

Università degli Studi di Padova



Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica e Meccatronica
Curriculum Meccatronico

Materiali per magneti permanenti resistenti alle alte temperature

Permanent magnet materials resistant to
high temperatures

Tesi di Laurea Triennale

Relatore: Ch.mo Giuseppe Chitarin

Laureanda: Sara Mazzon

Anno Accademico 2011/2012

Sommario

Sommario	1
1 Fondamenti di magnetismo.....	2
1.1 Introduzione	2
1.2 Densità di flusso e proprietà magnetiche della materia	3
1.3 Momenti magnetici	4
1.4 Sostanze ferromagnetiche. Ciclo di isteresi.....	6
1.5 Parametri che caratterizzano i materiali magnetici	8
1.6 Massima densità di energia.....	8
1.7 Anisotropia magnetocristallina e anisotropia nella forma	9
2 Materiali per i magneti permanenti	10
2.1 Alnico	10
2.2 Ferrite	12
2.2.1 Ferrite plastica	14
2.2.2 Gomma magnetica in ferrite	14
2.3 Terre rare.....	15
2.3.1 Samario-cobalto	15
2.3.2 Neodimio ferro boro.....	17
2.3.3 Neodimio con leganti plastici	18
2.3.4 Gomma magnetica in NdFeB.....	19
2.4 Mercato	20
2.5 Terre rare, materiali strategici.....	21
3 Stabilità termica.....	22
3.1 Introduzione	22
3.2 Temperatura di Curie.....	22
3.3 Curve di smagnetizzazione	23
3.4 Variazioni di composizione	28
3.5 Superficie di ossidazione	30
3.5.1 Corrosione e reattività chimica	32
4 Applicazioni.....	33
4.1 Motori in corrente continua.....	33
4.2 Motori sincroni	35
4.3 Sensori	36
5 Conclusioni	38
Ringraziamenti.....	39
Bibliografia.....	40

1 Fondamenti di magnetismo

1.1 Introduzione

In natura esistono corpi che hanno la proprietà di attrarre il ferro, mostrata da alcuni minerali di ferro e in particolare dalla magnetite (combinazione di ossidi di ferro FeO , FeO_2); era nota già nel VII secolo a.C.; il nome magnetite derivò da quello della città greca Magnesia, in Asia Minore, dove si trovavano giacimenti del minerale e la proprietà osservata prese il nome di magnetismo. Tale proprietà non è presente uniformemente nel materiale, ma si manifesta principalmente in determinate parti ed è possibile costruire campioni cilindrici in cui essa è localizzata nelle basi. Sia questi oggetti che altri con geometria diversa prendono il nome di magneti e le parti in cui si localizza la proprietà di attrazione si chiamano poli del magnete. W. Gilbert, nel sedicesimo secolo, fece una serie di esperienze con dei magneti, aventi lo scopo di mettere in evidenza le caratteristiche del magnetismo. I risultati dello studio sono riassunti in alcuni punti:

- Se ad un magnete sospeso nel centro tramite un filo, libero di ruotare, si avvicina un secondo magnete, si vede che quest'ultimo esercita sul primo una forza. Un magnete, perciò, genera un campo magnetico, mentre l'altro magnete risente l'azione di tale campo sulla posizione da esso occupata. La forza di interazione tra i due magneti è attrattiva o repulsiva a seconda dei poli dei magneti che vengono affacciati. I poli di uno stesso magnete sono sempre di segno opposto.
- Se si avvicina ad un pezzo di magnetite una bacchetta sottile di ferro, questa acquista la proprietà di attirare il ferro: la bacchetta di ferro immersa nel campo magnetico generato dalla magnetite è diventata pertanto un magnete, ovvero si magnetizza. Essa viene chiamata magnete artificiale o calamita e presenta due poli di segno opposto. Se la bacchetta è di piccole dimensioni viene chiamata ago magnetico.
- Se si sospende ad un filo l'ago magnetico, libero di ruotare, si osserva che questo tende a disporsi parallelamente al meridiano terrestre. L'ago magnetico si comporta come un dipolo magnetico, il quale lasciato libero, si orienta nella direzione e verso del campo magnetico esistente nel punto dove è posto.

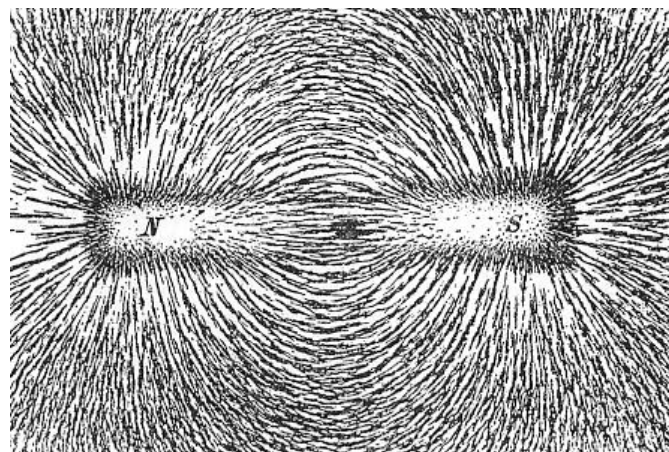


Figura 1.1: Linee di forza del campo magnetico generato da una calamita

Un magnete permanente è formato da un materiale che è stato magnetizzato e crea un proprio campo magnetico. Esso crea un campo magnetico in un traferro senza avvolgimenti di eccitazione e senza dissipazione di potenza elettrica. I materiali che possono essere magnetizzati sono chiamati ferromagnetici; questi includono ferro, nichel, cobalto e terre rare e alcuni materiali naturali come appunto la magnetite. I materiali ferromagnetici si possono suddividere in materiali magneticamente “morbidi”, che possono venire magnetizzati ma che tendono a non rimanere in tale stato e materiali magneticamente “duri” che invece rimangono magnetici. I magneti permanenti sono costituiti da materiali ferromagnetici duri. Un magnete permanente può essere descritto da un ciclo di isteresi B-H.

1.2 Densità di flusso e proprietà magnetiche della materia

La densità di flusso magnetico, o induzione magnetica, nei magneti può avere due componenti: una intrinseca B_i , a causa dell’allineamento dei domini cristallini in un campo magnetico applicato durante la magnetizzazione, e una estrinseca B_h causata dalla sua intensità di campo magnetico, come se il materiale non ci fosse in presenza di campo magnetico applicato, in altre parole è una piccola componente dovuta all’intensità del campo magnetico in una bobina a vuoto.

$$B = B_h + B_i$$

dove B è la densità di flusso, conosciuta anche come densità normale di flusso in un magnete. La sua unità di misura è il T (Tesla) definito come Wb/m^2 ; sottomultipli spesso usati sono il G (Gauss) definito da $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$.

Si consideri ora un solenoide lungo, il cui campo magnetico sia pari a $B_0 = \mu_0 ni$, dove B_0 indica il campo che si misura quando il solenoide è vuoto, n la densità di spire e i la corrente. Si indica l’intensità H come

$$H = \frac{B_0}{\mu_0}$$

dove μ_0 è chiamata **permeabilità magnetica del vuoto** e vale $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$. Se si riempie il solenoide con un mezzo omogeneo, si trova che il campo B è parallelo a B_0 e vale il rapporto tra i moduli

$$\frac{B}{B_0} = \mu_r$$

dove μ_r prende il nome di **permeabilità magnetica relativa** del mezzo considerato. Quindi:

$$B = \mu_r B_0 = \mu_0 \mu_r ni = \mu ni$$

dove μ è detta **permeabilità magnetica assoluta**. Mentre μ_r è adimensionale, μ e μ_0 hanno come unità di misura H/m.

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H$$

L'espressione sopra $B/B_0 = \mu_r$ vale anche per oggetti di materiale magnetico e forma qualunque immersi in un mezzo indefinito. La variazione del campo magnetico dovuta alla presenza del materiale magnetico è

$$\mathbf{B}_m = \mathbf{B} - \mathbf{B}_0 = (\mu_r - 1)\mathbf{B}_0 = \chi_m \mathbf{B}_0 = \mu_0 \chi_m \mathbf{H}$$

dove χ viene chiamata suscettività magnetica, che ha il significato di variazione relativa del campo magnetico, dovuta al materiale. Si definisce con M il vettore magnetizzazione

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$$

che descrive direttamente le proprietà magnetiche del mezzo sotto l'azione delle correnti. Il campo magnetico B si può scrivere allora come

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_m = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

L'intensità del campo magnetico nel solenoide risulta in particolare:

$$B = \mu_0 ni + \mu_0 \chi_m ni$$

Dato che il primo termine dell'equazione è il campo magnetico prodotto dalla corrente di conduzione di densità lineare ni che circola nelle spire del solenoide, il secondo termine deve rappresentare l'effetto del mezzo magnetizzato. La misura dell'induzione magnetica B e della forza magnetica H permette di distinguere i materiali in base al valore della suscettività in:

- *Diamagnetici*: caratterizzati da $\mu_r < 1$ e $\chi_m < 0$; sono sostanze come l'argento, l'oro, l'acqua, il rame e l'idrogeno, per le quali la permeabilità magnetica è indipendente dall'intensità del campo e minore dell'unità. Queste sostanze sono quelle i cui atomi non hanno un momento magnetico.
- *Paramagnetici*: caratterizzati da $\mu_r > 1$ e $\chi_m > 0$; sono sostanze come l'alluminio, il calcio, il titanio e l'ossigeno, per le quali la permeabilità è indipendente dall'intensità del campo e maggiore dell'unità. La permeabilità è funzione della temperatura. Vale la prima legge di Curie per cui $\chi_m = Cp/T$ dove ρ è la densità, C una costante detta costante di Curie, e T la temperatura espressa in kelvin. Queste sostanze sono costituite da atomi che hanno un momento magnetico proprio.
- *Ferromagnetici*: caratterizzati da $\mu_r \gg 1$ e $\chi_m \gg 0$; sono sostanze come il ferro, il nichel e il cobalto, che danno origine a campi magnetici di intensità migliaia di volte superiore rispetto a quello prodotto nel vuoto. La struttura di queste sostanze permette un allineamento spontaneo dei momenti magnetici.

1.3 Momenti magnetici

All'interno di ogni atomo ci sono due situazioni fisiche che possono dare origine ad un momento di dipolo magnetico atomico. La prima è il moto degli elettroni intorno al nucleo, che può essere pensato come un insieme di correnti chiuse elementari, a ciascuna delle quali corrisponde un momento magnetico orbitale. La seconda è il fatto che ciascun elettrone possiede un momento

magnetico intrinseco associato allo spin, momento angolare intrinseco. Nella maggior parte degli atomi la somma di tutti i momenti magnetici, orbitali e di spin, è nulla e perciò non esiste un momento magnetico atomico. Se agisce un campo magnetico esterno \mathbf{B}_0 e quindi $\mathbf{H} = \mathbf{B}_0/\mu_0$, il moto orbitale di ciascun elettrone viene perturbato da extracorrenti che hanno un verso tale da generare un momento magnetico dell'atomo

$$\mathbf{m}_a = -\alpha_a \mathbf{H}$$

opposto ad \mathbf{H} e proporzionale ad esso tramite il coefficiente α_a che dipende dalla forma e dalle dimensioni dell'atomo stesso; m_a è molto piccolo anche in presenza di campi magnetici intensi. È questo il fenomeno del diamagnetismo.

In alcuni atomi e in alcune molecole si ha un momento magnetico intrinseco m_0 . In presenza di un campo magnetico esterno, vi è un'orientazione parziale, disturbata dall'agitazione termica, si stabilisce perciò un equilibrio dinamico tra la tendenza dei dipoli ad orientarsi in tutte le possibili direzioni e la tendenza ad allinearsi con il campo. Ha origine un momento magnetico

$$\mathbf{m} = \frac{\alpha_m}{T} \mathbf{H}$$

concorde ad \mathbf{H} e ad esso proporzionale e inversamente proporzionale alla temperatura; α_m contiene m_0^2 . Alla temperatura ambiente, in presenza di campi magnetici anche intensi, l'effetto è comunque piccolo, ma maggiore dell'effetto del diamagnetismo. Si tratta del fenomeno del paramagnetismo.

Nel ferromagnetismo gli effetti della magnetizzazione sono evidenti: le molecole delle sostanze ferromagnetiche possiedono momenti magnetici propri e sotto l'azione di campi magnetici esterni, anche relativamente deboli, queste sostanze si magnetizzano notevolmente e tendono a mantenere tale magnetizzazione anche quando si elimina il campo esterno. A livello atomico il momento magnetico degli elementi ferromagnetici è dovuto esclusivamente allo spin degli elettroni. In un cristallo di ferro, di cobalto o di nichel si hanno delle zone, dette *domini di Weiss*, con volume compreso tra 10^{-12} e 10^{-18} m³ e contenenti un numero di atomi tra 10^{17} e 10^{11} , nelle quali esiste una magnetizzazione spontanea, dovuta all'interazione non magnetica che allinea gli spin. I domini adiacenti non hanno la magnetizzazione nella stessa direzione: nella zona di confine, detta *parete di Bloch*, l'orientazione degli spin passa da quella di un dominio a quella del dominio adiacente. Un componente di materiale ferromagnetico è composto da molti cristalli orientati a caso e quindi, pur essendo magnetizzato, può non manifestare alcun momento magnetico. All'aumentare del campo H si ha un aumento dei domini finché non si raggiunge la saturazione. Il processo di spostamento delle pareti di Bloch e di orientazione non è reversibile, se non per valori di H piccoli, a causa di imperfezioni dei cristalli e della presenza di impurezze, perciò quando si torna allo stato iniziale di disordine dei domini, resta una magnetizzazione residua, alla quale è dovuta la possibilità di avere magneti permanenti.

1.4 Sostanze ferromagnetiche. Ciclo di isteresi

A differenza delle sostanze paramagnetiche e diamagnetiche, la suscettività χ_m e la permeabilità μ_r dipendono dal valore del campo magnetico e anche dal modo con cui tale valore viene raggiunto. La permeabilità magnetica relativa può arrivare a valori dell'ordine di 10^3 - 10^4 , essa è positiva. Sono sostanze ferromagnetiche il ferro, il cobalto, il nichel e molte leghe a base di ferro. Si suppone che inizialmente il materiale si trovi allo *stato vergine*, cioè non sia mai stato sottoposto a magnetizzazione e che siano nulli tutti i campi. Facendo crescere H, i valori di B e M si dispongono lungo la curva di prima magnetizzazione. Quando H supera il valore di H_m la magnetizzazione resta costante al valore M_{sat} e il campo magnetico cresce linearmente con H, molto più lentamente di prima. Per $M = M_{sat} = \text{costante}$ l'equazione sopra diventa

$$B = \mu_0(H + M_{sat})$$

Questa è una retta con pendenza μ_0 , cioè molto piccola. Per $H > H_m$ il materiale ha raggiunto la saturazione e il valore di M_{sat} si chiama magnetizzazione di saturazione: oltre H_m il campo B cresce solo per effetto dell'aumento della corrente di conduzione, perché il contributo del mezzo ha raggiunto il massimo valore possibile. Non essendo la curva di prima magnetizzazione una retta, le grandezze

$$\mu = \frac{B}{H}$$
$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{\mu}{\mu_0}$$
$$\chi_m = \mu_r - 1$$

non sono costanti, ma funzioni di H. Se dopo aver raggiunto il valore H_m si fa decrescere H, i valori di B e di M si dispongono lungo una nuova curva, al di sopra della curva di prima magnetizzazione, che interseca l'asse delle ordinate ($H = 0$) con il valore B_r o M_r , legati da

$$B_r = \mu_0 M_r$$

si parla di *magnetizzazione residua* e di campo magnetico residuo, a significare che il materiale è magnetizzato anche in assenza di corrente; è diventato cioè un magnete permanente. Per annullare la magnetizzazione bisogna invertire il senso della corrente e far diminuire H fino al valore H_c , detto *campo coercitivo*, in corrispondenza del quale $M = 0$ e $B = 0$. Facendo decrescere ulteriormente H, si nota che oltre $-H_m$ la curva è rettilinea, come oltre H_m , con la stessa pendenza: il materiale ha raggiunto la magnetizzazione di saturazione, ma con verso opposto. Se poi si riporta H al valore H_m le curve si ricongiungono: la curva completa viene chiamata *ciclo di isteresi del materiale* e può essere data sia in termini di B che in termini di M. Se H varia nell'intervallo $H_m, -H_m$ o maggiore si ottiene sempre lo stesso ciclo, altrimenti se si riduce la variabilità si ottengono cicli più stretti. Ad un dato valore di H possono corrispondere infiniti valori di B e perciò di μ_r e χ_m ; da ciò si deduce che la magnetizzazione di una sostanza ferromagnetica dipende dalla storia della sostanza e dal valore di H.

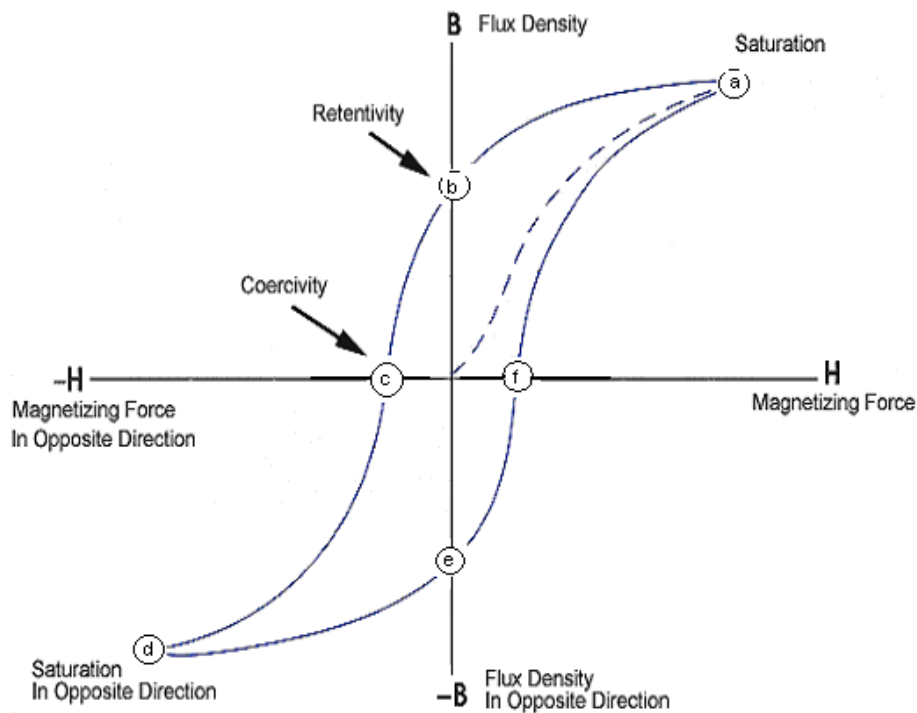


Figura 1.2: Ciclo di isteresi

Il ciclo di isteresi rappresenta il diagramma di stato del materiale: la sua forma dipende dalla composizione della sostanza. Prendendo in considerazione i valori della magnetizzazione residua e del campo coercitivo, si hanno i materiali duri, il cui ciclo di isteresi è largo (M_r e H_c grandi): essi sono adatti per la costruzione di magneti permanenti, sia perché M_r è grande e quasi uguale a M_{sat} , sia perché è difficile smagnetizzarli (H_c grande). Ci sono anche i materiali dolci che hanno un ciclo di isteresi stretto: dato che H_c è piccolo, è facile magnetizzarli e smagnetizzarli; la permeabilità magnetica è quasi costante.

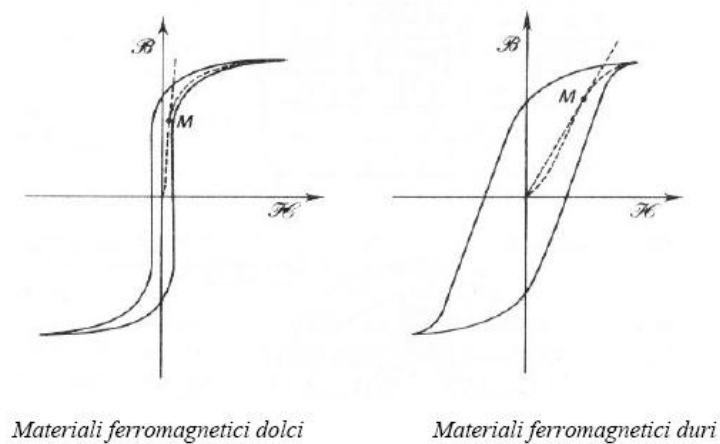


Figura 1.3: Ciclo di isteresi per materiali ferromagnetici dolci e duri

1.5 Parametri che caratterizzano i materiali magnetici

La rimanenza B_r è definita come la densità di flusso magnetico corrispondente ad un'intensità di campo magnetico nulla. Un'alta rimanenza significa che il magnete può sopportare una più alta densità di flusso magnetico nel traferro di un circuito magnetico.

La coercività H_c è il valore dell'intensità del campo di smagnetizzazione necessario per portare la densità di flusso magnetico a zero in un materiale precedentemente magnetizzato. Un'alta coercività significa che un magnete più sottile può resistere al campo di smagnetizzazione.

La saturazione della densità di flusso magnetico B_s e la corrispondente saturazione dell'intensità del campo magnetico H_s . A questo punto l'allineamento di tutti i momenti magnetici è nella direzione del campo magnetico esterno applicato.

La curva di demagnetizzazione o smagnetizzazione intrinseca è la porzione del ciclo di isteresi $B_i = f(H)$ posizionata in alto a sinistra (secondo quadrante, $B > 0$, $H < 0$); la curva di smagnetizzazione intrinseca è la curva che descrive la densità di flusso intrinseca $B_i = B - \mu_0 H$. Per $H = 0$ la densità di flusso intrinseca $B_i = B_r$.

La coercività intrinseca H_{ci} è la forza del campo magnetico richiesta per portare a zero la densità di flusso intrinseca B_i di un materiale magnetico descritto dalla curva $B_i = f(H)$. Per i materiali per i magneti permanenti $H_{ci} > H_c$.

La massima energia magnetica per unità di volume $(BH)_{max}$ rappresenta un fattore di qualità per i magneti permanenti. Un alto valore di questa quantità implica che il flusso magnetico richiesto può essere ottenuto con un più piccolo volume di materiale, facendo così un dispositivo più leggero e composto.

1.6 Massima densità di energia

La densità di energia massima o prodotto di energia è un'importante proprietà che caratterizza un magnete permanente. Dipende dalla rimanenza B_r [Vs/m^2], dalla coercività H_c [kA/m] che meglio descrive la stabilità di demagnetizzazione, dalla permeabilità magnetica e dalla forma rettangolare del ciclo di isteresi. Il valore del prodotto (BH) rappresenta una densità di energia per unità di volume. Genericamente si può affermare che tanto maggiore è il valore di $(BH)_{max}$, tanto minore potrà essere, a parità di rapporti geometrici, il volume di magnete necessario per una determinata applicazione. La ricerca è concentrata per aumentare la coercività regolando la composizione della lega e producendo una microstruttura fine. Un'alta induzione residua può essere raggiunta producendo piccoli cristalli e allineandoli perfettamente paralleli per ottenere una migliore anisotropia. Lo sviluppo della densità di energia $(BH)_{max}$ [kJ/m^3] nel tempo è raffigurato in figura 1.4.

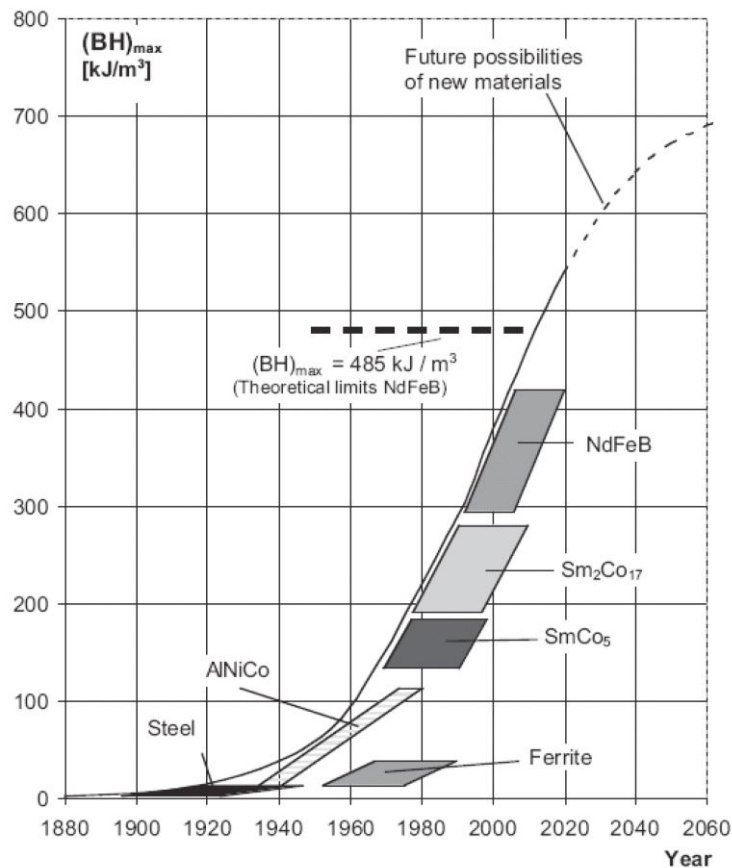


Figura 1.4: Sviluppo dei magneti permanenti e densità di energia

1.7 Anisotropia magnetocristallina e anisotropia nella forma

Con il termine anisotropia si intende la direzione preferenziale, lungo la quale può essere orientato un magnete permanente. Alcuni materiali ne sono dotati e quindi sono detti “anisotropi”. Tale orientamento preferenziale può essere dovuto al processo produttivo oppure alla struttura del materiale magnetico. Perciò, molti materiali per magneti permanenti sono realizzati in modo da aumentare le proprietà lungo un asse preferenziale, perché nella maggior parte delle applicazioni si è interessati a un solo campo generato attraverso il magnete in una direzione particolare. Il modo fondamentale per raggiungere questo è che se la struttura del reticolo cristallino del materiale stesso ha delle direzioni preferenziali per i momenti magnetici, si potrebbero poi formare le basi per ottenere un allineamento netto nel magnete. Questo fatto quindi, è dovuto all'accoppiamento spin-orbita e indica l'influenza che ha il reticolo stesso sulla distribuzione spaziale delle orbite elettroniche. Tale allineamento dei momenti di dipolo magnetico del reticolo viene chiamato **anisotropia magnetocristallina**.

L'**anisotropia nella forma** si manifesta, invece, quando una particella macroscopica o microscopica non è perfettamente sferica, quindi la magnetizzazione non sarà uguale in tutte le direzioni, si avrà cioè un asse preferenziale; questo fatto è dovuto alla presenza di un campo smagnetizzante, che dipende direttamente dalla geometria dell'oggetto ferromagnetico.

2 Materiali per i magneti permanenti

Le leghe magnetiche sono tipicamente descritte dalle loro proprietà quali la rimanenza B_r per i magneti permanenti e la saturazione di polarizzazione J_s per i materiali magnetici morbidi, misurate in [T] o in [Vs/m²] e la coercività H_c data in [A/cm] o in [kOe]. Per i materiali magnetici morbidi la coercività è tenuta più bassa possibile in un intervallo di circa $1 \cdot 10^{-3}$ A/cm per ridurre le perdite del ciclo di isteresi; la coercività nei magneti permanenti può raggiungere valori dell'ordine di 1000 kA/m assicurando così stabilità contro dei campi opposti che si verificano all'interno delle macchine elettriche. In figura 2.1 si può vedere una panoramica delle caratteristiche dei materiali magnetici.

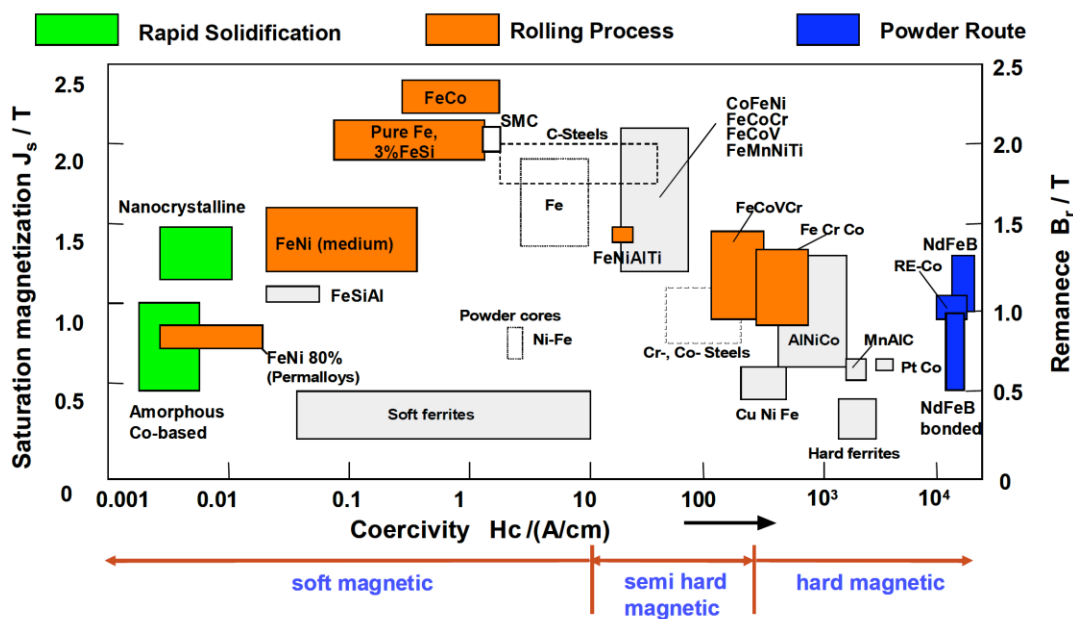


Figura 2.1: Panoramica dei magneti permanenti e leghe

2.1 Alnico

L'alnico è stato sviluppato nei primi anni del 1930. Dopo la seconda guerra mondiale ha sostituito il magnete d'acciaio in molte applicazioni. Per la sua alta induzione e la sua buona resistenza alla smagnetizzazione e alla stabilità, dovuta al suo basso coefficiente di temperatura ($-0.02\%/^{\circ}\text{C}$) l'alnico era diventato il materiale di scelta. Il nome "Alnico" descrive una famiglia di magneti che deriva da una composizione di alluminio, nichel, cobalto e ferro. Ci sono molte variazioni sui costituenti di questa lega, che producono diverse caratteristiche magnetiche. Il passo più critico nel processo dei magneti in alnico è il trattamento termico di questa lega, che è controllato in modo da precipitare una dispersione di particelle magnetiche in una matrice debolmente magnetica. Queste particelle fine sono a forma di lunghe aste sottili, la cui anisotropia nella forma determina la coercività del materiale. Durante il raffreddamento ci sono tre fasi che possono cristallizzare, conosciute come α_1 , α_2 e γ . L'obiettivo è ottenere la fase α_1 , che è una matrice debolmente magnetica di Al-Ni-Fe e particelle di fase α_2 fortemente magnetiche di Co-Fe. L'aspetto della fase γ rovinerà questa formazione, ma dal momento che essa cristallizza a 1000-

1100 °C, l'iniziale raffreddamento in aria da circa 1200 °C a circa 900 °C può sopprimere questa fase. Dopo un ulteriore raffreddamento a circa 600 °C, la fase α si decompone nelle sue fasi α_1 e α_2 . Nella fase finale del trattamento termico, la lega è temprata per 20-30 h tra 550 °C e 650 °C, che accentua la differenza tra la composizione della fase α_1 e α_2 , e permette alle particelle magnetiche di Co-Fe di crescere ancora più allungate. Poiché ogni particella ha una coercività migliorata lungo il suo asse maggiore, il magnete avrà le proprietà magnetiche migliorate in un'unica direzione, se gli assi delle particelle sono allineati. Tale anisotropia è raggiunta applicando un campo magnetico che serve a orientare le particelle durante la loro formazione, cioè mentre la fase α si decompone, si raffredda da 900 °C a 600 °C.

Variando il trattamento termico, può essere raggiunta una vasta gamma di proprietà per i magneti in alnico, ma queste dipendono se la lega originale è stata preparata per fusione o per sinterizzazione. Le materie prime sono fuse in un forno ad induzione e poi gettate in uno stampo di sabbia e resina che approssimativamente ha la forma del magnete finale. La fusione deve fornire un rapido raffreddamento intorno a 250 °C/min per garantire che i componenti non si separino nella miscela. Un miglioramento delle proprietà direzionali dell'alnico anisotropo può essere raggiunto producendo una struttura allungata dei cristalli nel processo stesso di fusione. Siccome la fusione non è un processo conveniente per i magneti piccoli, vengono utilizzate tecniche di metallurgia delle polveri, come alternativa per la produzione della lega alnico. Le materie prime costituenti sono in forma di polvere e a causa del suo basso punto di fusione, Al è di solito preparato come una lega con Fe, Ni o Co. Le polveri sono mescolate e poi pressate in uno stampo di forma desiderata permettendo una contrazione del 10% durante la sinterizzazione. Questa viene effettuata a una temperatura appena sotto il punto di fusione della lega. Le densità finali dei magneti sinterizzati in alnico sono leggermente inferiori a quelli realizzati con leghe fuse, in particolare si nota una differenza nelle proprietà magnetiche alquanto inferiori. Il costo delle attrezzature per i materiali sinterizzati è anche più elevato, ma essi presentano una struttura più omogenea a grana fine, che li rende meccanicamente più forti dei magneti in alnico fusi.

Le caratteristiche magnetiche di questi magneti sono affette non solo da processi variabili ma anche da piccoli cambiamenti nella loro composizione. Il cobalto non era incluso nei primi materiali Al-Ni-Fe, ma si è scoperto che il cobalto aumenta la magnetizzazione di saturazione e la stabilità della temperatura di questi magneti. Una piccola percentuale di rame viene aggiunta alla maggior parte di composizioni Al-Ni-Fe-Co; questa migliora le proprietà magnetiche, ma deve essere utilizzato insieme al Co perché esso accelera il processo di precipitazione. È anche possibile aggiungere circa 5-8% di Titanio che riduce la rimanenza, ma aumenta la coercività. L'alnico 8 è il più comune Al-Ni-Fe-Co-Ti magnete in uso corrente.

I magneti in alnico hanno una rimanenza B_r ed un prodotto di energia elevato, unitamente a un basso coefficiente di temperatura, che li rende particolarmente adatti ad applicazioni in strumenti di misura ed altre apparecchiature di alta precisione e prestazione. Tra i pregi della lega alnico è l'alta induzione residua, le interessanti proprietà meccaniche e la temperatura di Curie intorno a 800 °C. La presenza di cobalto rende questo tipo di magnete costoso. L'alta temperatura di esercizio (550 °C) rende l'alnico adatto nel settore automobilistico e aerospaziale. Altre

applicazioni in cui l'alnico viene usato sono sensori di sicurezza, frizioni, freni, altoparlanti, sistemi di sicurezza. L'alnico è prodotto in molti gradi per soddisfare le varie applicazioni, dall'alnico 1 all'alnico 12, ma i più popolari sono l'alnico 2, 5 e 8. In confronto ai materiali più recenti quali NdFeB e SmCo la coercività dell'alnico è più bassa; questi hanno sostituito l'alnico perché caratterizzati da una migliore resistenza alla smagnetizzazione oltre un limite di temperatura elevato e dalla stabilità della temperatura.



Figura 2.2: Magneti in alnico

2.2 Ferrite

I magneti in ferrite sono prodotti usando ossidi di ferro e carbonato di stronzio e di bario. Vennero inventati nel 1950. La ferrite con lo stronzio ha una più alta forza coercitiva rispetto la ferrite mescolata al bario. La diffusione della ferrite ceramica è utilizzata nei motori elettrici con anisotropia radiale. Può essere ottenuta anche con caratteristiche magnetiche isotrope, quindi magnetizzabile in tutte le direzioni, diminuendo in questo caso le proprietà magnetiche di coercività e massima energia. Attualmente viene utilizzata per i costi ridotti; i magneti in ferrite, denominati talvolta magneti ceramici, per il loro processo di produzione, sono la classe di materiali per magneti permanenti meno costosa. La ferrite può essere usata a temperature piuttosto elevate, circa 300 °C, grazie all'alta temperatura di Curie. La materia prima, l'ossido di ferro, è mescolata con stronzio e bario e ridotta in polvere fina. Quest'ultima viene mescolata con un legante ceramico e i magneti sono prodotti tramite la tecnica di stampaggio a compressione o di estrusione, la quale è poi seguita da un processo di sinterizzazione, che avviene a 1300 °C per alcune ore. Il processo di lavorazione determina nel prodotto la presenza di imperfezioni come cricche, porosità, trucioli; queste imperfezioni non interferiscono nelle prestazioni del magnete. Per migliorare le prestazioni del magnete in ceramica, la ferrite può essere influenzata da un campo magnetico durante il processo di pressatura. La polarizzazione induce una direzione

preferenziale della magnetizzazione all'interno del magnete, riducendo le sue prestazioni nelle altre direzioni. I magneti in ceramica sono disponibili sia orientati (anisotropi) sia non orientati (isotropi). A causa delle sue proprietà magnetiche inferiori, il grado isotropo della ferrite è tipicamente utilizzato dove sono richiesti gradi complessi di magnetizzazione. I magneti in ceramica sono intrinsecamente fragili, quindi è raccomandato di non utilizzarli come elementi strutturali in qualsiasi applicazione e di maneggiarli con cura per evitare scheggiature. La loro stabilità termica è la più povera rispetto alle altre famiglie di magneti, ma essi possono essere utilizzati in ambienti fino a 300 °C.

La grande novità dei magneti a base di ferriti dure, rispetto ai magneti che li precedettero (magneti in alnico), non è la rimanenza B_r o il prodotto di energia (BH), bensì la presenza di un comportamento reversibile nel secondo quadrante del ciclo di isteresi: è in tale quadrante dove i magneti lavorano in un dispositivo elettromagnetico, essendo la zona dove il materiale può fornire energia (BH è negativo). Avere un comportamento reversibile in tale zona significa che il magnete in ferrite può essere smagnetizzato e rimagnetizzato senza che perda le sue proprietà magnetiche. Altra peculiarità delle ferriti dure è la resistenza all'acqua, trattandosi di un materiale derivato direttamente da ossidi. Il suo comportamento termico presenta inoltre un comportamento anomalo rispetto agli altri magneti: infatti la sua forza coercitiva tende a salire all'aumentare della temperatura fino a circa 180 °C, al contrario di tutti gli altri materiali dove H_c diminuisce costantemente. Le principali applicazioni sono motori e generatori a basso costo, pompe elettriche, mandrini magnetici, sistemi di sollevamento, strumentazione di misura, sensori, altoparlanti, giocattoli.



Figura 2.3: Magneti in ferrite ceramica

2.2.1 Ferrite plastica

Le ferriti plastiche sono ottenute miscelando matrici plastiche e ossidi di ferrite. Rispetto alle ferriti ceramiche, il processo produttivo consente l'ottenimento di una grande varietà di geometrie diverse, ottenibili mediante i processi di stampaggio a iniezione o compressione; non è necessario il processo di finitura. Uno dei vantaggi è la minimizzazione dei processi di assemblaggio dei componenti mediante l'utilizzo diretto di parti finite già magnetizzate nella configurazione ottimale. Le parti possono essere stampate con un'alta precisione, riducendo le tolleranze del dispositivo finito. Il sovrastampaggio a cui si presta questo tipo di magneti, consente di evitare ulteriori processi produttivi e di migliorare l'accuratezza dell'assemblaggio finale. La grande resistenza all'ossidazione e all'attacco chimico, rende questa tipologia di magneti particolarmente adatti ad applicazioni dove sia frequente o continuo il contatto con l'acqua o liquidi aggressivi. Il comportamento termico è buono, resiste a temperature medio alte (superiori a 120 °C) e non subisce una diminuzione della forza coercitiva H_c al crescere della temperatura.



Figura 2.4: Magneti in ferrite plastica

2.2.2 Gomma magnetica in ferrite

La gomma magnetica si ottiene miscelando ossidi di ferrite con matrici di gomma sintetica. Il prodotto presenta una notevole flessibilità e robustezza meccanica e si presta ad essere utilizzato in ogni tipo di ambiente. Si possono progettare componenti dalle forme geometriche più diverse. L'estrema lavorabilità e possibilità di automazione rende unica questa tipologia di magneti: possono essere tagliati, incollati a legno o a metallo, disposti su superfici curve. Vengono utilizzati in sistemi di tenuta, sollevamento, gadget, magnetoterapia, sensori, motori e generatori.



Figura 2.5: Magneti in gomma magnetica in ferrite

2.3 Terre rare

Le terre rare sono i materiali che servono per produrre magneti permanenti ad elevate prestazioni, in particolare comprendono il samario-cobalto (SmCo) e il neodimio-ferro-boro (NdFeB). Ai giorni nostri, per la produzione industriale di magneti permanenti a terre rare viene usata la tecnica della polvere metallurgica. Questa tecnologia di lavorazione è la stessa per tutti i magneti basati su terre rare. Le leghe sono prodotte per fusione; il materiale viene poi ridotto per frantumazione e macinazione a singoli cristalli di polvere, le cui particelle hanno dimensioni inferiori ai 10 μ m. Per ottenere un magnete permanente anisotropo con il più alto valore possibile $(BH)_{max}$, le polveri sono allineate in un campo magnetico esterno, pressate e densificate a circa la densità teorica di sinterizzazione. Il metodo più economico per la produzione di parti sagomate come blocchi o archi sagomati è uno stampo in cui le polveri vengono pressate nella forma desiderata. La sinterizzazione e il trattamento termico che segue, vengono eseguiti sotto vuoto o in atmosfera di gas inerte. Le temperature di sinterizzazione sono in un intervallo 1000-1200 °C, a seconda del materiale dei magneti permanenti. Durante la ricottura dopo la sinterizzazione, viene ottimizzata la microstruttura del materiale, la quale aumenta la coercività intrinseca H_{ci} dei magneti. Dopo la lavorazione per ottenere tolleranze dimensionali, l'ultimo passo nel processo di produzione è la magnetizzazione. I campi di magnetizzazione per raggiungere la saturazione completa sono nell'intervallo 1000-4000 kA/m, a seconda della composizione del materiale.

2.3.1 Samario-cobalto

Il magnete SmCo è stato il primo magnete commerciale basato su terre rare. Questo magnete si tratta di un composto intermetallico tra la terra rara Samario e il metallo di transizione Cobalto: nato alla fine degli anni 60, non ha avuto successo come l'altro importante magnete in terre rare, il Neodimio Ferro Boro, a causa dell'elevato costo del cobalto e del suo valore strategico. Il samario-cobalto è ancora considerato il materiale più adatto per applicazioni ad alta prestazione. La sua principale caratteristica è l'applicazione ad alte temperature, fino a 350 °C. Gli atomi degli elementi delle terre rare mostrano gusci incompleti di elettroni che inducono ferromagnetismo. È

anche noto che essi tendono a formare composti intermetallici con metalli di transizione come Fe, Ni o Co, e a causa della sua struttura cristallina esagonale, il cobalto era inizialmente utilizzato per fornire composti con le più alte anisotropie.

Il trattamento dei magneti in terre rare e cobalto consente di formare vari composti intermetallici, tra cui RCo_5 , R_2Co_{17} , R_2Co_7 , R_5Co_{19} o RCO_3 (dove R rappresenta uno degli elementi delle terre rare). RCO_5 era il primo composto da studiare, alcune prime previsioni teoriche hanno indicato che valori molto alti per il prodotto di energia massimo si potrebbero aspettare dalle terre rare come La, Ce, Pr, Sm e Y. Parte della difficoltà nella realizzazione di questi magneti sorse dall'alta reattività delle terre rare. Sono possibili vari composti di samario-cobalto: SmCo_5 e $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Ciascuna di queste due varietà presenta un differente comportamento magnetico: nucleazione in SmCo_5 , "pinning" in $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Il $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ha prestazioni maggiori, ma richiede un'intensità di magnetizzazione superiore rispetto al SmCo_5 , 4000 kA/m contro 2000 kA/m. Il SmCo presenta due vantaggi non trascurabili nei confronti del NdFeB: la resistenza alla corrosione e l'ottimo comportamento termico. La temperatura di Curie si attesta intorno ai 750 °C per il SmCo_5 e 850 °C per il $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$; inoltre le proprietà magnetiche degradano lentamente al crescere della temperatura.

I magneti in SmCo sono utilizzati in particolare in ambito militare, aerospaziale ed elettromedicale: sono preferiti generalmente quando nei dispositivi sussistono problematiche termiche o di ossidazione. Generalmente i magneti in samario-cobalto non hanno bisogno né di un rivestimento né di placcatura dopo il trattamento; talvolta se la pulizia è un problema, questi magneti vengono rivestiti da delle resine: in questo caso il rivestimento agisce come sigillante. Alcune volte i magneti in samario-cobalto sono rivestiti in nichel. Le applicazioni industriali e scientifiche sono simili a quelle del NdFeB: sensori, altoparlanti, motori elettrici, strumenti di misura, interruttori.

Il SmCo, come già detto, ha proprietà magnetiche generalmente inferiori al NdFeB. La caratteristica più importante è la possibilità che offre nel lavorare a temperature elevate, oltre i 300 °C, e di avere poche perdite delle proprietà magnetiche quando la temperatura aumenta. Il SmCo è il materiale più costoso per i magneti permanenti. A causa del suo alto prodotto di energia, da 127 kJ/m³ a 263 kJ/m³, ha raggiunto un grande successo commerciale diminuendo il volume richiesto del materiale del magnete per una determinata applicazione. Il SmCo può però essere soggetto a scheggiatura.



Figura 2.6: Magneti in samario-cobalto

2.3.2 Neodimio ferro boro

I magneti in neodimio ferro boro sono i più potenti magneti permanenti commercializzati oggi, con il massimo prodotto di energia, da 210 kJ/m^3 a 420 kJ/m^3 . Il NdFeB è la terza generazione di magneti permanenti sviluppata nel 1980. È una combinazione di un'elevata rimanenza e coercività e dispone di una vasta gamma di gradi, dimensioni e forme. La sua composizione generale è $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ e ha le più alte proprietà dei magneti, permettendo un incredibile rapporto induzione magnetica/dimensione. Con le sue eccellenti caratteristiche magnetiche, abbondanti materie prime e costi relativamente bassi, il NdFeB offre una maggior flessibilità nella sostituzione dei tradizionali materiali per i magneti permanenti come l'alnico e il SmCo per raggiungere un'alta efficienza, basso costo e dispositivi più compatti. Questa tipologia di magneti permanenti, nell'ultimo decennio, è stata scelta per svariate applicazioni grazie alle eccellenti proprietà magnetiche e al miglioramento del comportamento in funzione della temperatura: è comunemente usato oltre i $230 \text{ }^\circ\text{C}$. In termini di massima densità di energia, esso permette di raggiungere i più alti valori nei magneti che oggi si commercializzano. Rispetto al samario-cobalto, introduce migliori proprietà da un punto di vista meccanico, ma ha una più bassa temperatura di Curie. L'uso di magneti ad anello di NdFeB con magnetizzazione radiale permette di evitare segmenti multipli di NdFeB per creare una disposizione circolare, per esempio quando è necessario un campo radiale nel motore elettrico a magneti permanenti. La rimanenza e la coercività di questo tipo di magneti sono paragonabili a quelli ottenuti nei magneti con una anisotropia assiale. Sebbene sinterizzato il magnete in NdFeB è meccanicamente più forte del magnete in SmCo e meno fragile di altri magneti, anche se non dovrebbe essere utilizzato come componente strutturale.

I magneti in NdFeB sono soggetti all'ossidazione rispetto ad altre leghe magnetiche. Questi problemi sono stati risolti grazie a metodi di protezione superficiale. Questi magneti hanno un grande potenziale per migliorare le prestazioni in rapporto al costo per molte applicazioni. Per questa ragione hanno un maggior impatto sullo sviluppo e sulle applicazioni di apparecchiature a

magneti permanenti nel futuro. Questi magneti sono usati nei motori elettrici, attuatori e motori lineari, accoppiamenti magnetici e sensori.



Figura 2.7: Magneti in neodimio-ferro-boro

2.3.3 Neodimio con leganti plastici

I magneti ottenuti miscelando matrici leganti plastiche e la polvere di magneti di Neodimio Ferro Boro, uniscono elevate prestazioni dei magneti a base di terre rare con le potenzialità dei magneti plastici. I processi per ottenere NdFeB in polvere da miscelare e stampare a fluidificanti plastici hanno avuto un grande successo negli ultimi anni; questo grazie alla varietà di diverse forme e geometrie che si possono ottenere mediante tecniche di stampaggio a iniezione o compressione e al conseguente vantaggio di poter minimizzare i processi di assemblaggio dei componenti, attraverso l'utilizzo di parti finite magnetizzate, come anelli o altri sistemi. Le parti possono essere stampate con alta precisione, riducendo quindi le tolleranze del dispositivo. Il sovrastampaggio consente di migliorare l'accuratezza dimensionale sull'assemblaggio finale. La massima temperatura a cui può essere sottoposto questo tipo di magneti è superiore ai 150 °C, consentendo di soddisfare la maggior parte delle richieste che arrivano dal settore dell'automazione, sensoristica, sistema di misura. Le principali applicazioni di questi magneti sono i motori elettrici, nei sistemi con sensori Hall, negli accoppiamenti magnetici.



Figura 2.8: Magneti in neodimio con leganti plastici

2.3.4 Gomma magnetica in NdFeB

Questa tipologia di magneti unisce la maggiore disponibilità di densità di energia delle terre rare con la flessibilità di utilizzo e l'estrema lavorabilità delle gomme magnetiche. Il Neorub si ottiene miscelando neodimio-ferro-boro con gomma sintetica: questo prodotto è un'alternativa alle gomme magnetiche su base ferrite, grazie alle loro superiori prestazioni. Questi magneti sono utilizzati in sistemi di sollevamento, magnetoterapia, gadget, motori e sensori.



Figura 2.9: Magneti in gomma magnetica in NdFeB

2.4 Mercato

Oggi per la produzione su vasta scala i prezzi dei magneti in NdFeB, a seconda del grado, sono circa 55 \$ per kg. Questo è circa il 60-70% del costo dei magneti in SmCo. Assumendo costanti i prezzi delle materie prime, si prevede che con la crescente produzione e con i costi di fabbricazione decrescenti, i prezzi scenderanno. Si può vedere una ripartizione delle vendite di magneti in terre rare secondo un determinato campo di applicazione in figura 2.10.

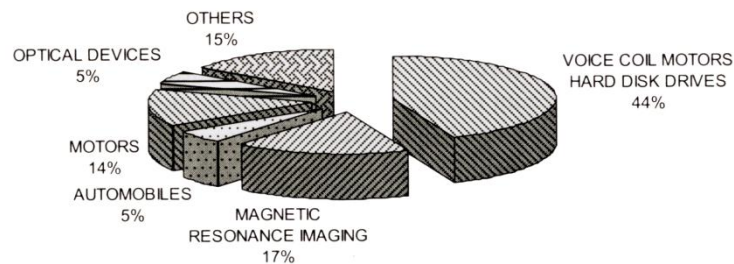


Figura 2.10: Campi di applicazione dei magneti in terre rare

La più importante area di applicazione dei magneti in terre rare con circa il 40-45% delle vendite sono bobine per i motori (VCMs) e hard disk per computer (HDDs). Altre maggiori aree di applicazione sono i motori elettrici, dispositivi ottici, risonanza magnetica, automobili, dispositivi acustici e dispositivi magnetomeccanici (cuscinetti magnetici, separatori magnetici, giunti). I motori a magneti permanenti sono utilizzati in un'ampia gamma di potenza da pochi mW a 1MW, comprendendo una grande varietà di applicazioni, dai motori passo passo per gli orologi da polso ad azionamenti per macchine utensili ai motori sincroni. Le elevate prestazioni dei magneti in terre rare hanno sostituito con successo i magneti in alnico e in ferrite in tutte quelle applicazioni in cui è richiesta l'elevata densità di potenza, grande efficienza e miglioramento delle prestazioni dinamiche. Un confronto del rapporto coppia massa e accelerazione rotante di diversi tipi di servomotori in figura 2.11, mostra che la coppia e l'accelerazione dei servomotori con magneti permanenti in terre rare possono aumentare anche più del doppio.

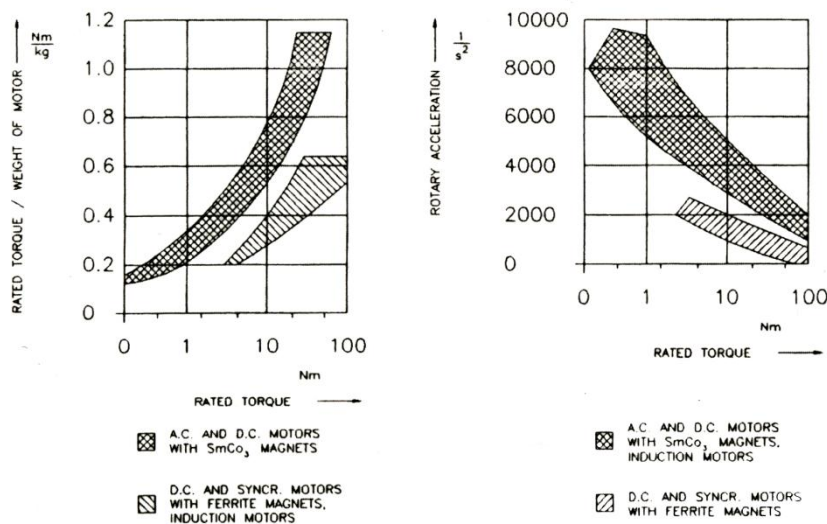


Figura 2.11: Rapporto coppia-massa e accelerazione di diversi diti di servo motori

2.5 Terre rare, materiali strategici

Il termine “terre rare” definisce 17 elementi (scandio, ittrio e i 15 lantanoidi). Il neodimio e il samario sono stati scoperti alla fine del Settecento come materiali ossidati. Si tratta di metalli e non sono effettivamente rari, però sono sparsi nel mondo, mentre sono rari i giacimenti abbastanza grandi e concentrati da consentire l’attività estrattiva. La Cina, che soddisfa il 97% del fabbisogno mondiale di terre rare e possiede il 48% delle riserve mondiali, nel 2010 ha interrotto per un periodo di tempo le spedizioni in Giappone a causa di un incidente diplomatico. Si prevede che nel prossimo decennio la Cina ridurrà le esportazioni per proteggere le forniture delle proprie industrie in rapida espansione, che già oggi consumano il 60% della produzione di terre rare del paese. La paura di future carenze ha fatto salire i prezzi alle stelle di questi elementi. Il motivo di questo predominio cinese è che la capitale mondiale delle terre rare è un città della Mongolia Interna, Baotou (dove si trova circa l’80% delle terre rare della Cina) e spesso le miniere di terre rare contengono elementi radioattivi come l’uranio e il torio, e i giacimenti producono ogni anno milioni di tonnellate di acque di scolo, in gran parte acide, radioattive e quasi del tutto non trattate. I Paesi Occidentali non potrebbero mai ospitare elementi così critici dal punto di vista ambientale.

3 Stabilità termica

3.1 Introduzione

È importante capire la natura dei cambiamenti che avvengono all'interno dei magneti, in modo tale che qualsiasi degrado delle proprietà magnetiche nella curva di smagnetizzazione possano essere valutate in fase di progettazione. Possono esserci effetti che si traducono in un cambiamento permanente nella curva di smagnetizzazione, che persistono anche se il magnete è completamente rimagnetizzato. Considerando i magneti in alnico, subiscono una segregazione delle fasi durante il trattamento termico tra 550 e 650 °C. Se questi magneti sono successivamente esposti a temperature superiori ai 500 °C, la composizione delle fasi verrà alterata. La curva di smagnetizzazione originale non può essere recuperata da una magnetizzazione, ma può essere recuperata con un processo di ri-tempra. I magneti in ferrite sinterizzata e in terre rare non subiscono cambiamenti permanenti finché non raggiungono i 1000 °C, a causa delle loro alte temperature di sinterizzazione, ma questi materiali hanno altri limiti alle temperature di esercizio, che sono sotto tale temperatura. Tutti i tipi di magneti in terre rare sono soggetti all'ossidazione, che causa un cambiamento metallurgico permanente nella loro struttura. Ci possono essere anche cambiamenti irreversibili che sono quelli che persistono dopo la causa che li ha provocati, ma la curva di smagnetizzazione originale può essere ripristinata da una magnetizzazione completa del materiale. La principale causa dei cambiamenti nella curva di smagnetizzazione sono gli sbalzi termici. Questi possono provocare un cambiamento reversibile nella curva attraverso l'agitazione dei momenti magnetici nei domini. L'effetto riduce la saturazione magnetica del magnete finché la temperatura originale non viene ripristinata.

3.2 Temperatura di Curie

Una proprietà fondamentale dei materiali ferromagnetici è che per ognuno di essi esiste una temperatura critica T_C , detta *temperatura di Curie*, al di sopra della quale il materiale diventa paramagnetico, con suscettività che segue la legge

$$\chi_m = \frac{C\rho}{T - T_C}$$

nota come seconda legge di Curie; ρ è la densità della sostanza e C una costante, detta costante di Curie. Il nome Curie deriva da M.me Curie, fisico e chimico dei primi del '900. La magnetizzazione spontanea non avviene al di sopra di una certa temperatura, appunto la temperatura di Curie. Chiaramente sarebbe auspicabile avere T_C molto maggiore la temperatura massima di utilizzo del materiale, tuttavia alcuni dei principali elementi usati nei magneti permanenti hanno valori piuttosto bassi di T_C : 1120 °C per Co, 770 °C per Fe, 358 °C per Ni. Il Fe è l'elemento più popolare ed economico, ma la ferrite ceramica $BaFe_{12}O_{19}$ ha un valore di T_C solo di 450 °C. I magneti in $Nd_2Fe_{14}B$ potrebbero avere T_C più bassa di 300 °C, perciò per aumentare tale valore si può sostituire per alcuni dei Fe del Co.

3.3 Curve di smagnetizzazione

Per valutare un magnete permanente ci si basa sulla porzione del suo ciclo di isteresi che si trova nel secondo quadrante, chiamata appunto curva di smagnetizzazione. In questo quadrante il valore del campo H è negativo. Le principali proprietà deducibili da questa curva sono la rimanenza B_r , la forza coercitiva H_c e il prodotto massimo di energia $(BH)_{max}$. Un magnete permanente esposto ad un'elevata temperatura può subire una riduzione della sua effettiva magnetizzazione in relazione alla sua saturazione. Il fatto che questa riduzione sia reversibile o irreversibile dipende da altri fattori, in particolare la forza di magnetizzazione nel materiale. Quando questa raggiunge il livello di coercività intrinseca, $-H_{ci}$, la magnetizzazione cambia nella direzione opposta, un cambiamento irreversibile, dal quale la condizione originale può essere ripristinata grazie ad una rimagnetizzazione con un campo superiore $+H_{ci}$. A condizione che la forza di magnetizzazione sia contenuta nell'intervallo $-H_{ci} < H < +H_{ci}$, ci possono essere eventuali modifiche reversibili nella magnetizzazione. La coercività intrinseca per un materiale con anisotropia magnetocristallina è data dall'equazione

$$H_{ci} = \frac{2K_1}{\mu_0 M_{sat}}$$

dove K_1 è la costante cristallografica del materiale. Quando la temperatura aumenta e la magnetizzazione efficace si riduce, l'equazione sopra mostra che H_{ci} aumenta. I magneti reali hanno delle transizioni graduali, si dice che ci sia un "ginocchio" nella curva di smagnetizzazione. Per ogni materiale può essere tracciata una famiglia di curve a temperature diverse. Le ferriti ceramiche basano il loro magnetismo permanente sulla anisotropia magnetocristallina; un insieme tipico di curve di smagnetizzazione per la ceramica 8 è mostrato in figura 3.1.

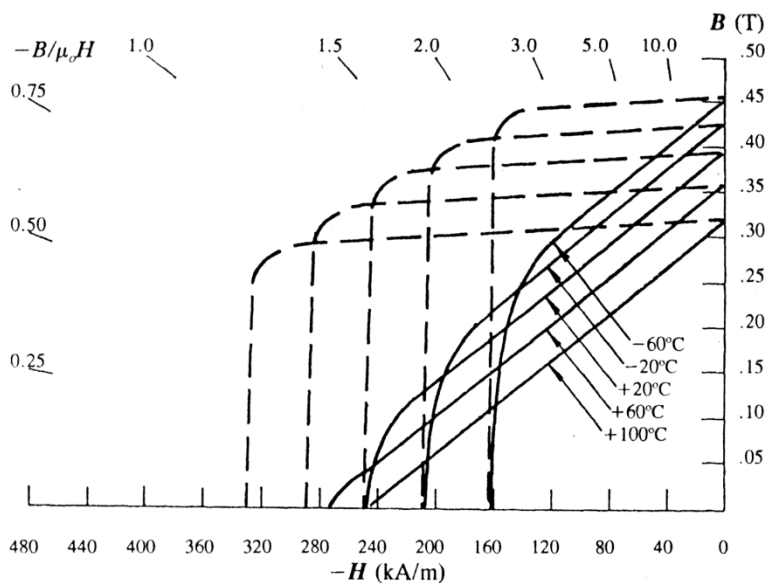


Figura 3.1: Curve di smagnetizzazione della ceramica 8 alle varie temperature

La ceramica 8 è un magnete anisotropo sinterizzato con un prodotto massimo di energia di circa 28 kJ/m^3 . Ad una data temperatura, se $|H_{ci}| > M_{\text{sat}}$, la curva è lineare e il ginocchio a $-H_{ci}$ viene spostato nel terzo quadrante del ciclo di isteresi. Questa condizione si verifica quando si è al di sopra della temperatura ambiente. Quando esso si raffredda, la magnetizzazione viene ripristinata con un aumento della rimanenza B_r e con una riduzione di H_{ci} . Per questo materiale avviene una transizione a temperatura ambiente, sotto la quale $|H_{ci}| < M_{\text{sat}}$ e il ginocchio a $-H_{ci}$ si muove nel secondo quadrante del ciclo di isteresi. Questa sequenza è peculiare nei materiali dominati dalla anisotropia magnetocristallina, come le ferriti ceramiche. La figura 3.1 mostra che il funzionamento di un magnete oltre il ginocchio di una curva di smagnetizzazione rappresenta un'inversione di magnetizzazione all'interno del materiale, cioè un cambiamento irreversibile. Considerando un magnete la cui condizione operativa varia solo in base alla sua temperatura, si può supporre che il magnete subisca un campo interno uniforme, che si può esprimere definendo il "fattore di smagnetizzazione" N ($0 < N < 1$) come segue:

$$H_i = H_0 - NM$$

$$B_i = \mu_0 M(1 - N)$$

Il fattore di smagnetizzazione dipende dall'orientamento della magnetizzazione attraverso un ellissoide e può essere calcolato come N_a e N_b lungo i suoi assi maggiore e minore rispettivamente. Il punto operativo di un magnete sulla sua curva deve essere definito da una linea di carico, la cui pendenza deriva da queste equazioni

$$\frac{B_i}{\mu_0 H_i} = \frac{M(1 - N)}{H_0 - NM}$$

Il fattore di demagnetizzazione N dipende solo dalle dimensioni del magnete ed è una costante come lo è il campo magnetico esterno H_0 . La pendenza della retta della linea di carico non cambia a condizione che M sia costante, e ci sarà per il magnete un unico punto operativo definito dalla sua intercetta con la curva di smagnetizzazione. Alcune curve sono ridisegnate in figura 3.2 con un esempio di linea di carico $B_i/\mu_0 H_i$ circa uguale a -1 . A $+20^\circ \text{C}$ il punto operativo **a** è al di sopra del ginocchio. Quando la temperatura scende a -20°C , il magnete sposta il suo punto operativo in **b**, ancora oltre il ginocchio della curva. Ora M è leggermente più alto; viene ignorato il piccolo cambiamento sulla pendenza della linea di carico. Il funzionamento continuo tra $+20^\circ \text{C}$ e -20°C è reversibile, sebbene la densità di flusso nel magnete aumenta oltre questo intervallo, mentre la temperatura scende. Se la temperatura scende a -60°C , il punto operativo si sposta in **c**, che è appena sotto il ginocchio della curva a -60°C . C'è una diminuzione della magnetizzazione e del flusso di densità, e questo cambiamento è ora irreversibile.

Come si può notare dalla figura 3.2 un leggero aumento del campo di magnetizzazione $-H_i$ determinerà una diminuzione di M . I punti operativi **d** a -20°C ed **e** a $+20^\circ \text{C}$ si trovano in prossimità delle intersezioni della linea di carico con le curve di smagnetizzazione minori all'interno del ciclo B-H. Nell'intervallo di temperatura -60°C , $+20^\circ \text{C}$, il funzionamento sarà ora reversibile e il magnete si può considerare stabilizzato a un valore di energia ridotto.

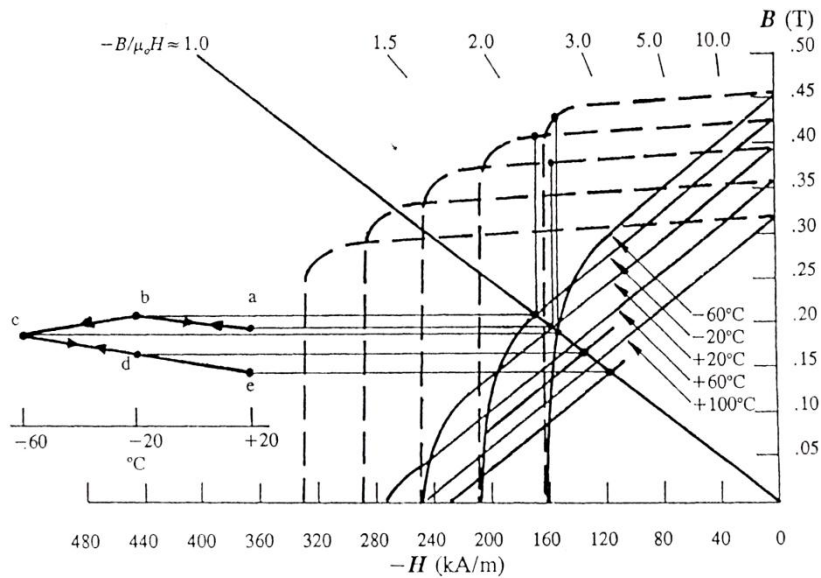


Figura 3.2: Variazione di funzionamento con la temperatura per i magneti in ceramica 8

I cambiamenti che avvengono nel magnete sono anche dipendenti dalla sua anisotropia e le sue dimensioni possono essere usate per controllare le escursioni del punto operativo con la temperatura. Un parametro da prendere in considerazione è il rapporto L/D , il quale è applicato a un disco circolare di diametro D , che è magnetizzato lungo la sua lunghezza L . Per un'asta lunga e sottile, magnetizzata lungo il suo asse maggiore, $L/D \rightarrow \infty$, il fattore di smagnetizzazione N è circa pari a 0 e la pendenza della linea di carico aumenta secondo l'equazione

$$\frac{B_i}{\mu_0 H_i} = \frac{M}{H_0}$$

Nel caso di un magnete in ceramica 8 tra -60°C e $+20^\circ\text{C}$, la figura 3.2 mostra che un aumento sufficiente della pendenza della linea di carico può convertire un cambiamento irreversibile in uno reversibile nei limiti di temperatura. L'equazione:

$$B_i = \mu_0 M(1 - N)$$

mostra che N circa pari a 0 è il limite nel quale il campo di auto-smagnetizzazione è assente e la magnetizzazione spontanea esiste più facilmente. Dall'altra parte c'è un forte campo di auto-smagnetizzazione che impedisce la magnetizzazione spontanea, quando N è circa pari a 1 ($L/D \rightarrow 0$). Per ogni materiale esiste un rapporto L/D critico, sotto il quale i cambiamenti reversibili, oltre un dato intervallo di temperatura, diventeranno irreversibili. Si può costruire un grafico che illustra la dipendenza dalla temperatura del flusso magnetico alle varie condizioni operative, ognuna caratterizzata da un'unica pendenza della linea di carico $B_i/\mu_0 H_i$. Le curve in figura 3.3 indicano l'inizio dell'operazione irreversibile a soglie di temperatura progressivamente inferiori, $B_i/\mu_0 H_i$ aumenta sempre di più.

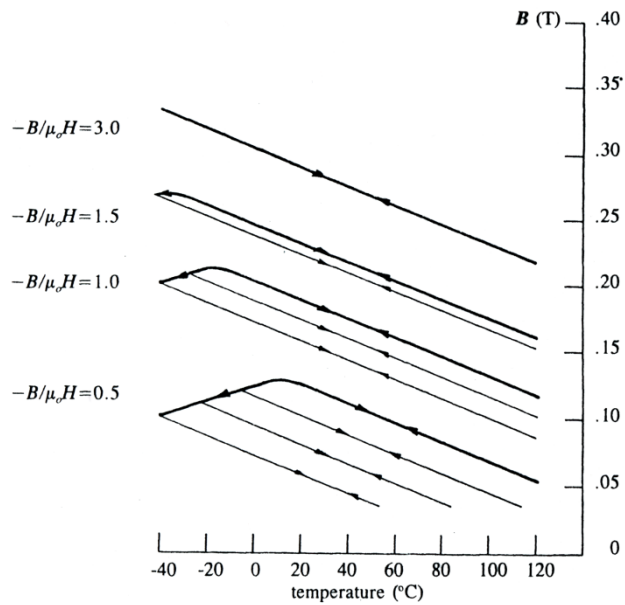


Figura 3.3: Dipendenza dalla temperatura della ceramica 8 con le linee di carico alle varie pendenze

La coercività intrinseca dei magneti in alnico è dominata invece da una anisotropia nella forma, la quale è esprimibile come funzione di N_a e N_b , dove N_a è il fattore di smagnetizzazione lungo l'asse maggiore di un ellissoide e N_b è quello lungo l'asse minore dello stesso ellissoide come si vede in figura 3.4.

$$H_{ci} = M_{sat}(N_b - N_a)$$

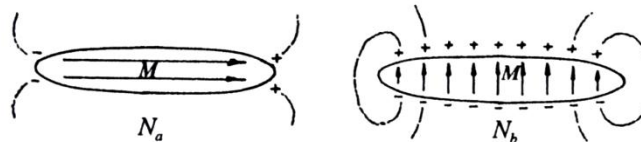


Figura 3.4: Fattori di demagnetizzazione in un ellissoide N_a e N_b

Come la magnetizzazione efficace diminuisce con l'aumentare della temperatura, anche H_{ci} diminuisce a causa della sua anisotropia nella forma. Determinare la dipendenza dalla temperatura dei magneti in alnico è più complicata di quelli in ferrite. Le caratteristiche di questi magneti dipendono dai costituenti della lega; il cobalto, per esempio, migliora l'anisotropia. Le curve di smagnetizzazione dell'alnico 5 sono mostrate in figura 3.5, dalla quale la dipendenza dalla temperatura del flusso magnetico può essere derivata come prima. Poiché i magneti in alnico hanno $|H_{ci}| < M_{sat}$, si impiegano per più alti valori della pendenza della linea di carico rispetto alle ferriti.

Confrontando la figura 3.6 con la figura 3.3 la percentuale di variazione nel flusso con la temperatura è più piccola nei materiali in alnico. I due grafici indicano che, per un particolare materiale, è possibile assegnare un valore specifico per la variazione percentuale reversibile del flusso magnetico per unità di variazione di temperatura, a prescindere dalla temperatura iniziale di

escursione o dalla forma del magnete, cioè la pendenza della linea di carico. Questo parametro dei magneti permanenti è chiamato *coefficiente reversibile di temperatura* α , avente valori di circa $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ per la ceramica 8 e $-0.02\%/^{\circ}\text{C}$ per l'alnico 5. Anche se sinterizzati i magneti in ferrite non subiscono cambiamenti permanenti fino a che non raggiungono i 1000°C , la magnetizzazione spontanea non esiste più alla T_C di 450°C , un cambiamento che si identifica come irreversibile. Ci sono alcune temperature $< T_C$ oltre le quali si verifica una mancanza di magnetizzazione, e il recupero totale si può raggiungere solo ritornando a temperature più basse e da una rimagnetizzazione completa. Ciò con i magneti in alnico è diverso, anche se hanno un'alta temperatura di Curie nell'intervallo $700\text{-}850^{\circ}\text{C}$. Ci sono dei cambiamenti permanenti nella composizione se questi magneti sono esposti a temperature di oltre 500°C ; una completa ricostruzione delle condizioni iniziali si ottiene con un ritrattamento del magnete.

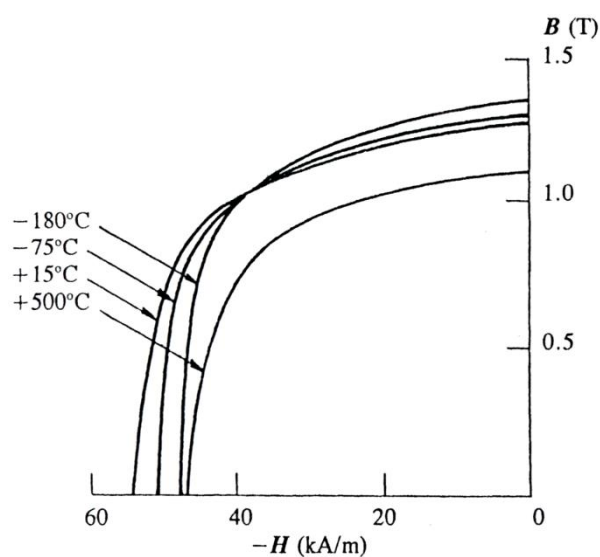


Figura 3.5: Curve di smagnetizzazione dell'alnico 5 alle varie temperature

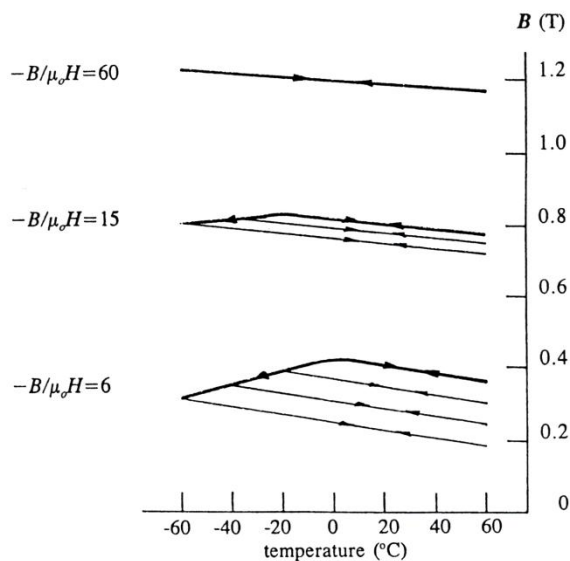


Figura 3.6: Dipendenza dalla temperatura dell'alnico 5 con le linee di carico alle varie pendenze

3.4 Variazioni di composizione

La stabilità termica delle ferriti ceramiche e dei magneti in alnico è stata spiegata facendo riferimento alla loro anisotropia. Le terre rare invece hanno un'alta anisotropia magnetocristallina uniaassiale, ma questo meccanismo è più complesso rispetto alle ferriti, perché implicano un processo di nucleazione o pinning. I magneti in samario-cobalto hanno un'alta temperatura di Curie, nell'intervallo 500-750 °C per SmCo_5 e 780-850 °C per $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. La coercività intrinseca nei composti di terre rare leggere non aumenta come M_{sat} diminuisce, ma piuttosto H_{ci} scende con l'aumentare della temperatura. La causa è a livello atomico, dove i momenti magnetici delle terre rare sono fortemente dipendenti dalla temperatura. Le curve di smagnetizzazione per i due materiali samario-cobalto sono mostrate in figura 3.7, con le loro caratteristiche intrinseche M e H , le quali mostrano il declino di H_{ci} con la temperatura.

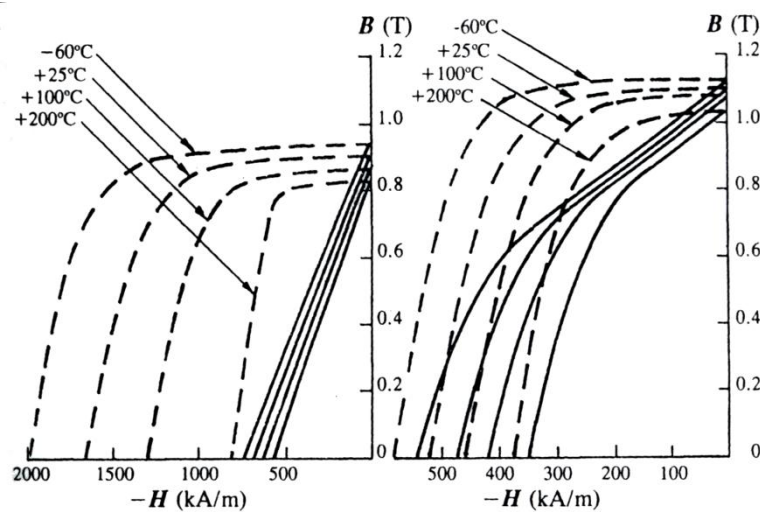


Figura 3.7: Curve di smagnetizzazione dei magneti SmCo_5 e $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ alle varie temperature

Fino a 200 °C per il SmCo_5 $|H_{\text{ci}}| > M_{\text{sat}}$ e le sue curve di smagnetizzazione sono lineari. La variazione della permeabilità e quindi H_{ci} con la temperatura è più forte per il $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, tale che $|H_{\text{ci}}| \leq M_{\text{sat}}$ e c'è un ginocchio in ogni curva. Il ginocchio si verifica a densità di flusso più alte, come l'aumento della temperatura, aggravando i problemi di applicazione di questo magnete. Per evitare una perdita irreversibile di energia del magnete si deve operare con una pendenza della linea di carico $B_r/\mu_0 H_i > 5$. La figura 3.8 mostra la perdita di flusso quando il magnete opera oltre i 200 °C. Il coefficiente reversibile di temperatura α per SmCo_5 è -0.045%/°C, mentre per il $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ è -0.03%/°C nello stesso intervallo di temperatura.

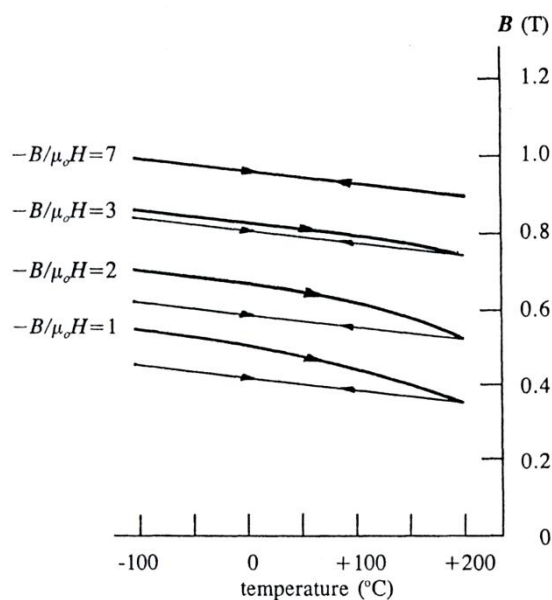


Figura 3.8: Variazione della densità di flusso con la temperatura per il $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

Ci sono composti di terre rare pesanti come Gd, Tb, Dy, Ho e Er, i quali hanno una diversa dipendenza dei loro momenti dalla temperatura, perché è differente l'accoppiamento degli atomi magnetici. Combinando elementi di terre rare leggere e pesanti in un composto, si può raggiungere un coefficiente reversibile di temperatura molto basso oltre un intervallo limitato di temperatura. Poiché la magnetizzazione è molto più bassa con gli elementi pesanti, il miglioramento della stabilità della temperatura è raggiunta con una perdita del prodotto di energia nel magnete. Le variazioni di composizione sono usate nel samario-cobalto per produrre magneti con un'elevata stabilità di temperatura per delle applicazioni specifiche.

Per quanto riguarda il neodimio-ferro-boro la sua temperatura di Curie è di circa 310 °C, e la forte dipendenza dalla temperatura dei momenti magnetici significa che, con l'aumento della temperatura, non c'è solo un declino veloce del momento magnetico, ma anche un declino di H_{ci} a zero a 250 °C circa. Il $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ non può essere usato oltre i 100 °C senza subire una perdita di flusso, e oltre questo intervallo il suo coefficiente reversibile di temperatura α è -0.02%/°C. Una parziale sostituzione del neodimio con una terra rara pesante come il disprosio Dy porta ad un aumento di H_{ci} e una conseguente riduzione di α . I composti contenenti Co hanno temperature di Curie molto più alte che quelli contenenti Fe, ma più basse coercività intrinseche. Per avere miglioramenti sia per quanto riguarda α sia per T_C si introduce nel composto Co e Dy insieme, in quantità relative anche per compensare gli effetti contrari che questi elementi possono avere su H_{ci} . T_C si porta a circa 500 °C e α si riduce a -0.07%/°C. L'accoppiamento antiferromagnetico tra Dy e Co riduce la magnetizzazione e $(BH)_{max}$ ma rende la lega più stabile. Le curve di smagnetizzazione per il magnete (Nd, Dy)FeB sono mostrate in figura 3.9. Una variazione sulla composizione migliora le proprietà del NdFeB.

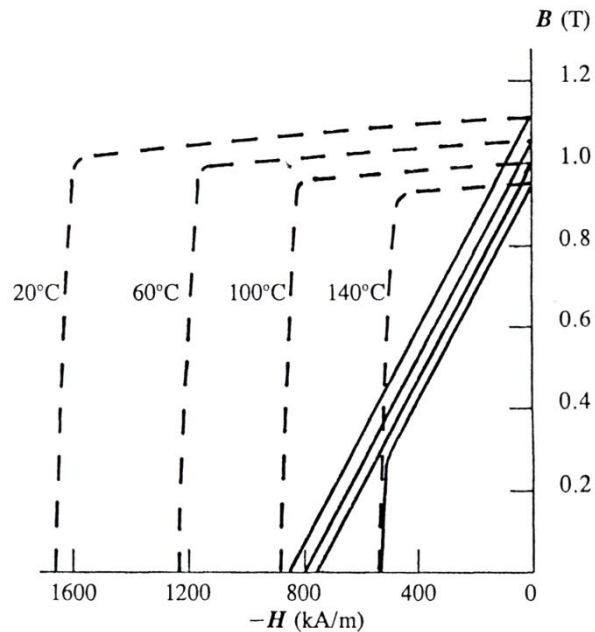


Figura 3.9: Curve di smagnetizzazione del (Nd, Dy)-Fe-B alle varie temperature

3.5 Superficie di ossidazione

Sebbene i magneti in ferrite ceramica abbiano un alto valore del coefficiente reversibile di temperatura, le loro superfici sono stabili e non sono soggette all'ossidazione. I magneti in alnico hanno un basso α e sono pure altamente resistenti all'ossidazione. L'ossidazione è un problema di molti magneti basati su terre rare, dominata dalla corrosione che si verifica sulle loro superfici. Se non è previsto un rivestimento per la protezione, l'ossigeno diffonde nel magnete provocando un cambiamento metallurgico in uno strato di superficie. Un tipo di superficie affetto da ossidazione per il magnete SmCo_5 è mostrato in figura 3.10.

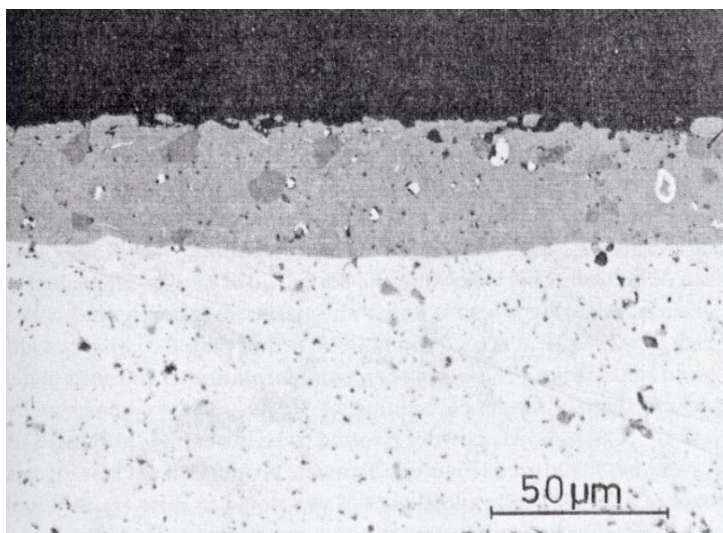


Figura 3.10: Superficie affetta da ossidazione di un magnete in SmCo_5

La conseguenza dell'ossidazione è che lo strato di superficie interessato possiede un più basso valore di coercività H_{ci} , la quale consente a questa parte del magnete di smagnetizzarsi più facilmente. Un magnete sottile avrà una superficie relativamente ampia rispetto al suo volume e

quindi soggetto a una peggiore ossidazione. L'alta coercività dei magneti in terre rare di solito significa che i magneti devono essere sottili per una scelta di progettazione. I magneti composti da alcuni tipi di legante possono contenere porosità che consente la formazione della corrosione. C'è una temperatura critica oltre la quale i magneti rivestiti presentano una degradazione nelle prestazioni magnetiche, al di sotto della quale si può operare in sicurezza.

L'aggiunta di cobalto in un componente riduce l'effetto dell'ossidazione. La mancanza di questo, invece, nel neodimio-ferro-boro genera ossidazione sulle superfici e anche se è comune fornire un rivestimento protettivo del magnete, la resistenza alla corrosione dipende dalla composizione della lega. Inoltre in presenza di alta umidità, il NdFeB reagisce con l'idrogeno nell'atmosfera, il quale è assorbito dalla superficie causando la disintegrazione del materiale. La figura 3.11 mostra la progressiva corrosione dalla superficie ai bordi grano. Si è detto che un'aggiunta di cobalto porta ad un aumento della temperatura di Curie e in piccole concentrazioni riduce l'ossidazione superficiale. È l'ossidazione di Nd che modifica i bordi grano promuovendo l'ossidazione, la formazione di questo composto intermetallico ostacola la formazione di Nd_2O_3 . Gli effetti della corrosione sui magneti in NdFeB sono serie e la degradazione delle proprietà magnetiche può essere contenuta controllando la composizione e utilizzando un rivestimento nel magnete finito. La porosità intrinseca dei leganti nei magneti, rende la fase di processo di miscelazione del composto importante, poiché in questa fase il legante può essere miscelato in modo da rivestire le singole particelle.

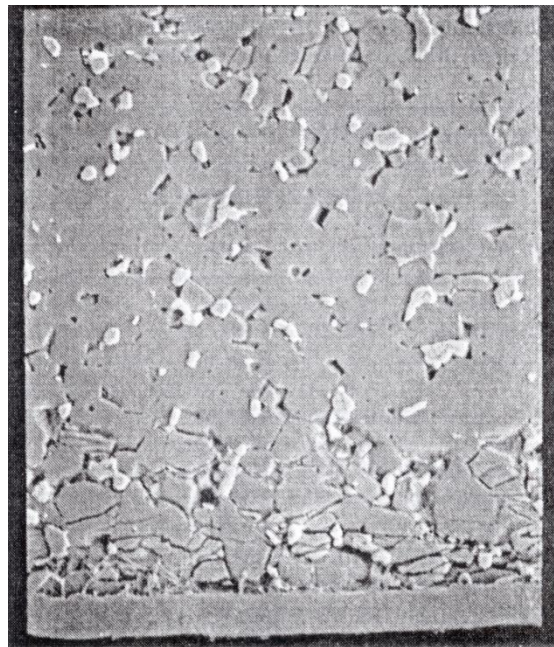


Figura 3.11: Superficie affetta da ossidazione di un magnete in NdFeB

3.5.1 Corrosione e reattività chimica

Rispetto ai magneti in SmCo, i magneti in NdFeB, come già detto, hanno una bassa resistenza alla corrosione. La reattività chimica è simile a quella dei metalli alcalino terrosi come il magnesio. Sotto le normali condizioni il NdFeB reagisce lentamente. La reazione è più veloce a più alte temperature e in presenza di umidità. La maggior parte dei magneti permanenti sono assemblati usando adesivi. Gli adesivi con contenuto di acidi non devono essere usati perché portano a una decomposizione del materiale del magnete permanente. I magneti in NdFeB non sono adatti ad essere utilizzati sotto le seguenti condizioni:

- In solvente organico e acido
- In acqua o olio (salvo chiuso ermeticamente)
- In un liquido elettricamente conduttivo, come elettrolita contenente acqua
- In atmosfera contenente idrogeno, specialmente ad elevate temperature, poiché l'idrogenazione causa la disintegrazione del materiale magnetico
- In gas corrosivi, come Cl, NH₃
- In presenza di radioattività (i magneti in NdFeB possono essere danneggiati dalla radiazione gamma e dai neutroni)

La protezione dei magneti in NdFeB con rivestimento in fibra di vetro con resina non è sufficiente. I migliori metodi di protezione contro la corrosione sono metalli (Sn o Ni) o organici. Le vernici sono gli unici rivestimenti convenienti ed efficaci contro la corrosione.

4 Applicazioni

I magneti permanenti sono stati utilizzati per anni in apparecchiature elettriche. I miglioramenti nelle proprietà dei materiali che hanno portato all'evoluzione dei magneti in terre rare, si sono focalizzati su dispositivi elettromeccanici ed elettronici. Ci sono dispositivi, prodotti in grande quantità, il cui materiale dominante è la ferrite ceramica, caratterizzata da un basso costo e dispositivi che manifestano alte prestazioni e un'alta energia, basati su terre rare. La più importante applicazione per i materiali per i magneti permanenti sono i motori in corrente continua; in queste macchine sono utilizzati magneti in ferrite ceramica per creare un campo magnetico costante. Un'altra applicazione importante sono i motori brushless a commutazione elettronica nei quali i magneti in terre rare vengono usati per realizzare i poli del rotore; quest'ultimo tipo di magnete è la parte principale del corpo rotante. I magneti in terre rare, inoltre, sono usati spesso per produrre un'alta densità di flusso nel traferro in un motore in corrente continua che porta a un miglioramento della coppia del motore. L'alta coercività del magnete è vantaggiosa, perché migliora la resistenza del motore alla smagnetizzazione. Il principale mercato per i magneti permanenti nei motori in corrente continua è quello delle automobili; i magneti in ferrite ceramica sono quelli utilizzati universalmente. Sono stati studiati vari tipi di $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ per ventole, radiatori di raffreddamento, avviamento e altre applicazioni. Le automobili presentano un ambiente ostile per questi magneti, perché sono presenti degli elementi corrosivi e temperature di esercizio circa a 175 °C. Un'altra importante applicazione per i magneti permanenti sono i sensori; la maggior parte di questi richiede magneti relativamente piccoli. I sensori di posizione magnetica e i sensori di velocità sono utilizzati in una grande varietà di sistemi di controllo di automobili, perché forniscono un ottimo e robusto metodo di rilevamento. Un sensore, quindi, non richiede un magnete grande per operare e le alte densità di energia dei materiali in terre rare sono sfruttate in modo vantaggioso per aumentare la sensibilità del dispositivo. Due applicazioni sono i sistemi in risonanza magnetica e i veicoli a bassa velocità. Le ferriti ceramiche e il $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ sono impiegati in ogni tipo di prodotto e in entrambi i casi si completano con magneti superconduttori come sorgente di campo.

4.1 Motori in corrente continua

La più importante applicazione per molti tipi di materiali per i magneti permanenti è nelle macchine elettriche in corrente continua. La struttura del motore in corrente continua comprende una parte fissa, chiamata statore, che costituisce l'induttore della macchina (la struttura che produce il campo magnetico principale), dotata dei poli induttori su cui sono avvolte le bobine di eccitazione che formano l'avvolgimento di eccitazione. Esiste poi una parte rotante, detta rotore, che rappresenta l'indotto della macchina, il cui avvolgimento (armatura) ha i suoi conduttori collocati in cave poste nel cilindro rotorico. Statore e rotore sono separati da una sottile corona d'aria che prende il nome di traferro.

Una macchina può impiegare un avvolgimento di campo, in serie o in parallelo con l'avvolgimento di armatura, ma un magnete permanente offre un'alternativa più efficiente e meno complessa per la produzione di energia elettrica. Il tipo di macchina in corrente continua a magneti permanenti più comune è il motore elettrico, nel quale l'energia elettrica viene convertita in coppia e velocità

meccanica. Le prestazioni fornite dal motore sono migliorate con l'avvento dei magneti in terre rare ad alta energia. Inoltre, essendo in grado di produrre il campo principale con un magnete più piccolo e leggero, questo motore diede vita al motore brushless in corrente continua. Nelle macchine tradizionali è presente un meccanismo di spazzole-collettore per trasferire corrente alla parte rotante, mentre in una macchina brushless questo passaggio di corrente avviene elettronicamente. La differenza nella struttura dei due tipi di macchine si nota in figura 4.1, dove in uno la struttura del magnete è parte dello statore, nell'altro è parte del rotore.

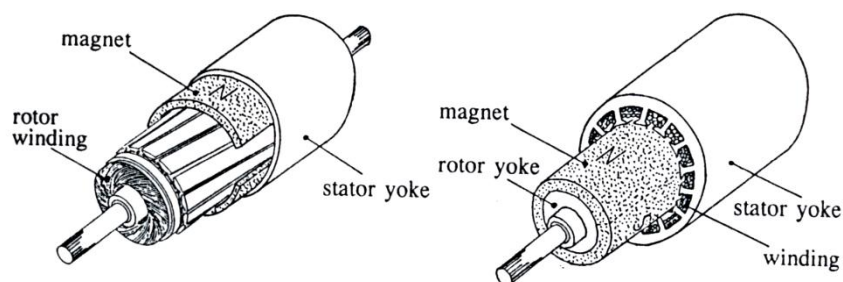


Figura 4.1: Layout delle strutture del rotore e dello statore in un motore tradizionale in cc e in un motore brushless in cc

In figura 4.1 la parte a sinistra mostra che l'avvolgimento di armatura è parte della struttura del rotore, la rotazione avviene all'interno del gruppo di statore a magneti permanenti. Come l'avvolgimento ruota, la corrente in esso viene commutata da un insieme di spazzole nello statore e un collettore ad esso collegato. Lo scopo di questa commutazione è di mantenere costante l'orientazione tra il campo dovuto ai magneti permanenti e le correnti di armatura, indipendentemente dalla posizione angolare del rotore. L'alta energia dei magneti in terre rare può essere usata per migliorare le prestazioni dei motori in corrente continua. Le applicazioni principali per questi motori usano magneti in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ e in $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, i quali portano a un miglioramento della coppia. Un più alto campo al traferro è la chiave per migliorare le prestazioni dei dispositivi a magneti permanenti.

Per raggiungere alti livelli di flusso magnetico nel motore in corrente continua è preferibile avere magneti caratterizzati da un'elevata rimanenza. In un motore elettrico il flusso dovuto agli avvolgimenti di armatura interagisce con il flusso principale causato dai magneti permanenti. Se i magneti sono adiacenti al loro traferro, la reazione di armatura causerà diverse condizioni operative in diverse regioni del magnete. Ogni parte del magnete può operare sotto differenti condizioni. I magneti in alnico sono molto più suscettibili alla reazione di armatura rispetto ai magneti in ferrite ceramica e in terre rare. La figura 4.2 mostra alcune geometrie per uno statore a due poli utilizzando diversi tipi di magneti; la figura 4.3 mostra le geometrie del rotore usando magneti in ferrite ceramica e in terre rare, topologia tipica del motore brushless. Vi è un aumento significativo della densità di energia magnetica sostituendo la ferrite ceramica con le terre rare, che portano a un miglioramento delle prestazioni con una maggiore densità di flusso al traferro.

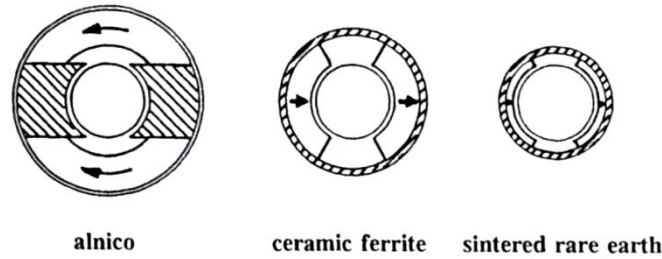


Figura 4.2: Struttura dello statore di un motore in cc per vari tipi di materiali

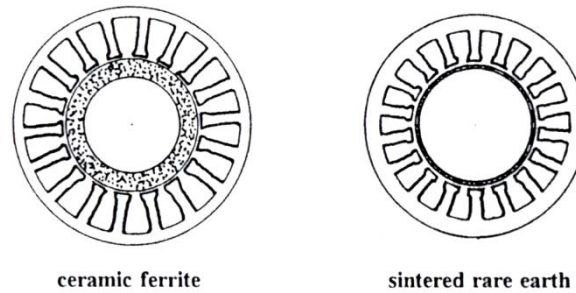


Figura 4.3: Struttura del rotore di un motore in cc per vari tipi di materiali

4.2 Motori sincroni

I motori sincroni a magneti permanenti sono impiegati diffusamente in ambito industriale, specialmente nei servoazionamenti di piccola e media potenza. Il costo di questi motori è solitamente elevato per la presenza nel rotore di magneti permanenti di pregio. Il layout del motore brushless in corrente continua, la seconda figura della 4.1, può anche funzionare come un motore sincrono in corrente alternata, se l'avvolgimento di statore è di tipo multi fase e produce un campo di armatura, che ruota attorno al traferro. Nella figura 4.1, la parte a destra mostra che l'avvolgimento di armatura è posizionato nella struttura di statore. Questa topologia è tipica appunto dei motori brushless; essa permette un accesso più conveniente ai terminali degli avvolgimenti. La posizione angolare dei poli magnetici viene rilevata da sensori di Hall e questo viene usato anche per mantenere un orientamento coerente con il campo del magnete. Il corretto funzionamento è legato alla conoscenza esatta della posizione del flusso del magnete permanente, ovvero del rotore. In questo motore non è necessaria alcuna commutazione della corrente e il rotore ruota in modo sincronizzato con il campo di armatura, producendo la coppia massima quando essi sono in quadratura di fase.

Motori di questo tipo offrono vantaggi nelle prestazioni su macchine sia per applicazioni a velocità fissa, che lavorano a una tensione di alimentazione costante, sia su convertitori di frequenza. Questi vantaggi includono un più alto fattore di potenza ed efficienza, e una maggiore densità di potenza nella macchina. I magneti permanenti incorporati nel rotore possono provocare un effetto smagnetizzante del flusso dell'avvolgimento di armatura, così sono impiegati solo magneti in ferrite ceramica e in terre rare, con caratteristiche di smagnetizzazione lineari, per l'alta coercività. Un tipo di motore sincrono a magneti permanenti, che non richiede assistenza per la

coppia d'avviamento, è il motore ad isteresi. L'isteresi è usata per creare una differenza di fase tra i flussi dovuti agli avvolgimenti di armatura e al rotore. Questo è un motore usato per applicazioni a frequenza e temporizzazione fissa come gli orologi.

4.3 Sensori

Sono attualmente impiegati molti tipi di sensori, tra i quali quello ottico, quello di capacità e quello al silicio. Nella maggior parte delle applicazioni è importante che il sensore sia economico e affidabile, quest'ultimo è un dispositivo senza contatto proprio per evitare problemi come la resistenza di contatto, l'abrasione e il rumore di segnale. I sensori ottici sono il tipo più comune nelle apparecchiature industriali, ma non sono molto robusti. A causa di questo, sono ampiamente utilizzati i sensori magnetici nelle automobili e in molte altre applicazioni in cui essi operano in polvere o in un liquido, ad alte temperature e vibrazioni.

I sensori magnetici sono utilizzati principalmente per misurare sia la posizione angolare che la velocità di rotazione. In questi sensori, il campo di un magnete permanente viene misurato utilizzando un semiconduttore che presenta l'effetto Hall. Un importante vantaggio del sensore di Hall è che la sua tensione di uscita è indipendente dalla velocità di rotazione, per cui non c'è nessuna perdita di informazioni. Questi sensori sono usati più frequentemente nei circuiti magnetici, che presentano riluttanza variabile con la posizione angolare. Nella configurazione mostrata in figura 4.4 un magnete permanente fisso si affaccia su una ruota dentata, i cui denti causano una modulazione della riluttanza del circuito magnetico durante la rotazione.

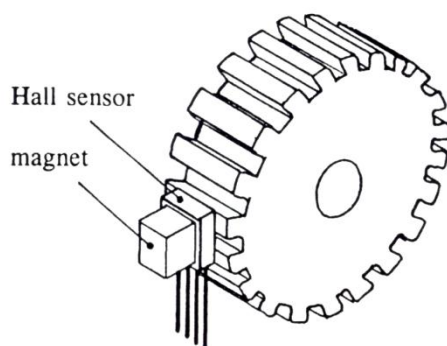


Figura 4.4: Riluttanza variabile in un sensore magnetico usando una ruota dentata

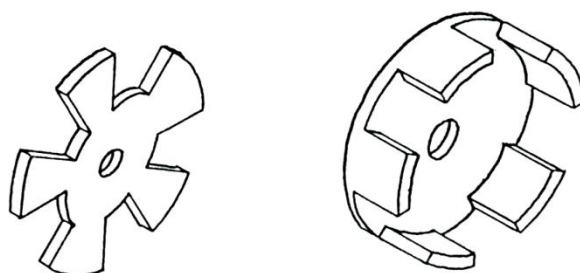


Figura 4.5: Alette in ferro aventi topologia a disco e a coppa

Le variazioni conseguenti del flusso nel traferro sono misurate da sensori ad effetto Hall, montati sulla faccia del magnete. A causa della sua semplicità, questo layout raggiunge una scarsa concentrazione di flusso del magnete nel traferro, non ottimizza il cambiamento di riluttanza, ed è quindi limitato a risoluzioni angolari relativamente basse.

Un dispositivo alternativo a riluttanza variabile impiega un'aletta in ferro avente una topologia a disco o a coppa come mostrato in figura 4.5. Con la configurazione a disco, il principio di funzionamento mostra come l'aletta viene usata per deviare il flusso del magnete del sensore di Hall. Questo è limitato anche a risoluzioni angolari relativamente basse per ottenere una variazione sufficiente della riluttanza del circuito magnetico. Le risoluzioni angolari maggiori sono ottenute senza una riluttanza variabile, utilizzando un rotore cilindrico a magneti permanenti, fatto da un materiale isotropo con una struttura eteropolare magnetizzata nella sua superficie come mostrato in figura 4.6. Può essere montato un sensore di Hall sulla circonferenza della ruota dentata, per misurare il cambiamento del flusso radiale. Poiché i poli del rotore operano in un circuito aperto magnetico, la costruzione di questo dispositivo è molto semplice con due soli componenti, un magnete del rotore e un sensore di Hall. La struttura eteropolare più complessa fornisce una scarsa utilizzazione di un magnete a volume grande, solo una coppia di poli adiacenti interagisce con il sensore. I più comuni magneti usati in queste applicazioni sono quelli in ferrite ceramica e di solito isotropi per facilitare la magnetizzazione dei poli.

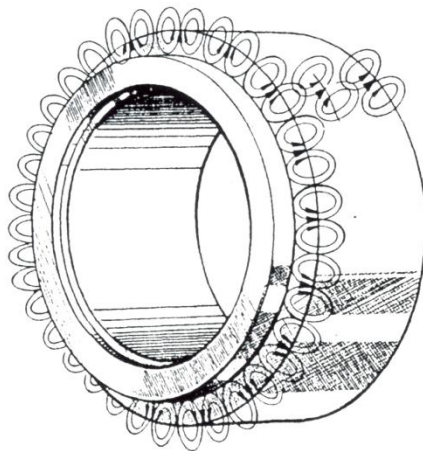


Figura 4.6: Ruota a magneti permanenti con linee di flusso che mostrano una struttura eteropolare

5 Conclusioni

In questa tesi sono stati trattati i vari materiali per magneti permanenti, evidenziando i loro vantaggi, svantaggi e le differenze che sussistono tra di essi. Si è visto l'alnico, uno dei primi materiali per magneti, caratterizzato da un'alta rimanenza, un prodotto di energia elevato e una temperatura di Curie alta (attorno agli 800 °C); esso è usato principalmente per sensori di sicurezza, frizioni, freni, altoparlanti e sistemi di sicurezza. Un altro importante materiale è la ferrite, il meno costoso di tutti, la quale può essere utilizzata a temperature molto elevate, grazie alla sua temperatura di Curie alta; un vantaggio del magnete in ferrite è che può essere smagnetizzato e rimagnetizzato senza che perda le sue proprietà magnetiche. Una caratteristica importante per la ferrite è la resistenza all'acqua, essendo derivata da ossidi. Le applicazioni per questi tipi di magneti sono pompe elettriche, sistemi di sollevamento, sistemi di misura, sensori. Si è visto che l'avvento delle terre rare, tra cui samario-cobalto e neodimio-ferro-boro, ha portato alla creazione di magneti permanenti con migliori proprietà magnetiche rispetto a quelli in alnico e ferrite. I magneti in SmCo sono magneti adatti ad applicazione ad elevate temperature fino a 350 °C circa: le loro proprietà magnetiche degradano lentamente con l'aumentare della temperatura; non hanno bisogno di un rivestimento grazie alla loro resistenza alla corrosione e ossidazione. I magneti in SmCo sono principalmente utilizzati in ambito elettromedicale e aerospaziale; sono preferiti quando sussistono problematiche di ossidazione o termiche nel dispositivo. I magneti in NdFeB, in molte applicazioni, sostituiscono i magneti in SmCo perché meno costosi a causa dell'assenza del cobalto; essi sono adatti in ambienti dove si opera ad alte temperature fino a 200 °C circa. Sono adatti per applicazioni avanzate. Il NdFeB è meccanicamente più forte del SmCo e meno fragile rispetto agli altri magneti. Le dimensioni del magnete sono precise (tolleranza ± 0.05 mm). Questi magneti hanno lo svantaggio di risentire molto dell'ossidazione quindi necessitano di una placcatura o di un rivestimento. Sono usati nei motori elettrici, negli accoppiamenti magnetici e nei sensori; negli ultimi anni sono diventati popolari in quasi tutte le applicazioni ad alta tecnologia che richiedono magneti ad alte prestazioni. Si sono poi visti i magneti in neodimio con leganti plastici, caratterizzati da un'alta forza meccanica e da una elevata densità, adatti alla produzione di massa; le dimensioni di questo magnete sono altamente precise (tolleranza ± 0.015 mm). Si trovano questi magneti nei sistemi di misura, nel settore dell'automazione. Si sono fatti anche accenni relativi ad altri materiali per i magneti permanenti come la ferrite plastica, la gomma magnetica in ferrite e la gomma magnetica in NdFeB.

Ringraziamenti

Un ringraziamento al Professore Giuseppe Chitarin, relatore di questa tesi, per la disponibilità dimostratemi.

Un ringraziamento ai miei genitori, in particolare a mia mamma che in questi anni mi ha sostenuto moralmente.

Un ringraziamento a Tobia che mi ha sostenuto in questo percorso e mi ha aiutato a chiarire qualche mio dubbio.

Bibliografia

Campbell Peter, 1994, *Permanent Magnet Materials and their Application*, New York, NY: Cambridge University Press

Fiorillo Fausto, 2004, *Measurement and characterization of magnetic materials*, Torino, Italia: Elsevier Academic Press

Gieras Jacek F., 2010, *Permanent Magnet Motor Technology, Design and Applications*, New York, NY: CRC Press

Krishnan R., 2010, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors*, New York, NY: CRC Press

Mazzoldi P., Nigro M., Voci C., 2008, *Elementi di Fisica*, Napoli, Italia: Edises

MPI (<http://www.mpi.it>)

MCE (<http://www.mceproducts.com>)

RD EUROPE Group (<http://www.rdeuropegroup.com>)