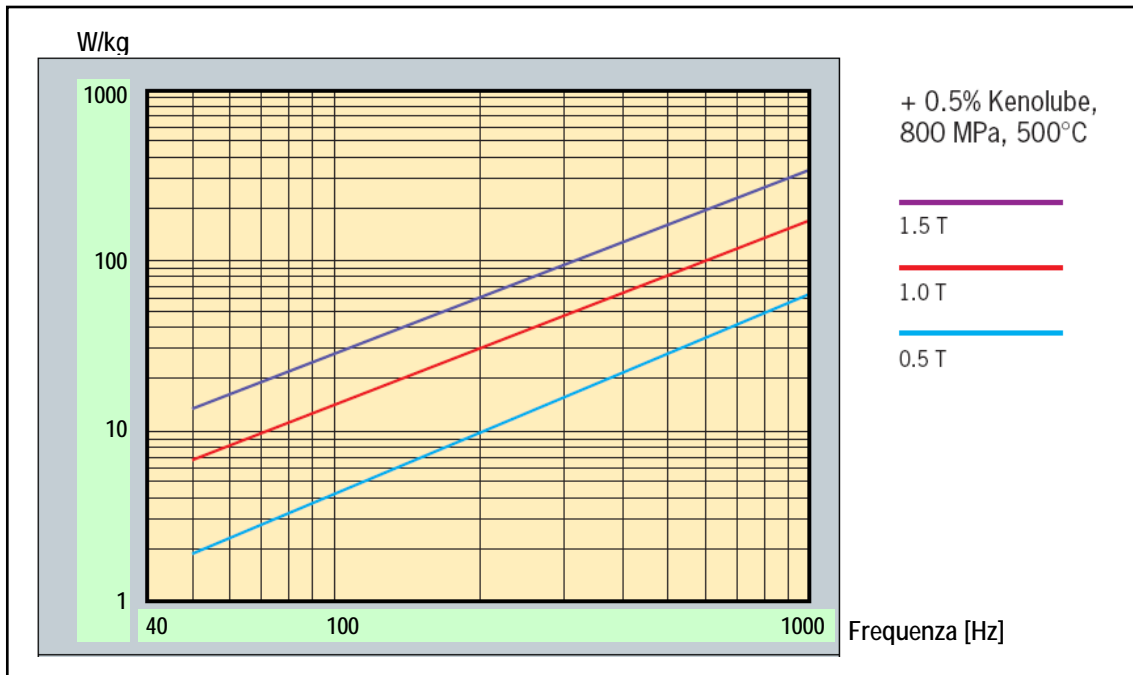


Figura 16 – Perdite nel nucleo in funzione della frequenza, polvere Somaloy™ 500, densità del materiale 7,36 g/cm³ [da 12].

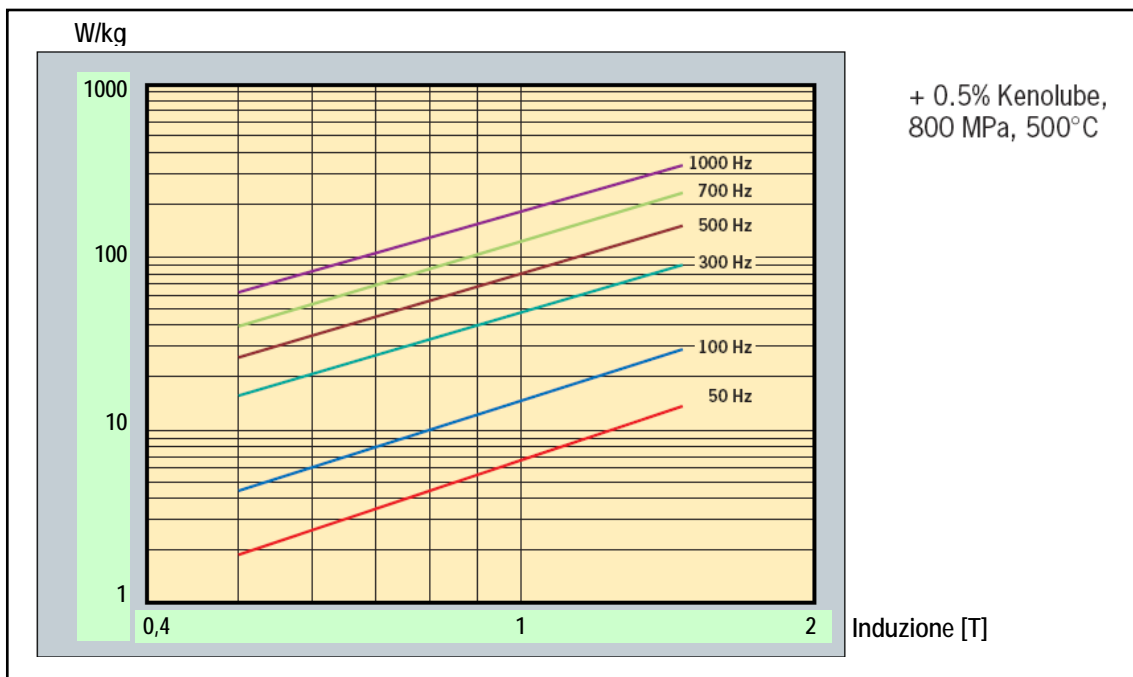


Figura 17 – Perdite nel nucleo in funzione dell'induzione, polvere Somaloy™ 500 densità del materiale 7,36 g/cm³ [da 12].

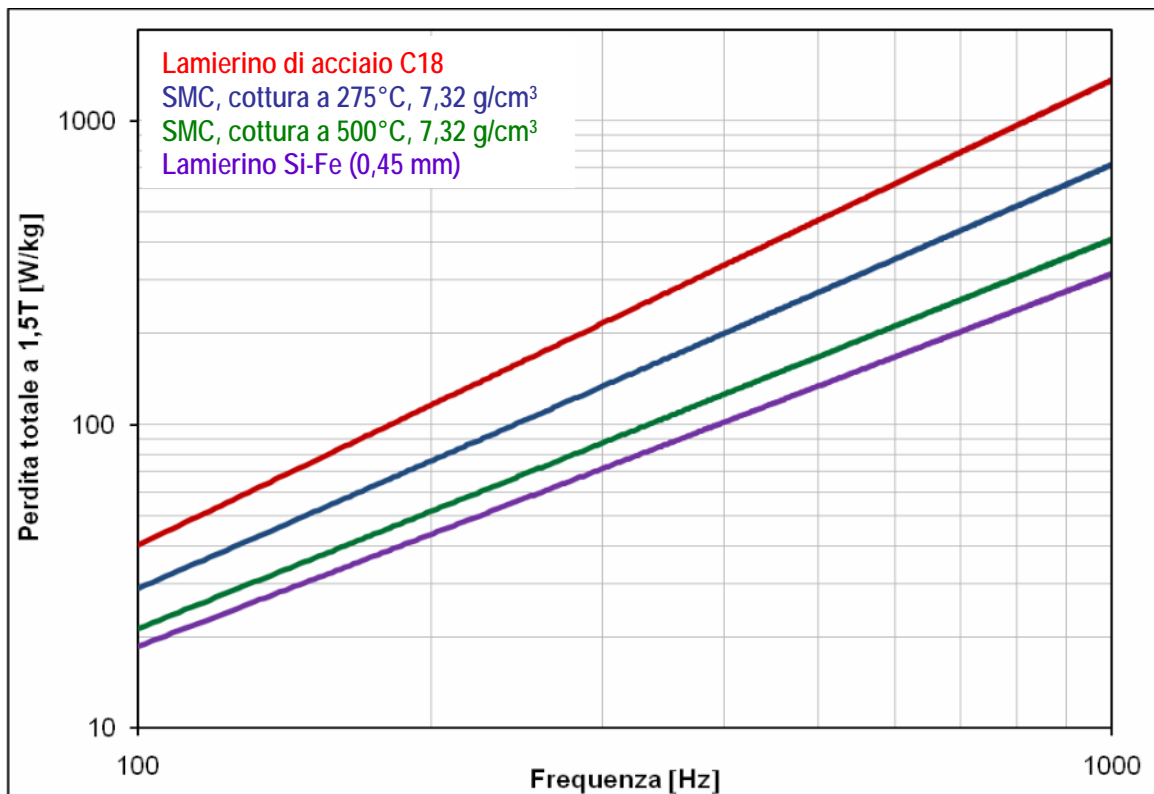


Figura 18 – Confronto tra le perdite totali di diversi materiali per applicazioni magnetiche [da 11].

Nuove possibilità progettuali: la terza dimensione

Le prime applicazioni elettromagnetiche basate su lamierini sottili risalgono presumibilmente agli ultimi decenni del diciannovesimo secolo. In questo lungo arco di vita, le soluzioni tecniche sono state progressivamente affinate ma sempre rispettando il vincolo della geometria piana degli elementi. Il possibile impiego di soluzioni basate sui materiali compositi dolci da polveri svincola i progettisti da questa fortissima limitazione e rende possibili soluzioni altrimenti impensabili. E' evidente che queste nuove possibilità implicano il superamento di una barriera "psicologica" e tutto un ripensamento di progettazioni consolidate. Esse rappresentano da una parte una sfida e dall'altra un ostacolo. Tuttavia è facile prevedere che, grazie anche alle possibilità di calcolo oggi consentite dal ricorso a metodo agli elementi finiti, si potranno realizzare in progetti innovativi basati sui nuovi materiali. Solo a titolo di esempio si riportano nelle figure 19 e 20 alcuni esempi di componenti realizzati con materiali SMC.



Figura 19 – esempio di particolare espressamente progettato per la realizzazione in materiale magnetico dolce da polveri [cortesia Höganäs AB].



Figura 20 – Esempio di applicazione su scala industriale di componenti magnetici per sistemi di iniezione [da 13].

Gli esempi illustrati evidenziano i vantaggi offerti dalle nuove possibili soluzioni, vale a dire:

- proprietà di isotropia, sia magnetica che termica,
- buone prestazioni ad alta frequenza,
- possibilità di sfruttare i vantaggi di forme complicate, nell'ambito dei vincoli della tecnologia di formatura mediante pressatura di polveri,
- la necessità di impiegare durante il dimensionamento in progettazione coefficienti di sicurezza di poco superiori ad 1 (poiché le proprietà dei materiali SMC vengono determinate utilizzando provini prodotti esattamente nelle stesse condizioni con cui saranno poi prodotti i componenti finali).

Si ritiene comunque opportuno ripetere che questi vantaggi si perdono se non si ricorre a criteri di progetto che consentono di sfruttare la tridimensionalità. Ad esempio, in figura 21 si riporta un caso di progettazione specifica che ha consentito una sostanziale semplificazione nella realizzazione dell'avvolgimento.

Infine, per completezza, si fa presente che la natura dei materiali magnetici dolci da polveri (disgregabili meccanicamente in modo molto più agevole rispetto ai lamierini) contribuisce a facilitare la separazione ed il conseguente auspicabile recupero del pregiato materiale degli avvolgimenti alla fine del ciclo di vita utile.

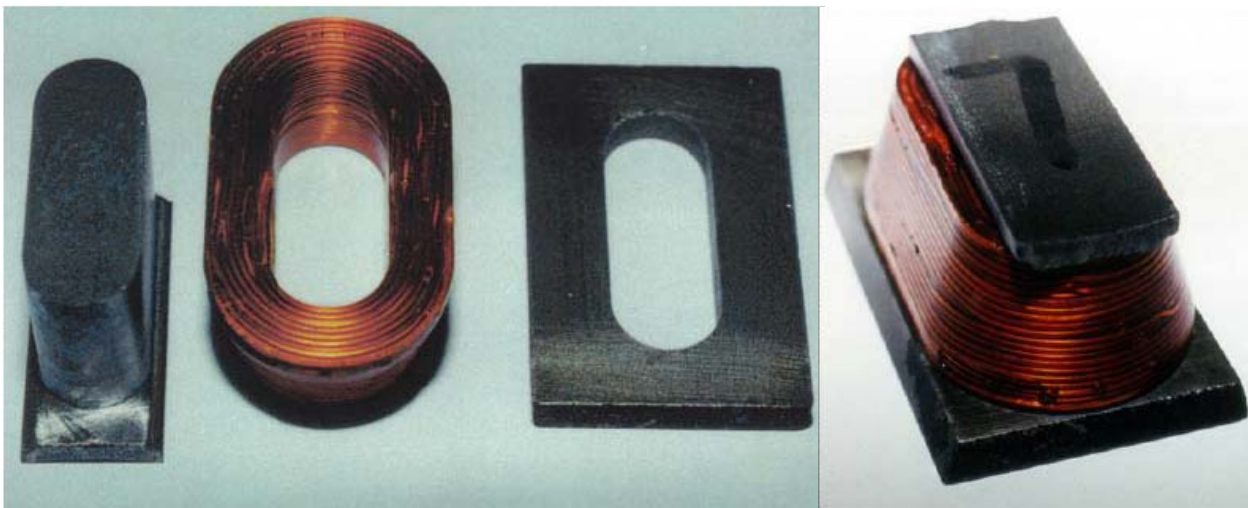


Figura 21 – Esempio di componente magnetico in 2 parti con avvolgimento preformato [da 14].

Riferimenti bibliografici

1. Enrico Tironi, Dip. di Elettrotecnica, Politecnico di Milano: “Il problema energetico. L’efficienza energetica nel settore elettrico”, *La Termotecnica*, Ottobre 2008
2. ENEA: “RAPPORTO ENERGIA E AMBIENTE 2006 - Analisi e scenari”, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA), Roma
3. Gianluca Ruggieri: “Alcune note sui consumi elettrici nel settore domestico in Italia”, DASS – Università dell’Insubria, Varese, Ottobre 2008
4. Gaetano Conte: “Macchine elettriche. Aspetti Costruttivi, Funzionamento, Caratteristiche”, Hoepli, Milano, 2001
5. L. Hultman, O. Andersson, A. Jack: “The SMC technology – From idea to reality”, pubblicazione SAE 03M-307b
6. Randall M. German: “Sintering theory and practice”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996
7. R. Kieffer, W. Hotop: “Sintereisen und Sinterstahl”, Springer-Verlag, Vienna, 1948
8. G. Grube, G. Schlecht: “*Z. Elektrochemie*”, Bd. 44, 1938, S. 367
9. G. Bocchini: “The influences of porosity on the characteristics of sintered materials”, *Reviews on Powder metallurgy and Physical Ceramics*, Vol. 2, No. 4, 1985
10. E. R. Leheup, J. R. Moon, “Electrical conductivity changes during compaction of pure iron powder”, *Powder Metallurgy*, 1978, No. 4, 195-198
11. M. Persson, “SMC: More than material”, Höganäs Report, (dopo il 1997)
12. Höganäs AB – Pubblicazione Somaloy™ 500, SMC01
13. Höganäs AB –SMC Handbook, Vol. 5 – Design Examples
14. Höganäs AB –SMC Handbook, Vol. 6 – Servo motor case study