

**POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria Elettrica**

Tesi di Laurea Magistrale

**MOTORE A FLUSSO ASSIALE DI POTENZA  
FRAZIONARIA: PROGETTO, REALIZZAZIONE E  
CARATTERIZZAZIONE**



**Relatori**

Prof. Luca Ferraris

Prof. Andrea Cavagnino

Ing. Emir Poskovic

Ing. Fausto Franchini

**Candidato**

Fabio Castagneri

Marzo 2018

# Indice generale

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1.....	2
PROPRIETA' MAGNETICHE.....	2
1.1 Materiali ferromagnetici .....	5
1.2 Perdite nel ferro.....	7
CAPITOLO 2.....	10
MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI.....	10
2.1 Motore brushless SPM .....	10
2.2 Motore a flusso assiale.....	13
CAPITOLO 3.....	18
MATERIALI COMPOSITI.....	18
3.1 Soft Magnetic Composite .....	18
3.2 Plastomagnetni .....	21
CAPITOLO 4.....	24
PRODUZIONE MATERIALI S.M.C. ....	24
4.1 Preparazione delle polveri.....	24
4.2 Pressatura.....	26
4.3 Trattamento Termico .....	28
CAPITOLO 5.....	29
TERMOGRAFIA.....	29
5.1 Irraggiamento .....	29
5.2 Misura termografica .....	30
5.1 Valutazione delle perdite nel ferro .....	31
5.2 Misurazione con eccitazione di lunga durata .....	32
5.3 Misurazione con eccitazione di breve durata .....	35
5.4 Coefficiente $k$ di proporzionalità .....	37
5.5 Preparazione dei campioni.....	38
5.6 Produzione dei campioni cilindrici toroidi .....	39
5.7 Produzione dei campioni per valutare l'isotropia .....	41

CAPITOLO 6 .....	44
STUDIO DEI MATERIALI SMC.....	44
6.1 Caratterizzazione dei toroidi .....	44
6.2 Coercività.....	48
6.3 Prova di flessione a tre punti.....	52
6.4 Analisi Metallografica.....	54
CAPITOLO 7 .....	58
ANALISI DEI RISULTATI.....	58
7.1 Caratterizzazione dei toroidi .....	58
7.2 Termografia .....	62
7.3 Coercività.....	69
7.4 Prova di flessione a tre punti.....	70
7.5 Visione al microscopio ottico .....	73
CAPITOLO 8 .....	76
REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO.....	76
8.1 Calcolo Analitico .....	76
8.2 Rotore.....	84
8.4 Statore.....	95
8.5 Avvolgimento.....	101
CAPITOLO 9 .....	107
RISULTATI SPERIMENTALI.....	107
9.1 Prova di cogging.....	107
9.2 Prova a vuoto.....	113
9.3 Prova a carico.....	118
9.4 Misura della coppia in DC.....	127
9.5 Prova motore .....	129
9.6 Prova termica.....	135
9.7 Misura forza assiale .....	138
CAPITOLO 10 .....	140
CONCLUSIONI .....	140
RIFERIMENTI.....	143

## INTRODUZIONE

Scopo principale della tesi è la progettazione, realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di motore a flusso assiale di potenza frazionaria con statore in SMC e plastomagneti di rotore, entrambi realizzati con un processo di metallurgia delle polveri costituite da polvere ferromagnetica e piccole quantità di sostanze organiche termoindurenti.

Gli S.M.C. e i plastomagneti sono ottenuti per mezzo di compattazione a freddo, cui segue trattamento termico. Le proprietà magnetiche e meccaniche sono legate alla percentuale di resina della miscela e alla pressione utilizzata durante la compattazione.

Nella presente trattazione sono valutati anche gli effetti dell'applicazione di campo magnetico esterno durante la pressatura delle polveri SMC e un eventuale effetto sull'orientamento dei grani di ferro, perché la realizzazione del prototipo ne è subordinata.

I diversi campioni ottenuti si differenziano in base alla sperimentazione cui sono sottoposti: caratterizzazione magnetica di campioni toroidali, misurazione termografica che consente di evidenziare la distribuzione delle perdite nel ferro, misura della coercività, prova di flessione a tre punti, analisi metallografica al microscopio ottico. Nella misurazione termografica vengono messi a confronto due diversi metodi di misura per valutarne differenze e scostamenti rispetto alla tradizionale caratterizzazione magnetica.

L'adozione di materiali alternativi, per sostituire quelli attualmente utilizzati nelle applicazioni di conversione elettromeccanica, è di grande interesse per l'aumento del rapporto potenza / peso e il conseguente abbassamento dei costi.

In particolare, i magneti permanenti di terre rare con alta densità energetica e i materiali soft magnetic composit (SMC) hanno permesso lo sviluppo di macchine brushless ad elevato rendimento e densità di potenza. L'uso di plastomagneti come magneti permanenti è in aumento nelle applicazioni di piccole-medie dimensioni, perché i magneti in ferrite hanno scarse prestazioni e il processo produttivo con sinterizzazione risulta molto costoso.

# Capitolo 1

## PROPRIETA' MAGNETICHE

Le proprietà magnetiche delle sostanze variano notevolmente in funzione di: composizione chimica, struttura cristallina, trattamenti termici. Le proprietà magnetiche macroscopiche derivano dai momenti magnetici associati ai singoli elettroni.

La presente trattazione fa riferimento alla meccanica newtoniana, senza richiamare i principi di meccanica quantistica che andrebbero oltre lo scopo. Gli elettroni hanno un moto attorno al nucleo che, in prima approssimazione, può essere ipotizzato come una spira elementare che, percorsa da corrente, costituisce un dipolo magnetico.

L'intensità di corrente è definita come quantità di cariche positive che attraversa una superficie nell'unità di tempo.

Considerando una superficie di riferimento  $A$ , in una posizione tale da intercettare la traiettoria dell'elettrone, è possibile calcolare l'intensità di corrente come il rapporto tra la carica dell'elettrone e il periodo  $T$  del suo moto attorno al nucleo.

$$I = \frac{|e^-|}{T}$$

$e^- = -1,6 \cdot 10^{-19} C$ , carica elettrone

Si definisce il vettore momento di dipolo magnetico elementare come il prodotto tra l'intensità di corrente  $I$  che percorre la spira elementare e la superficie  $S$  racchiusa dalla spira stessa.

$$|\vec{m}| = I \cdot S$$

$|\vec{m}|$  ha due sorgenti, la prima dovuta al moto dell'elettrone attorno al nucleo che definisce anche la direzione del vettore, la seconda è legata al contributo di spin, cioè del moto dell'elettrone sul proprio asse. Il verso è dato dalla regola della vite destrorsa.

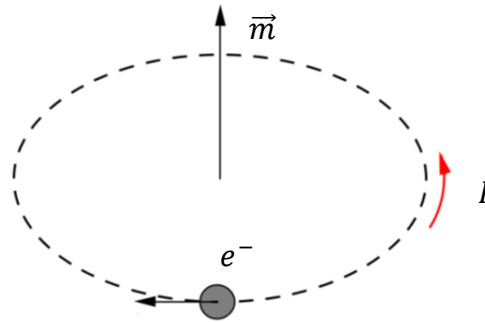


Fig.1 Momento di dipolo magnetico elementare e corrente di origine atomica

Tranne l'atomo di idrogeno, tutti gli altri elementi chimici hanno più di un elettrone per cui si considera il momento di dipolo magnetico risultante come somma di quelli elementari. In presenza di conduttori percorsi da corrente o di magneti permanenti si origina un campo magnetico nello spazio circostante. Il vettore campo magnetico è legato al vettore induzione magnetica dalla relazione costitutiva lineare, valida nel vuoto:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ , permeabilità nel vuoto

In presenza di materia si deve generalizzare la precedente relazione introducendo il vettore magnetizzazione  $\vec{M}$ , definito come densità volumica di momento di dipolo magnetico:

$$\vec{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\vec{m}}{\Delta v}$$

Un corpo cilindrico inserito in un solenoide, formato da N spire e percorso da una corrente I, viene magnetizzato dal campo magnetico generato dal solenoide. Considerando un punto qualsiasi all'interno della sezione del cilindro, i contributi delle correnti elementari si annullano a vicenda, creando una corrente superficiale per unità di lunghezza del cilindro. Il cilindro immerso nel campo magnetico si comporta come una macro-spira che si sviluppa tridimensionalmente.

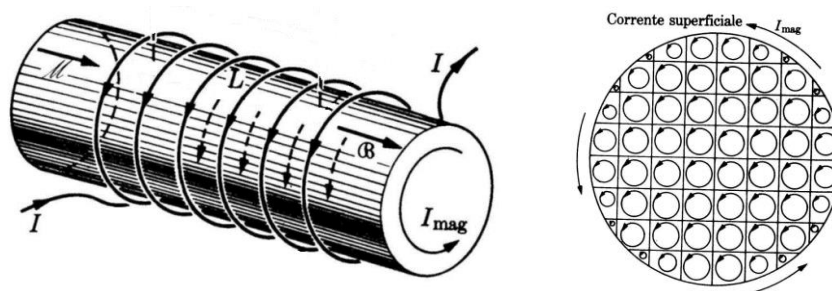


Fig.2 Cilindro posto in solenoide percorso da corrente (a sinistra) e correnti elementari (a destra)

Il campo magnetico totale è la somma del campo magnetico dovuto alla corrente che percorre il solenoide e del campo dovuto alla magnetizzazione dato dalle correnti che percorrono le spire elementari. Il campo magnetico  $\vec{H}$  è definito come vettore la cui componente parallela al piano tangente alla superficie del corpo immerso nel campo magnetico è uguale alla corrente totale che percorre il solenoide per unità di lunghezza.

$$\vec{H} = H \cdot \vec{u}_T = N \cdot I$$

Nel caso generale la relazione tra i vettori induzione magnetica, campo magnetico e magnetizzazione è:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

Per molti materiali isotropi e non ferromagnetici il vettore magnetizzazione è:

$$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H}$$

$\chi_m$  : costante di proporzionalità adimensionale detta suscettività magnetica.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0\vec{H} + \mu_0\chi_m\vec{H} = (1 + \chi_m)\mu_0\vec{H}$$

Si definisce una nuova costante  $\mu_r = (1 + \chi_m)$  detta permeabilità relativa del mezzo. Essa dipende dalle proprietà del mezzo, descrive la risposta a un campo magnetico esterno, è legata alla struttura microscopica.

$$\vec{B} = \mu_0\mu_r(\vec{H}) = \mu(\vec{H})$$

I materiali sono distinti in base al valore di  $\mu_r$ :

- Diamagnetici: per i quali  $\mu_r$  è di poco inferiore all'unità ( $1 - 10^{-5} \div 1 - 10^{-6}$ ). Hanno un magnetismo molto debole, temporaneo, che persiste solo in presenza di un campo magnetico esterno.
- Paramagnetici: per i quali  $\mu_r$  è di poco superiore all'unità ( $1 + 10^{-4} \div 1 + 10^{-2}$ ). In assenza di campo magnetico esterno, i momenti di dipolo magnetico sono distribuiti in modo casuale, con risultante nulla. All'aumentare del campo magnetico esterno, i momenti di dipolo tendono ad allinearsi con le linee di campo e quindi lo intensificano. Tale fenomeno si chiama magnetizzazione. Se tutti i momenti di dipolo magnetico sono orientati nella stessa direzione il materiale risulta completamente magnetizzato.
- Ferromagnetici: per i quali  $\mu_r$  è molto elevato ( $10^3 \div 10^6$ ). Sono i materiali utilizzati nella trattazione e vengono approfonditi di seguito.

## 1.1 Materiali ferromagnetici

Ogni materiale ferromagnetico è formato da regioni in cui tutti i momenti di dipolo magnetico sono allineati nella stessa direzione e verso. Tali regioni sono chiamate domini (di Weiss) e sono separati da pareti (di Block). Normalmente i domini sono di dimensioni microscopiche e ciascun grano può essere costituito da più di un dominio. In assenza di campo magnetico esterno, il momento di dipolo di un dominio di Weiss è disallineato rispetto ai domini adiacenti, quindi considerando un volume di materiale il vettore risultante è nullo.

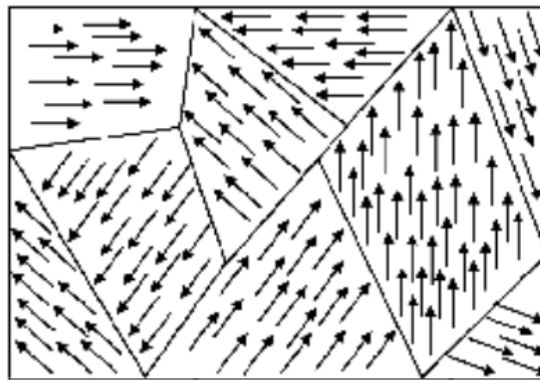


Fig.3 Domini separati da pareti in un materiale ferromagnetico

Per i materiali ferromagnetici i vettori induzione magnetica  $\vec{B}$  e campo magnetico  $\vec{H}$  non sono proporzionali perchè la permeabilità magnetica è dipendente da  $\vec{H}$ , infatti la relazione  $\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H}$  non è più valida.

Applicando un campo magnetico esterno a un materiale ferromagnetico smagnetizzato, i domini di Weiss, che presentano un momento di dipolo magnetico allineato alle linee di campo, tendono ad estendersi a spese di quelli disallineati. Quando tutti i momenti di dipolo magnetico sono allineati, si raggiunge la saturazione della magnetizzazione. La curva che descrive il fenomeno prende il nome di caratteristica di prima magnetizzazione e rappresenta la relazione fra i valori massimi di induzione e campo magnetico (Fig.4). Tali valori corrispondono ai vertici di ogni ciclo d'isteresi, che rappresenta lo stato dei materiali ferromagnetici descritto dalla curva chiusa sul piano cartesiano B-H.



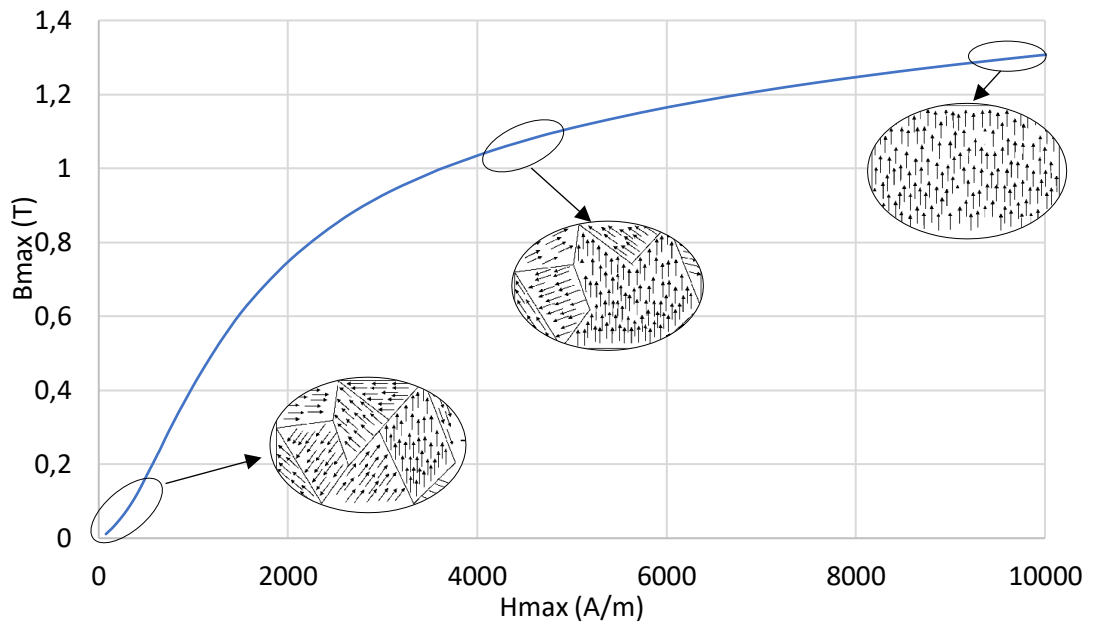


Fig.4 Curva di prima magnetizzazione di un materiale ferromagnetico

Se il materiale viene magnetizzato con un valore di  $H$  crescente e successivamente smagnetizzato facendolo diminuire, l'andamento dell'induzione  $B$  risulta differente nelle due fasi. Infatti, l'energia magnetica necessaria alla magnetizzazione risulta superiore a quella restituita dal materiale nella smagnetizzazione.

Se il materiale ferromagnetico è sottoposto ad una magnetizzazione sinusoidale, il ciclo d'isteresi è simmetrico rispetto all'origine.

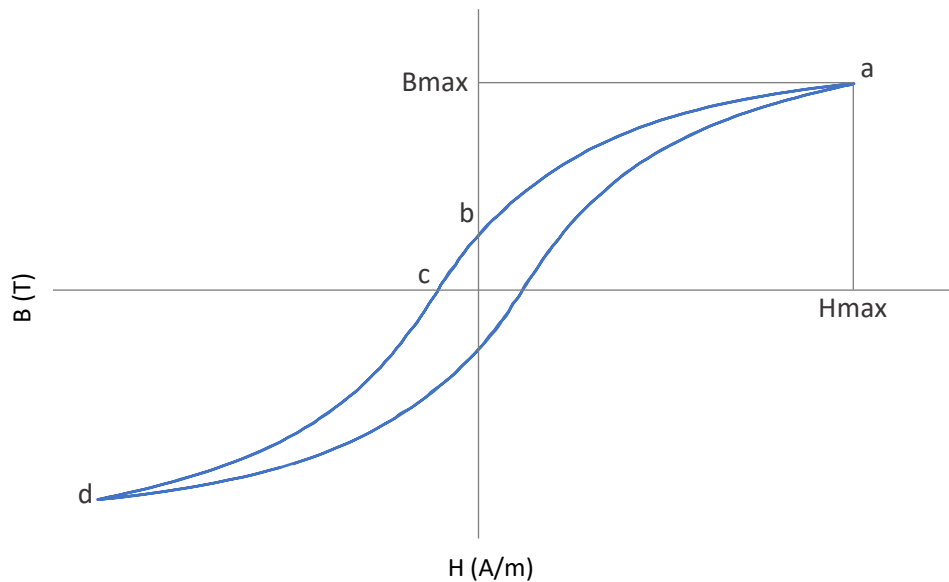


Fig.5 Ciclo d'isteresi di un materiale ferromagnetico dolce

Una volta raggiunta la saturazione (Fig.5 punto a) si diminuisce il campo H fino ad annullarlo (Fig.5 punto b). In assenza di campo esterno, il materiale conserva un effetto residuo di allineamento dei dipoli, per cui rimane parzialmente magnetizzato. Tale proprietà è chiamata induzione residua  $B_r$ . Per portare il valore di induzione nel materiale a zero è necessario applicare un campo in direzione opposta pari ad  $H_c$  chiamato campo coercitivo (Fig.5 punto c). Aumentando ulteriormente il campo magnetico si giunge alla saturazione nella direzione opposta (Fig.5 punto d).

I materiali ferromagnetici sono classificati in base alla forma del ciclo d'isteresi come:

- Dolci: presentano un ciclo di isteresi stretto e allungato, valori di  $H_c$  ridotti e  $\mu_{iniziale} \approx$  costante e elevata. Sono utilizzati nelle applicazioni con campi magnetici variabili poiché le perdite di energia sono minori durante i cicli di magnetizzazione-smagnetizzazione.
- Duri: presentano un ciclo d'isteresi largo, elevati valori di  $H_c$ ,  $B_r$ ,  $H_{max}$ ,  $B_{max}$  e  $\mu_{iniziale}$  ridotta. Sono utilizzati come magneti permanenti perché risultano difficili da smagnetizzare.

## 1.2 Perdite nel ferro

Se un materiale ferromagnetico è sottoposto ad una magnetizzazione alternativa, diviene sede di perdite nel ferro che si possono convenzionalmente suddividere in:

- Perdite per isteresi magnetica
- Perdite per correnti parassite
- Perdite eccedenti

### 1.2.1. Perdite per isteresi

Alle basse frequenze le perdite per isteresi risultano la componente maggiore delle perdite totali. Per ogni ciclo di isteresi l'energia persa per unità di volume corrisponde all'area compresa all'interno del ciclo:

$$E_i = dv \oint_l H \cdot dB$$

- $dv$ : volume infinitesimo di materiale ferromagnetico
- $l$ : percorso chiuso di magnetizzazione alternativa

Considerando una magnetizzazione alternativa simmetrica con frequenza  $f$  e riscrivendo la precedente relazione per unità di massa, con  $\gamma$  densità del materiale, viene ricavata la relazione per il calcolo delle perdite specifiche per isteresi:

$$W_i = f \cdot \frac{\oint_l H \cdot dB}{\gamma}$$

In condizioni reali occorre riscrivere la relazione, ricavandola sperimentalmente, perché le perdite dovute alle correnti parassite non sono completamente separabili dalle perdite per isteresi e alterano il calcolo finale.

$$W_i = c \cdot f \cdot B_{max}^n$$

- $B_{max}$  : induzione massima del ciclo simmetrico
- $c$  : costante di proporzionalità
- $f$  : frequenza campo magnetico
- $n$  : coefficiente di Steinmetz, variabile fra 1,6 e 2,2

### 1.2.2. Perdite per correnti parassite

Alle alte frequenze le perdite per correnti parassite risultano la componente maggiore delle perdite totali. Per la legge di Lenz, se un materiale conduttore viene immerso in un campo magnetico variabile nel tempo, si inducono delle f.e.m. che tendono ad opporsi alla causa che le genera. Le correnti parassite che si generano risultano più o meno intense in relazione allo spessore e alla resistività del materiale e producono una dissipazione per effetto Joule. La relazione approssimata per la valutazione delle perdite per correnti parassite che interessano lamierini di materiale ferromagnetico è:

$$P_c = c_c \cdot \frac{f^2 \cdot B_{max}^2 \cdot d^3 \cdot l \cdot h}{\rho}$$

- $c_c$  : costante di proporzionalità
- $B_{max}$  : induzione massima
- $f$  : frequenza campo magnetico
- $d$  : spessore lamierino
- $l$  : lunghezza lamierino
- $h$  : altezza lamierino
- $\rho$  : resistività elettrica del materiale

Per calcolare le perdite specifiche per correnti parassite, ambedue i membri sono divisi per la massa  $m$  del lamierino:

$$W_c = c_c \cdot \frac{f^2 \cdot B_{max}^2 \cdot d^2}{\rho \cdot \gamma}$$

Mantenendo costanti le altre grandezze, le perdite specifiche per correnti parassite risultano proporzionali al quadrato dello spessore del lamierino.

Per questo motivo si ricorre all'impaccaggio di sottili lamierini isolati tra loro. Il vettore induzione magnetica deve sempre essere diretto nel piano di laminazione così da non incontrare i traferri tra i lamierini.

### 1.2.3. Perdite eccedenti

La somma delle perdite per isteresi e per correnti parassite non corrisponde al totale delle perdite misurate sperimentalmente.

Si ipotizza che il movimento delle pareti dei domini ferromagnetici, causa di un debole campo magnetico variabile, produca ulteriori correnti parassite, dovute a lineari variazioni di flusso non distribuite in modo uniforme e responsabili di una dissipazione per effetto Joule, che corrisponde alle perdite eccedenti.

Il contributo delle perdite eccedenti risulta significativo soltanto a frequenze elevate e/o bassi valori di induzione.

Il calcolo delle perdite eccedenti, tuttora oggetto di studio, viene approssimato con:

$$W_{ex} = c_{ex} \cdot \frac{f^{3/2} \cdot B_{max}^{3/2}}{m}$$

- $c_{ex}$ : costante che dipende dai parametri elettrici
- $f$ : frequenza magnetizzazione
- $B_{max}$ : induzione massima

# Capitolo 2

## MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

### 2.1 Motore brushless SPM

L'acronimo SPM (Surface Permanent Magnet) indica una macchina sincrona con eccitazione a magneti permanenti appoggiati sulla superficie del rotore. A differenza di una macchina sincrona tradizionale con avvolgimento di eccitazione, tale soluzione consente di limitare l'ingombro del rotore e di evitare le perdite Joule di eccitazione. La macchina viene impiegata in applicazioni di piccola-media potenza, con alimentazione a frequenza variabile. Il motore sincrono a magneti permanenti insieme con l'alimentatore e il sistema di controllo viene detto "motore brushless", rappresenta una tipologia di azionamento. La tecnica di controllo, il cui scopo è ottenere una coppia indipendente dalla posizione angolare di rotore, può essere di due tipi: trapezoidale e sinusoidale.

La prima tecnica prevede una corrente di forma d'onda quadra imposta dal convertitore e f.e.m. trapezoidale; la seconda adotta corrente e f.e.m. sinusoidali. La forma d'onda di f.e.m. richiesta dipende dalla disposizione degli avvolgimenti di statore e da forma e disposizione dei magneti di rotore.

L'avvolgimento trifase disposto nelle cave di statore può presentarsi distribuito oppure concentrato (a poli salienti).

#### 2.1.1 Controllo trapezoidale

Nella versione comandata con la tecnica trapezoidale, il motore brushless può essere considerato simile ad un motore in corrente continua a magneti permanenti con commutatore elettronico (motore brushless DC).

Il motore trapezoidale è isotropo e la distribuzione di induzione al traferro dei poli magnetici ha un andamento rettangolare. Al fine di mantenere la coppia unidirezionale è necessario invertire la polarità della corrente nei conduttori, facendo in modo che sia in accordo con i magneti di rotore. Gli assi dei tre avvolgimenti sono disposti simmetricamente a  $120^\circ$  e percorsi da correnti costituenti una terna di onde quadre sfasate tra di loro di  $120^\circ$  elettrici. La corrente percorre soltanto due delle tre fasi per ogni istante.

La corrente è controllata in modo che sia nulla quando la f.e.m. varia e sia diversa da zero quando la f.e.m. è costante. Per tale operazione non è necessario conoscere l'effettiva posizione del rotore, ma soltanto alcuni intervalli della sua posizione.

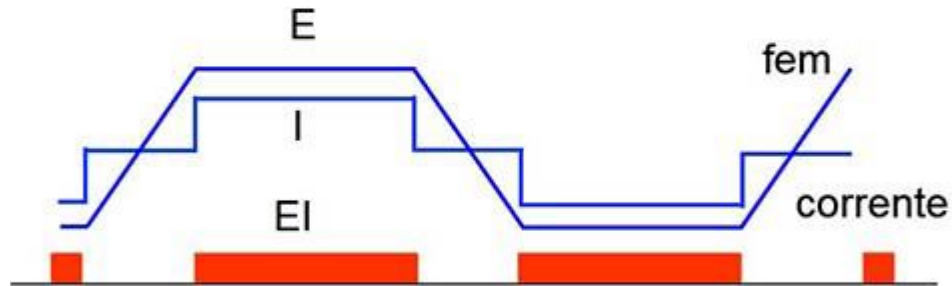


Fig.6 Forme d'onda di f.e.m. , corrente e potenza di una fase per tecnica trapezia

La potenza gestita da una fase ha andamento impulsivo, mentre la potenza totale, ottenuta come somma delle tre potenze di fase, è teoricamente costante.

$$P_{T,trap} = 2E_{trap} \cdot I_{trap}$$

A velocità  $\omega$  costante anche la coppia risulta costante:

$$T_{T,trap} = \frac{2E_{trap} \cdot I_{trap}}{\omega}$$

Il risultato è valido con  $\omega$  variabile se si opera con il flusso al posto della f.e.m.

In condizioni reali non è possibile ottenere una f.e.m. trapezoidale, né una corrente a gradini a causa dei fenomeni induttivi.

### 2.1.2 Controllo sinusoidale

La tecnica sinusoidale, che prevede avvolgimenti distribuiti, è più complessa di quella trapezoidale.

Il campo magnetico statorico ruota sincrono con il rotore per generare una coppia costante e indipendente dalla posizione del rotore.

Gli assi dei tre avvolgimenti sono disposti simmetricamente a  $120^\circ$  e percorsi da correnti costituenti una terna equilibrata di sinusoidi sfasate tra di loro di  $120^\circ$  elettrici.

La corrente è controllata in modo da avere una coppia unidirezionale. Per tale operazione è necessario conoscere l'effettiva posizione del rotore, istante per istante.

Per ottenere la coppia massima, la f.e.m. indotta negli avvolgimenti e dipendente dall'angolo di rotore deve essere una funzione sinusoidale in fase con la corrente di alimentazione.

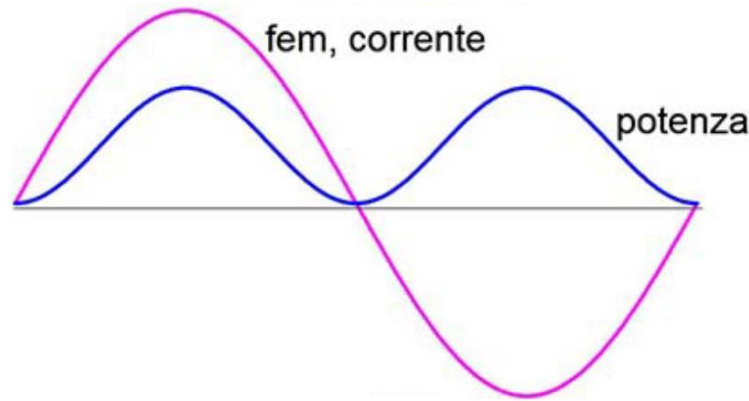


Fig.7 Forme d'onda di f.e.m., corrente e potenza di una fase per tecnica sinusoidale

La potenza della singola fase ha un andamento sinusoidale con frequenza doppia rispetto a tensione e corrente.

$$P_{fase,sin} = \hat{E}_{sin} \sin \omega t \cdot \hat{I}_{sin} \sin \omega t = \hat{E}_{sin} \cdot \hat{I}_{sin} \sin^2 \omega = \frac{\hat{E}_{sin} \cdot \hat{I}_{sin}}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

La potenza totale è la somma dei tre andamenti sfasati di  $120^\circ$  elettrici:

$$P_{T,sin} = \frac{\hat{E}_{sin} \cdot \hat{I}_{sin}}{2} \left[ 3 - \cos 2\omega t - \cos \left( 2\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) - \cos \left( 2\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right] = \frac{3}{2} \hat{E}_{sin} \cdot \hat{I}_{sin}$$

A velocità  $\omega$  costante anche la coppia è costante:

$$T_{T,sin} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\hat{E}_{sin} \cdot \hat{I}_{sin}}{\omega}$$

I motori brushless sinusoidali sono più costosi rispetto ai brushless trapezoidali perché il controllo risulta più complesso. Per contro consentono di minimizzare le inevitabili ondulazioni di coppia perché le correnti non hanno andamento impulsivo.

In genere nei brushless sinusoidali vengono addizionate alla f.e.m. sinusoidali componenti di terza armonica che, incrementando il picco della fondamentale, innalzano il picco di flusso e di conseguenza la coppia. Il risultato è una forma d'onda ad elmo con armonica fondamentale di f.e.m maggiore. Il collegamento a stella senza neutro del motore impedisce la generazione di ripple di coppia.

In condizioni reali la coppia prodotta dai motori brushless non è costante, ma varia per due motivi:

- contenuto armonico presente nella corrente di alimentazione del motore. Il ripple di coppia risulta più o meno elevato in base alla qualità del convertitore.
- attrazione magnetica tra i denti statorici e i magneti permanenti del rotore che genera la coppia di cogging.

## 2.2 Motore a flusso assiale

Le macchine brushless a flusso assiale sono macchine sincrone a magneti in cui il flusso è diretto parallelamente all'albero. Le loro applicazioni interessano veicoli elettrici, pompe, ventole, controllo valvole, centrifughe, macchine utensili e generatori di piccola-media potenza.

Sono un'alternativa alle macchine a flusso radiale per:

- maggiore densità di coppia
- dimensioni compatte
- migliore ventilazione e raffreddamento
- rapporto diametro/lunghezza più elevato
- possibilità di progettare una macchina multistadio, in cui il numero di stadi dipende dalla potenza e dalla coppia richieste
- all'aumentare del diametro esterno è possibile modificare il numero di poli, grazie all'utilizzo di magneti permanenti per produrre il campo, rendendo la macchina a flusso assiale adatta per alta frequenza o funzionamento a bassa velocità.

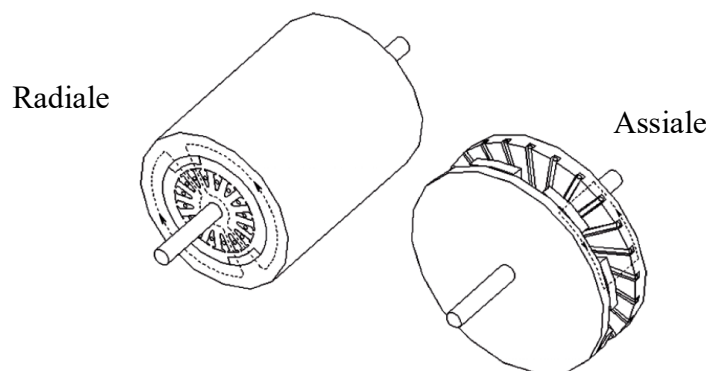


Fig.8 Confronto geometrie macchina radiale e assiale a parità di coppia nominale

La coppia della macchina a flusso assiale è proporzionale al cubo del diametro, invece, nella macchina radiale dipende dal quadrato del diametro per la lunghezza.

I vantaggi della geometria assiale sono limitati dall'aumento della taglia di potenza e/o dal rapporto tra lunghezza e diametro. Il punto di passaggio si verifica quando il raggio della macchina assiale diventa uguale al doppio della lunghezza della macchina radiale della quale, fissato il diametro, è possibile aumentare la potenza semplicemente aumentandone la lunghezza.



Gli svantaggi nella costruzione di una macchina a flusso assiale sono:

- Elevata forza di attrazione assiale tra il rotore e lo statore
- Difficoltà ed elevati costi di fabbricazione se si adotta un nucleo laminato
- Difficoltà nell'assemblaggio della macchina e nel mantenimento del traferro costante.

La produzione di nuovi materiali e l'innovazione nei processi produttivi hanno reso possibile lo sviluppo e l'uso delle macchine a flusso assiale. In particolare, i magneti permanenti di terre rare con alta densità energetica e dei materiali soft magnetic composit (SMC) hanno permesso lo sviluppo di macchine brushless ad elevato rendimento e densità di potenza.

Il nucleo di statore può essere realizzato con o senza cave tramite un processo di metallurgia delle polveri che prevede una miscela di polvere ferromagnetica con una piccola quantità di resina.

### 2.2.1 Macchina a flusso assiale monostadio

La struttura monostadio è quella più semplice poiché comprende un solo statore e un solo rotore. Gli avvolgimenti possono essere concentrati o distribuiti (Fig.9).

La configurazione ad avvolgimenti concentrati (bobina di dente), sebbene il flusso al traferro presenti maggiori armoniche spaziali, è la più diffusa; infatti presenta connessioni frontali più corte che rendono l'assemblaggio più semplice e limitano le perdite nel rame. Le fasi sono fisicamente separate perché manca la sovrapposizione tra le bobine e ciò permette una migliore tolleranza ai guasti.

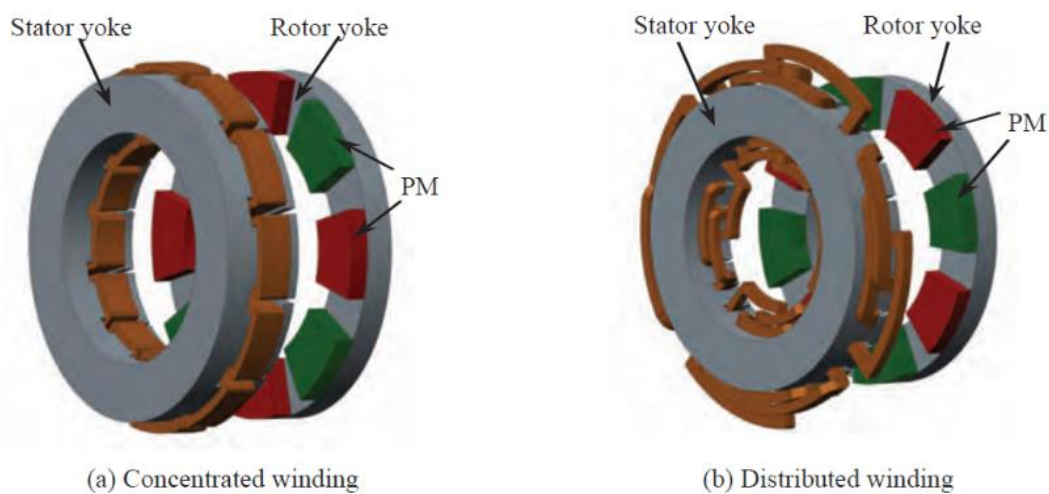


Fig.9 Macchina a flusso assiale monostadio ad avvolgimenti concentrati (a) e distribuiti (b)

Gli avvolgimenti concentrati possono essere a singolo o doppio strato. I primi hanno una singola bobina posizionata in cava, per cui i denti sono avvolti in modo alternato. I secondi hanno due bobine nella stessa cava, per cui tutti i denti sono avvolti e tale configurazione permette di raggiungere fattori di riempimento maggiori.

## 2.2.2 Macchina a flusso assiale a doppio stadio

Le macchine assiali a doppio stadio sono più vantaggiose di quelle monostadio all'aumentare della potenza. Ne esistono di varie tipologie.

Doppio statore esterno e rotore interno con o senza cave

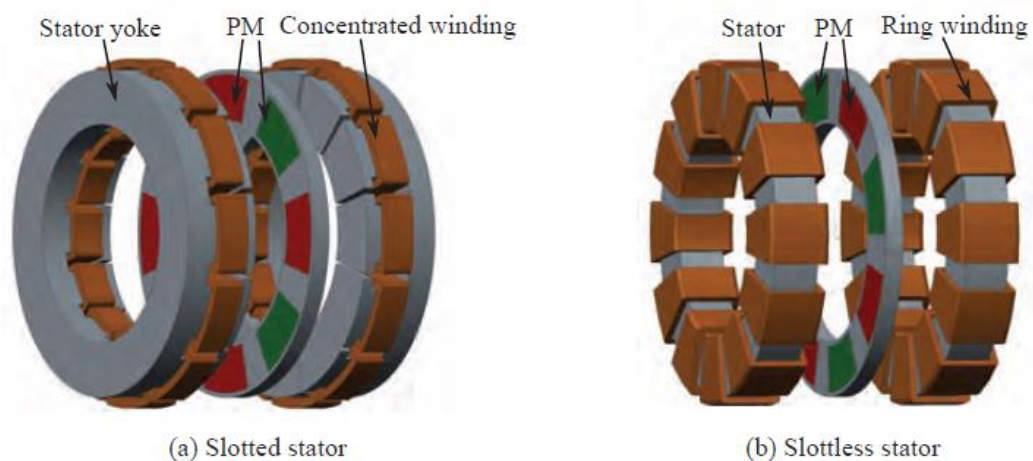


Fig.10 Macchina con doppio statore esterno, rotore interno, con cave (a) e senza cave (b)

La macchina con avvolgimenti nelle cave di statore (Fig.10-a) presenta, di norma, minore traferro, cui corrisponde maggiore densità di flusso. Tuttavia, presenta una maggiore ondulazione di coppia e più armoniche spaziali e i denti dello statore possono saturare localmente.

La macchina senza cave e con avvolgimenti sullo statore toroidale (Fig.10-b) ha minore coppia di cogging, minore ondulazione del flusso e minori costi di produzione. Tuttavia, le aumentate dimensioni del traferro comportano una riduzione di densità del flusso e di coppia. I magneti possono essere montati sulla superficie del rotore (Fig.10) oppure annegati nel giogo di rotore (Fig.11).

La prima configurazione ha una lunghezza di traferro maggiore, ma fornisce una maggiore densità di coppia. La stabilità meccanica viene compromessa ad alta velocità, perché i magneti incollati subiscono l'azione crescente della forza centrifuga e potrebbero staccarsi.

La seconda configurazione, invece, è più adatta ad alta velocità, ma presenta un costo di produzione maggiore.

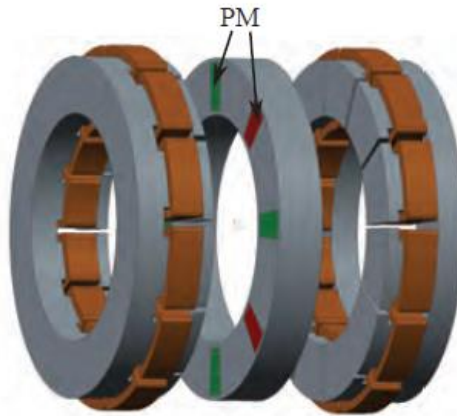


Fig.11 Macchina con doppio statore esterno, rotore interno e magneti annegati nel giogo di rotore

#### Doppio rotore esterno con o senza cave statoriche

La macchina presenta flusso magnetico principale con direzione assiale nei denti di statore e nella sezione toroidale del giogo. Lo spessore del giogo dello statore deve essere tale da evitare saturazione magnetica, dovuta al flusso prodotto dal doppio rotore. Tale soluzione comporta peso più elevato e avvolgimenti più lunghi. Le differenti proprietà per la configurazione con o senza cave statoriche sono analoghe a quelle delle macchine con doppio statore esterno e rotore interno.

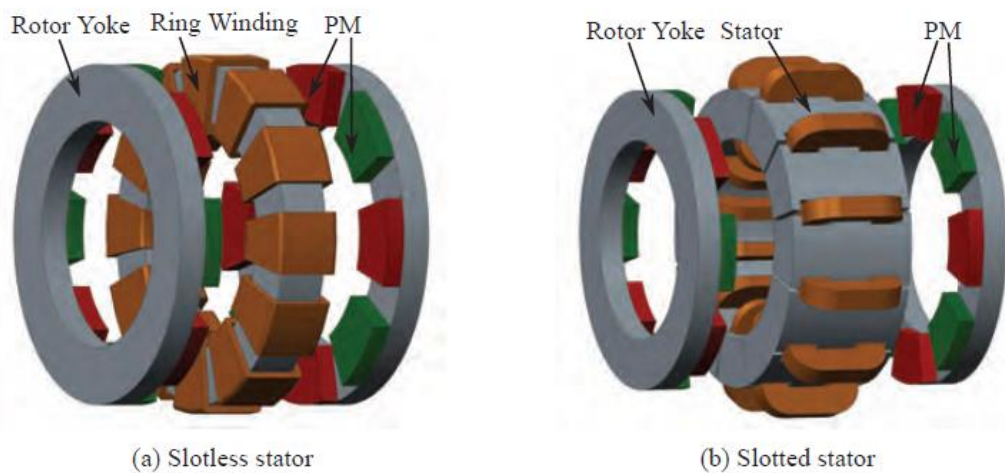


Fig.12 Macchina con doppio rotore esterno, statore interno, senza cave (a) e con cave (b)

### Doppio rotore esterno e senza nucleo di statore

La macchina con statore senza nucleo (Fig.13) è costituita dai soli avvolgimenti polifase, di norma assemblati con resina per migliorarne integrità meccanica e capacità di dissipazione del calore. L'assenza del nucleo statorico permette di raggiungere rendimenti elevati grazie alla lunghezza assiale minore, assenza di perdite nel ferro e di saturazione magnetica di statore. In analogia con la macchina senza cave, la coppia di cogging e l'ondulazione di coppia hanno valori molto bassi.

Gli svantaggi principali sono: difficoltà di assemblaggio, elevate perdite per correnti parassite nei conduttori, grande traferro che causa bassa induttanza di armatura, bassa densità di coppia.



Fig.13 Macchina con doppio rotore esterno, statore interno senza nucleo

# Capitolo 3

## MATERIALI COMPOSITI

L'adozione di materiali alternativi per sostituire quelli attualmente utilizzati nelle applicazioni di conversione elettromeccanica è di grande interesse per quanto riguarda l'aumento del rapporto potenza / peso con basso impatto economico.

Il termine compositi definisce materiali ottenuti artificialmente. Le fasi di cui sono costituiti sono solitamente due, di natura chimica diversa e sono separate fra loro. Sono denominate matrice e fase dispersa, la prima garantisce la coesione del materiale perché trattiene le particelle o le fibre della seconda. La produzione dei compositi consente di sfruttare le differenti proprietà dei materiali componenti.

### 3.1 Soft Magnetic Composite

Tali materiali, noti con l'acronimo S.M.C., si presentano come polvere composta da granuli di ferro, con dimensioni tra 50  $\mu\text{m}$  e 400  $\mu\text{m}$ , singolarmente isolati da un rivestimento in altro materiale, detto layer isolante.

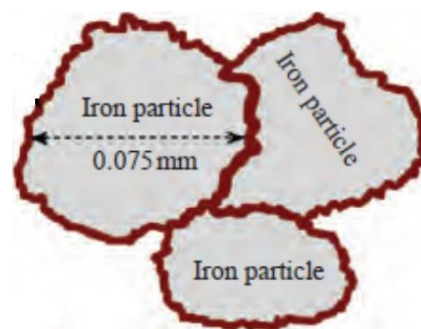


Fig.14 Grani di ferro singolarmente isolati da layer

I grani di ferro devono avere elevata purezza per ottenere una buona permeabilità magnetica e compressibilità tale da garantire una densità del materiale compattato maggiore di 7 g/cm<sup>3</sup>.

Gli S.M.C. vengono distinti in base alla tipologia delle due fasi componenti:

1. polveri di ferro ad elevata purezza e layer costituito da sostanze organiche. Questa classe di compositi, viene di solito realizzata con resine polimeriche ad elevato peso molecolare e termoindurenti. Queste resine presentano struttura lineare che, per effetto del calore, crea legami trasversali tra le molecole realizzando la reticolazione, che conferisce rigidità. Tale caratteristica è responsabile di proprietà meccaniche superiori, quali resistenza e durezza, rispetto ai polimeri termoplastici che, all'aumentare della temperatura, si rammolliscono.

Le resine più utilizzate sono di natura fenolica o epossidica.

- Resina fenolica. Polimero derivato dalla reazione tra fenolo e formaldeide. Si ottiene un materiale molto resistente al calore e alla corrosione, con buone proprietà meccaniche e costo di produzione ridotto.
  - Resina epossidica. Polimero con anelli epossidici, i cui gruppi funzionali  $\text{CH}_2 - \text{O} - \text{CH}_2$ , formano un triangolo equilatero. Si ottiene un materiale con ottime proprietà meccaniche, resistenza al calore e alla corrosione, migliori proprietà dielettriche. Rispetto alle resine fenoliche i principali svantaggi sono la difficoltà di miscelazione dovuta alla consistenza pastosa della resina e il costo di produzione più elevato.
2. polveri di ferro ad elevata purezza e layer costituito da sostanze inorganiche. Questa classe di compositi, ad esempio realizzati con ossido di ferro, fosfato di zinco, fosfato di manganese o fosfato di potassio, prevedono tecnologie produttive differenti:
    - Tecniche a umido con spruzzo superficiale della fase dispersa
    - Tecniche a secco con ossidazione delle polveri di ferro in forni specifici
  3. polveri disponibili in commercio, composte da miscele di ferro ed altri materiali, già predisposte per la pressatura, ad esempio il Somaloy, prodotto da Höganäs, che appartiene alla seconda tipologia. Pur presentando buone proprietà magnetiche ed energetiche, ha limitate prestazioni meccaniche.

Nella sperimentazione oggetto di studio sono state utilizzate polveri del primo tipo, costituite da polvere di ferro ad elevato grado di purezza e resina polimerica fenolica termoindurente.

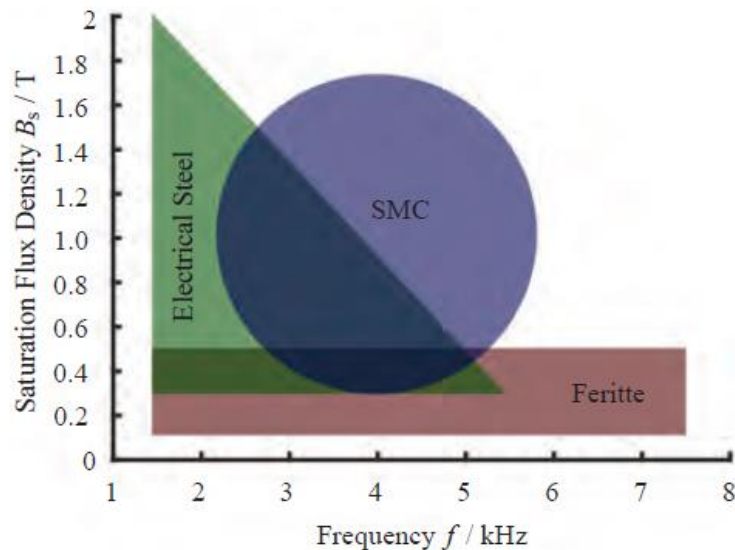


Fig.15 Campi di utilizzo dei materiali ferromagnetici per la realizzazione dei nuclei

La Fig.15 mostra le regioni in cui sono utilizzabili i materiali per la realizzazione dei nuclei ferromagnetici. Si evidenzia come la ferrite dolce, pur avendo una bassa perdita nel ferro ad alta frequenza, richieda un nucleo di grandi dimensioni a causa della bassa induzione di saturazione. Invece, i lamierini hanno una elevata induzione di saturazione, ma non possono essere utilizzati nella regione ad alta frequenza a causa delle eccessive perdite nel ferro. Per contro gli SMC coprono la regione in cui non possono essere utilizzati i due materiali magnetici precedenti.

In genere gli SMC sono ottenuti con la compattazione a freddo oppure con quella a caldo, cui segue il trattamento termico ed eventualmente la ricottura. Rispetto ai tradizionali nuclei di ferro laminato, i vantaggi degli SMC sono molteplici:

- basse perdite per correnti parassite
- basse perdite nel ferro alle medie e alte frequenze
- comportamento ferromagnetico isotropo tridimensionale, che consente al materiale di portare il flusso in tutte le direzioni con le stesse proprietà. Tale caratteristica cambia radicalmente l'approccio di progettazione che passa da una visione del modello magnetico 2D ad una 3D e permette la realizzazione di forme uniche
- minori scarti di lavorazione rispetto alla produzione dei lamierini, la cui tranciatura origina oltre il 40% di materiale scartato
- Diminuzione di peso di circa il 20%
- Riduzione del volume di circa il 36%
- Riduzione dei costi di produzione

- Riciclaggio dello statore, infatti avvolgimenti e nucleo ferromagnetico possono essere separati facilmente

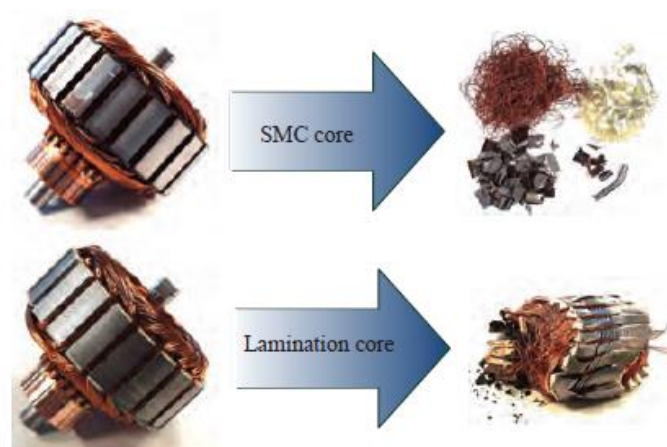


Fig.16 Riciclaggio dello statore nei nuclei in SMC e laminati

Alcuni limiti degli SMC ne impediscono un uso diffuso:

- Perdite per isteresi elevate costituiscono la parte dominante delle perdite nel ferro sia alle basse sia alle alte frequenze
- Bassa permeabilità magnetica dovuta al layer isolante
- Bassa induzione di saturazione
- Proprietà meccaniche inferiori
- Dimensioni geometriche limitate perché la compattazione della miscela richiede elevate pressioni

## 3.2 Plastomagnetni

Le caratteristiche dei magneti permanenti sono rappresentate sul piano cartesiano B-H, in particolare nel secondo quadrante si trova il punto di lavoro. Le condizioni ideali sono soddisfatte da:

- Andamento rettilineo nel quadrante di lavoro
  - Se il punto di lavoro non incontra il ginocchio della curva, il magnete rimane nella zona di reversibilità che ne evita la smagnetizzazione dovuta ad eccessi di f.m.m. per carico gravoso o di reazione d'indotto;
  - Per smagnetizzare il magnete occorre invertire il flusso e quindi lavorare nel terzo quadrante;



- Pendenza minore possibile, cioè permeabilità simile a quella del vuoto  $\mu \approx \mu_0$  quindi  $\mu_0 \cdot |H_c| \approx B_r$

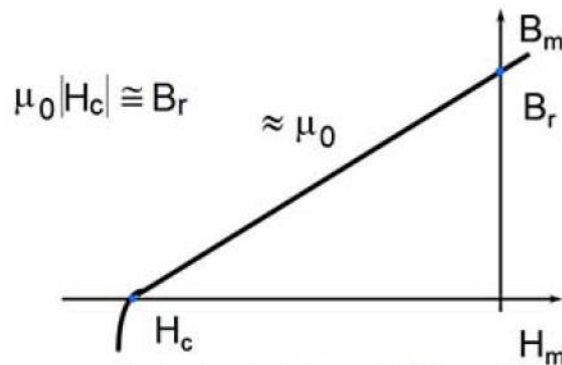


Fig.17 Caratteristica ideale di un magnete permanente

L'uso di plastomagnetni come magneti permanenti è in aumento nelle applicazioni elettromeccaniche di piccole dimensioni perché i magneti in ferrite hanno scarse prestazioni e il processo produttivo con sinterizzazione risulta molto costoso.

I plastomagnetni sono normalmente prodotti mediante processo di compressione o stampaggio ad iniezione che permette di realizzare forme complesse. Il primo è in grado di raggiungere valori di rimanenza più elevata, mentre il secondo è vantaggioso per la produzione industriale perché non richiede ulteriori lavorazioni. È importante sottolineare che i due processi richiedono diversi tipi e percentuali di resina.

Il tipo di polvere di materiale magnetico, la percentuale di resina e il processo produttivo determinano le proprietà magnetiche e meccaniche e di conseguenza il campo di applicazione.

Le resine epossidica e fenolica vengono normalmente adottate per la compressione, mentre la PolyAmide viene utilizzata nello stampaggio a iniezione. Le applicazioni che prevedono alte temperature o ambienti corrosivi necessitano di altri polimeri, come PolyPhtalAmide e PolyPhenylSulfide.

I plastomagnetni compressi neodimio-ferro-boro (NdFeB) rappresentano un'importante alternativa alle ferriti tradizionali, grazie alle maggiori proprietà magnetiche in termini di induzione residua  $B_r$ , campo coercitivo  $H_c$  e massimo prodotto energetico  $(B \cdot H)_{max}$ . Tale prodotto rappresenta l'energia necessaria per smagnetizzare il magnete e corrisponde al rettangolo di maggior area che può essere costruito nel secondo quadrante del piano cartesiano B-H.

La polvere di NdFeB presenta una bassa resistenza alla corrosione e ossidazione per questo motivo al termine della produzione è indispensabile applicare un rivestimento plastico che evita il deterioramento del materiale.

Un problema tipico dei materiali ferromagnetici duri è il loro comportamento al crescere della temperatura, infatti aumenta l'agitazione termica degli atomi che ostacola l'allineamento dei momenti magnetici dei dipoli e ne rende casuali le direzioni. La sensibilità alla temperatura si manifesta con due modalità:

- Reversibile: si osserva deriva termica che comporta variazioni nella caratteristica di magnetizzazione e si esprime in termini di variazione dell'induzione residua  $B_r$  in funzione della temperatura. Il coefficiente di deriva termica è indicato con  $\alpha$  [%/°C].
- Irreversibile: raggiunta la temperatura di Curie, cessa la magnetizzazione e diventa impossibile tornare all'induzione residua  $B_r$  diminuendo semplicemente la temperatura.

	Br (T)	Hc (kA/m)	BHmax (kJ/m <sup>3</sup> )	Temperatura Funzionamento (°C)	Temperatura Curie (°C)	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	$\alpha$ (%/°C)
Ferrite sinterizzata	0,21 ÷ 0,39	135 ÷ 260	8 ÷ 28	200	450	5	-0,2
NdFeB Plastomagnete compresso	0,2 ÷ 0,7	150 ÷ 460	8 ÷ 80	150	360	5,6 ÷ 6	-0,11
NdFeB Sinterizzato	1 ÷ 1,4	760 ÷ 1000	200 ÷ 400	80 ÷ 200	310	7.5	-0,12

Tab.1 Principali differenze tra magneti permanenti

La Tab.1 evidenzia che la ferrite sinterizzata ha le caratteristiche peggiori. In particolare, presenta bassa induzione residua e bassa la conservazione della magnetizzazione all'aumentare della temperatura, pur avendo temperatura di Curie più elevata. Le caratteristiche dei magneti NdFeB sinterizzati sono migliori dei corrispondenti compressi, ma il processo produttivo risulta molto costoso.

# Capitolo 4

## PRODUZIONE MATERIALI S.M.C.

### 4.1 Preparazione delle polveri

#### 4.1.1 Componenti

Tutti i campioni prodotti e studiati risultano costituiti da:

- polvere ferrosa di elevata purezza e contenuto di ossigeno inferiore allo 0,2%.  
Essa risulta particolarmente adatta alla produzione di strutture ad alta densità grazie all'assenza quasi totale di impurità chimiche e alla facile compressione.
- resina fenolica in polvere, polimero derivato dalla reazione tra fenolo e formaldeide.  
È un materiale termoindurente con struttura lineare che, per effetto del calore, crea legami trasversali tra le molecole realizzando la reticolazione, che conferisce rigidità.

#### 4.1.2 Fasi preliminari

Per evitare inalazioni nocive si opera sotto cappa chimica, la cui aspirazione deve essere temporaneamente spenta e lo sportello “sali-scendi” abbassato per evitare eventuali correnti d'aria che potrebbero falsare le misure. Utilizzando il cucchiaino-spatola le due polveri sono messe in un becker, rispettando le seguenti percentuali: 99,8% per ferro e 0,2% per resina fenolica. Per le pesate viene utilizzata la bilancia “Sartorius GP3202” (Fig.18), strumento con portata 3200 g e sensibilità  $\pm 0,01$ g. Per semplificare la procedura le dosi scelte corrispondono sempre a 199,60 g di ferro e 0,4 g di resina fenolica. Per evitare che la resina fenolica aderisca alle pareti del contenitore, alterando le percentuali della futura composizione, è sufficiente inserire nel becker prima la polvere di ferro. Altro accorgimento è quello di inserire la resina all'interno di una concavità ottenuta nella massa della polvere ferrosa.



Fig.18 Massa della polvere ferrosa (a sinistra) e massa complessiva (a destra)

### 4.1.3 Miscelazione

Terminate le fasi preliminari la cappa aspirante viene accesa. Dopo una prima miscelazione mediante il cucchiaio spatola, il contenuto del becker viene versato in un recipiente di plastica con doppio tappo. Terminate le operazioni sotto cappa, è prevista una miscelazione meccanica con la turbula, mescolatore a movimentazione tridimensionale azionato per almeno 30 minuti, per assicurare la perfetta distribuzione della resina nella matrice del ferro.



Fig.19 Turbula

## 4.2 Pressatura

La pressa lavora con l'uso di un software elaborato in ambiente LabView che consente di impostare i valori dell'altezza della camera, della pressione e della velocità del punzone che sono interdipendenti.

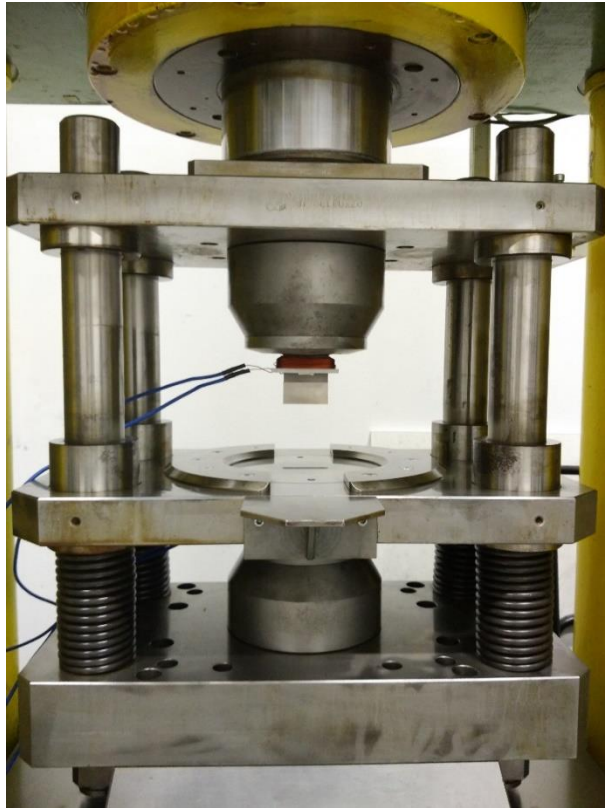


Fig.20 Pressa idraulica

Nei processi industriali, per facilitare l'estrazione dei campioni ottenuti con la pressa, viene addizionata alla miscela una sostanza distaccante. Per evitare che il campione abbia una densità minore rispetto a quella attesa e siano presenti componenti non attivi, è preferibile utilizzare uno spray distaccante da applicare sulle pareti della camera, cioè dello spazio che ospita la miscela da compattare, soltanto al momento della pressatura. La miscela viene inserita fino a riempire completamente la camera, le cui dimensioni sono impostate in funzione del risultato. La successiva pressatura avviene a freddo.

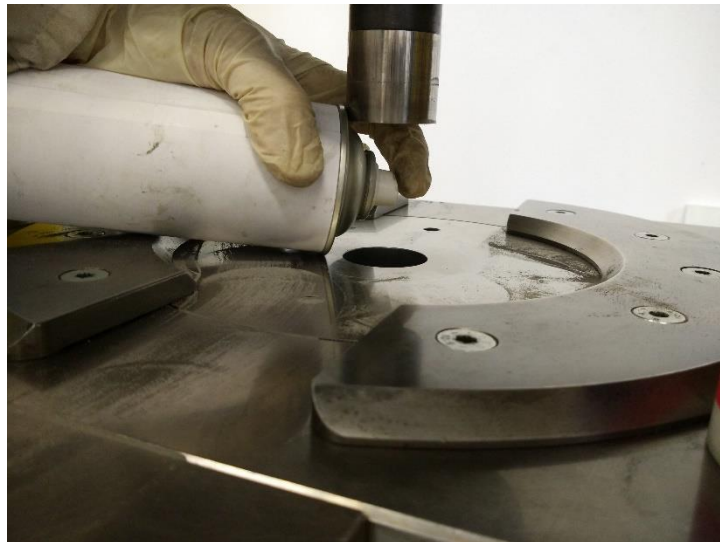


Fig.21 Applicazione del distaccante

Le proprietà magnetiche del campione ottenuto sono legate alla pressione utilizzata durante la compattazione della mescola. Maggiore è la pressione, più alta è la permeabilità magnetica e più basse sono le perdite per isteresi, perché i grani di ferro si dispongono più vicino. Una volta ottenuto il campione si estrae, si misura e si cataloga con una sigla alfanumerica. Al fine di ottenere campioni da sottoporre a sperimentazioni diverse sono state variate:

- Altezza della camera, compresa tra 12,5mm e 33mm
- Pressione applicata dalla pressa compresa tra 400MPa e 700MPa
- Forma dello stampo: cilindro, parallelepipedo ('charpy')
- Presenza o meno di un campo magnetico esterno realizzato con due bobine collegate ad un alimentatore in corrente continua e disposte una sul punzone superiore e l'altra attorno al punzone inferiore della pressa. Tale configurazione permette di applicare un campo magnetico nord-sud oppure nord-nord durante la pressatura.

Per evitare che il surriscaldamento danneggi il supporto in plastica delle bobine, è stata impiegata una corrente di 35A per un tempo 5s.

Il campo magnetico viene creato nell'istante in cui il punzone raggiunge il livello superiore della camera, pena l'attrazione della mescola al di fuori della stessa.

Prima di procedere alla compattazione successiva è indispensabile effettuare la smagnetizzazione delle parti coinvolte cambiando la polarità della corrente nella bobina. Per verificare l'avvenuta smagnetizzazione si ricorre al gaussmetro che deve riportare un valore della densità di flusso magnetico compreso tra  $\pm 5$  mT.

### 4.3 Trattamento Termico

La sola pressatura non conferisce ai campioni le proprietà meccaniche attese, perché la resina non presenta i legami fra le catene che la caratterizzano, dunque manca la reticolazione del polimero. La **cura** (*curing*), cioè il processo di reticolazione della matrice polimerica, si ottiene con trattamento termico. Allo scopo i campioni sono posti in un recipiente di alluminio e messi in un forno industriale alla temperatura di 150 °C per 30 minuti.



Fig.22 Forno industriale per trattamento termico

Dopo il trattamento termico, di ogni campione viene misurata la massa con una bilancia di precisione con sensibilità  $10^{-4}$ g, che dispone di una copertura di vetro per ridurre eventuali errori di misura dovuti a correnti d'aria.

# Capitolo 5

## TERMOGRAFIA

### 5.1 Irraggiamento

L'irraggiamento, insieme a conduzione e convezione, è uno dei tre modi con cui l'energia termica si trasferisce tra due corpi a temperatura diversa.

Caratteristica unica dell'irraggiamento è la possibilità di avvenire nel vuoto. Il vettore che realizza la propagazione di calore è la radiazione elettromagnetica, emessa da ogni corpo materiale che possiede temperatura maggiore dello zero assoluto. Invece, la trasmissione del calore per conduzione o convezione avviene da un mezzo a temperatura più alta verso uno con temperatura più bassa.

Il modello di corpo nero è utile per risolvere analiticamente il problema del calcolo dell'emissione monocromatica emisferica di un corpo, definita come la potenza termica emessa per unità di area emittente associata ad una lunghezza d'onda  $\lambda$ .

La banda di lunghezze d'onda alla quale avviene lo scambio termico per irraggiamento è compresa tra 0,1 e 100  $\mu\text{m}$ .

Il corpo nero è normalmente utilizzato come riferimento per enunciare le proprietà dei corpi ed ha le seguenti caratteristiche:

- Data temperatura e lunghezza d'onda emette il massimo flusso di radiazione
- La radiazione emessa cambia con la temperatura e la lunghezza d'onda, ma non con la direzione di emissione, quindi ha emissione diffusa di pari intensità in ogni direzione
- Assorbe completamente ogni radiazione che arriva su di essa, indipendentemente da direzione di provenienza e da lunghezza d'onda

La caratteristica emissiva di un corpo nero è completamente nota se si conosce la sua temperatura. Associando a  $\lambda_{max}$  il valore della lunghezza d'onda a cui si ha il picco di emissione per una certa temperatura è possibile ottenere il luogo dei punti descritto dalla legge di Wien:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2897.6 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$



Un corpo nero a temperatura ambiente, a cui è associata  $T=298K$ , presenta un picco di radiazione emessa a  $\lambda_{max} = 9,72 \mu m$ , nel campo infrarosso dello spettro. La radiazione infrarossa, pur non essendo percepita dall'occhio umano, può essere rilevata da telecamere sensibili all'infrarosso, che permettono di rilevare la temperatura superficiale di un corpo. La legge di Stefan-Boltzmann consente di ottenere il potere emissivo totale del corpo nero dato dall'integrale sullo spettro del potere emissivo monocromatico del corpo nero  $e_{\lambda,N}$  :

$$E_N = \int_{\lambda} e_{\lambda,N} d\lambda = \sigma \cdot T^4$$

Dove  $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$  è il coefficiente di Stefan-Boltzmann e  $T$  è la temperatura assoluta della superficie in K. Si noti che  $E_N$  rappresenta la potenza radiante emessa da un corpo nero per unità di area superficiale per una data temperatura  $T$ .

I corpi reali non hanno le caratteristiche del corpo nero e vengono modellizzati dal corpo grigio per cui si introduce una grandezza nota come emissività emisferica che ne mette in relazione il comportamento alla stessa temperatura:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_N}$$

## 5.2 Misura termografica

Un flusso magnetico che attraversa per breve tempo un campione di materiale ferromagnetico determina variazioni di temperatura dovute a perdite nel ferro quantitativamente diverse.

Il calcolo delle perdite nel ferro di un materiale ferromagnetico viene di norma realizzato tramite prova a vuoto, che permette di ricavarne il valor medio. Il limite di tale metodo consiste nell'ipotizzare che ciascun elemento infinitesimo abbia le stesse perdite nel ferro per unità di massa, trascurando eventuali zone disomogenee.

La tecnica di misurazione della termografia, che sfrutta il calore trasmesso per irraggiamento, permette, invece, di evidenziare la distribuzione delle perdite nel ferro, sebbene con incertezze più elevate. Prevede l'uso di una termocamera il cui sensore registra le onde elettromagnetiche infrarosse uscenti dal campione. Di queste occorre distinguere quelle emesse, cioè effettivamente legate alle perdite nel ferro e quelle riflesse, cioè provenienti dall'ambiente esterno. Per non inficiare la misurazione con le radiazioni riflesse dal campione, occorre verniciare la superficie in nero opaco.

Le prove termografiche prevedono di porre il campione in ambiente con temperatura costante e verniciato in nero opaco in modo da limitare la presenza della radiazione infrarossa, sia diretta che riflessa, dell'ambiente circostante.

La misurazione prevede un ciclo, ripetuto N volte per diminuire l'incertezza, con due fasi:

- **Eccitazione.** Il flusso magnetico, generato dalla corrente elettrica che percorre il filo conduttore che avvolge il campione in esame, determina perdite nel ferro. Il fenomeno provoca variazioni termiche superficiali con emissione di raggi infrarossi rilevati dalla termocamera per ciascun punto della superficie inquadrata. Gli incrementi delle temperature superficiali sono correlati alle perdite nel ferro per mezzo di un coefficiente.
- **Raffreddamento.** Un'apposita ventola provvede a riportare la superficie riscaldata del campione a temperatura ambiente prima della successiva eccitazione.

Per eseguire correttamente la misurazione vengono impostati i seguenti parametri:

- Campione posizionato sempre nello stesso modo e alla stessa distanza dalla termocamera per evitare il calcolo analitico dei fattori di forma e avere un'ottimale risoluzione delle immagini
- Emissività, relaziona il comportamento termico del campione con quello del corpo nero
- Range di temperature opportunamente impostato per avere termogrammi significativi
- Messa a fuoco dell'inquadratura

## 5.1 Valutazione delle perdite nel ferro

L'immagine del campione, ripreso dalla termocamera durante la fase di eccitazione per misurare l'incremento delle temperature dei punti dell'intera superficie, risulta suddivisa in un numero di pixel legato alla risoluzione dello strumento. Si presenta come una matrice i cui punti hanno coordinate x e y e ciascuno di essi è associato ad un pixel del sensore. Le relative dimensioni sono talmente piccole da poter essere identificate come un singolo punto.

I metodi di misura adottati sono:

- Misurazione con eccitazione di lunga durata
- Misurazione con eccitazione di breve durata

Considerando che la distribuzione delle perdite nel ferro non è omogenea, vengono calcolati i coefficienti angolari della retta, che corrisponde all'incremento di temperatura, per ogni punto di coordinate  $x$  e  $y$  dell'immagine.

In particolare, il coefficiente angolare è direttamente proporzionale alle perdite specifiche nel ferro ( $W_{fe,x,y}$ ), delle quali dà una stima in W/Kg :

$$W_{fe,x,y} = k \cdot a_{x,y}$$

$k$ : coefficiente di proporzionalità fra pendenza della retta e perdite specifiche, ottenuto per via sperimentale con prova a vuoto.

In ogni ciclo eccitazione-raffreddamento, di ambedue i metodi di misurazione, si riscontrano diverse pendenze della retta e dunque diversi valori puntuali delle perdite nel ferro. Per ovviare è necessario effettuare la media dei valori ottenuti nei diversi cicli per ogni punto di coordinate  $x$  e  $y$ .

$$W_{fe,x,y} = k \cdot \sum_{n=1}^N a_{x,y}(n)$$

Per ottenere un'immagine termica qualitativamente migliore, cioè senza sgranatura dovuta all'influenza ambientale, occorre stabilire un congruo numero di cicli  $N$ .

Nella misurazione con eccitazione di lunga durata sono sufficienti circa 30 cicli.

Nella misurazione con eccitazione di breve durata sono necessari almeno 250-300 cicli. Il numero di cicli risulta maggiore perché nel tempo previsto per l'eccitazione è difficile rilevare le variazioni di temperatura effettivamente legate alle perdite nel ferro.

I risultati ottenuti consentono di valutare differenze e scostamenti, non soltanto tra i due metodi ma anche rispetto alla prova a vuoto.

## 5.2 Misurazione con eccitazione di lunga durata

Il ciclo riscaldamento-raffreddamento impostato ha una durata di 100 secondi.

La fase di eccitazione dura da 8 a 12 secondi, durante i quali vengono registrate  $382 \times 288$  temperature che compongono l'immagine, una per ogni secondo. Il risultato è una matrice 3D. Segue la fase di raffreddamento di durata sufficiente a riportare il campione alla temperatura ambiente.

Se si considera un singolo punto dell'immagine, è possibile rappresentare su un piano cartesiano l'andamento della sua temperatura in funzione del numero di secondi di eccitazione (Fig.23). I valori di temperatura sono interpolati linearmente punto per punto tramite metodo dei minimi quadrati. Il risultato è l'equazione di una retta che interpola i dati in modo da minimizzare lo scarto quadratico tra i dati stessi e la retta di interpolazione.

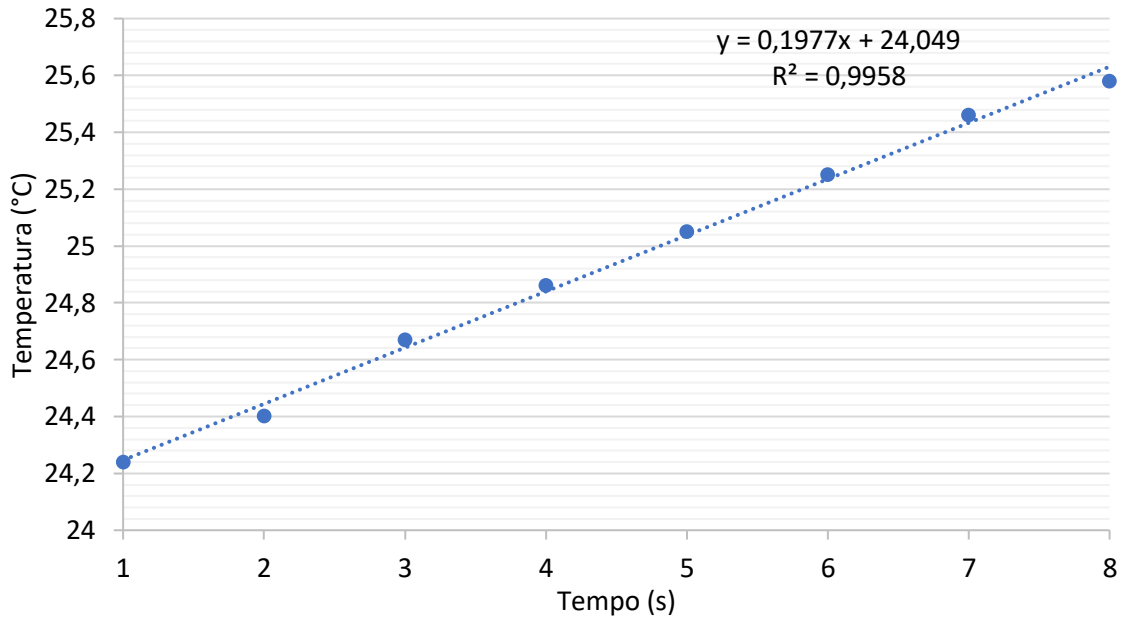


Fig.23 Andamento della temperatura in un punto della superficie del campione durante la fase di eccitazione.

Nel piano cartesiano temperatura – tempo tale retta ha equazione identificata dalla:

$$T_{x,y}(t) = a_{x,y} \cdot t + b_{x,y}$$

- $T_{x,y}(t)$ : temperatura misurata dal pixel di coordinate  $x$  e  $y$  all'istante di tempo  $t$  dall'inizio della fase di eccitazione
- $a_{x,y}$ : coefficiente angolare della retta
- $b_{x,y}$ : intercetta della retta, cioè temperatura del materiale all'inizio della fase di eccitazione

### 5.2.1 Sistema di misura

Il sistema adottato per la misurazione con eccitazione di lunga durata è rappresentato in Fig.24 e comprende:

- Alimentatore combinato con un generatore di segnali, regolabile in frequenza e ampiezza, che consente di ottenere una forma d'onda sinusoidale ai suoi morsetti.
- Interruttore magnetotermico di bassa tensione immediatamente a valle dell'uscita dell'alimentatore, utilizzato come dispositivo di sezionamento
- Microcontrollore gestito da PC
- Relè comandato da microcontrollore, che rende automatica l'alternanza dei cicli eccitazione-raffreddamento
- Interruttore statico comandato da microcontrollore, che alimenta la ventola soltanto nella fase di raffreddamento
- Alimentatore DC per la ventola di raffreddamento
- Ventola di raffreddamento
- Termocamera
- PC portatile collegato tramite interfaccia USB al microcontrollore e con un'altra interfaccia USB alla termocamera
- Software in linguaggio LabVIEW, permette di impostare la durata di eccitazione, la durata totale del ciclo e l'anticipato spegnimento della ventola che, per inerzia, trasmetterebbe il calore per convezione nella fase di eccitazione

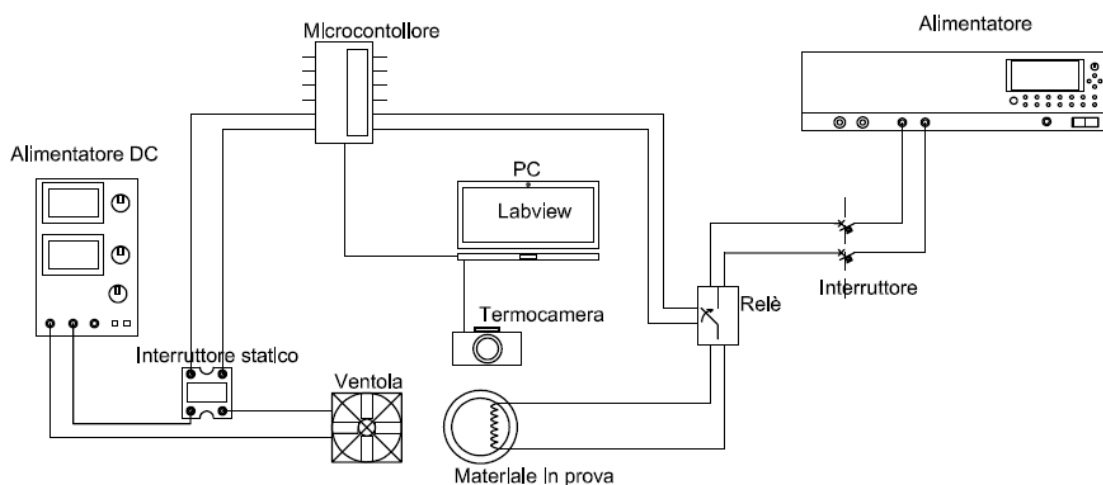


Fig.24 Schema di collegamento apparecchiature per misurazione con eccitazione di lunga durata

Nella prova con eccitazione di lunga durata, i dati relativi alle temperature, acquisiti per ogni secondo di eccitazione, sono salvati in una matrice all'interno di un file di testo. Ogni valore di temperatura nella matrice corrisponde a un pixel del sensore della termocamera. Il calcolo delle perdite nel ferro viene realizzato tramite uno script in linguaggio MatLab sviluppato in un precedente lavoro di tesi [5].

## 5.3 Misurazione con eccitazione di breve durata

Il ciclo riscaldamento-raffreddamento impostato ha una durata di 20 secondi.

La fase di eccitazione dura un secondo, durante il quale vengono registrate  $382 \times 288$  temperature che compongono l'immagine.

Segue la fase di raffreddamento di 19 secondi, sufficienti a riportare il campione alla temperatura ambiente.

La procedura prevede di salvare un'immagine appena prima della fase di eccitazione del campione e un'altra subito dopo. Lo scopo è di ottenere il coefficiente angolare della retta per differenza fra le due acquisizioni.

$$a_{x,y} = T_{1,x,y} - T_{0,x,y}$$

- $T_{0,x,y}$ : temperatura misurata dal pixel di coordinate x e y all'istante di tempo iniziale, prima della fase di eccitazione
- $T_{1,x,y}$ : temperatura misurata dal pixel di coordinate x e y dopo un secondo, cioè alla fine dell'eccitazione
- $a_{x,y}$  : coefficiente angolare della retta

### 5.3.1 Sistema di misura

Il sistema adottato per la misurazione con eccitazione di breve durata (Fig.25) prevede alcune modifiche rispetto al sistema precedente. L'alimentatore viene collegato al PC tramite interfaccia IEEE 488.2 per cui viene eliminato il relè controllato e l'alternanza delle fasi di eccitazione e raffreddamento viene gestita direttamente dal software LabVIEW.

La procedura prevede di salvare un'immagine appena prima della fase di eccitazione del campione e un'altra subito dopo. Lo scopo è di ottenere il coefficiente angolare della retta per differenza fra le due acquisizioni.

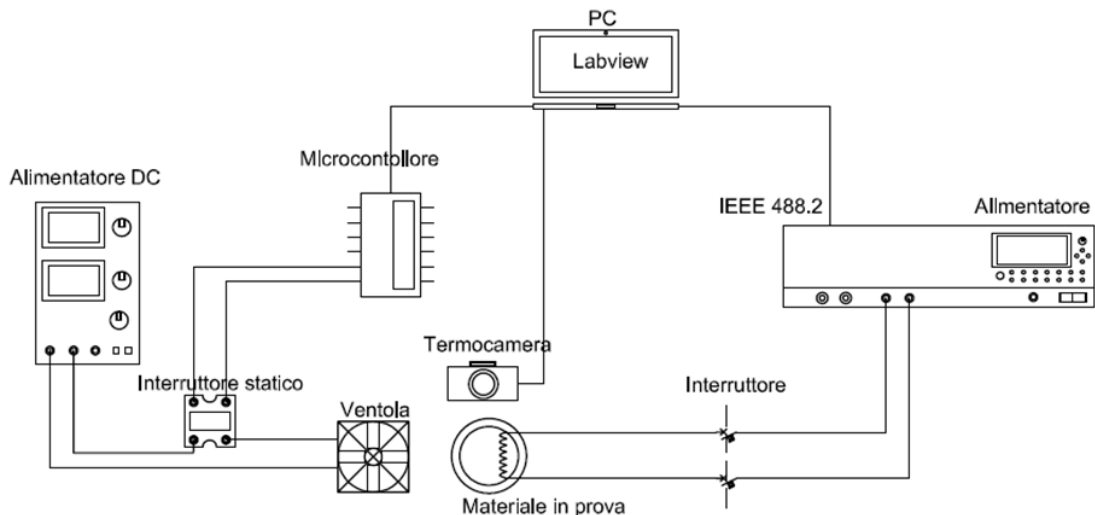


Fig.25 Schema di collegamento apparecchiature per misurazione con eccitazione di breve durata

Il software LabVIEW esegue una parte dell'elaborazione dati:

- calcolo della differenza tra le temperature acquisite appena prima e subito dopo la fase di eccitazione, differenza che rappresenta la pendenza della retta;
- calcolo della media delle pendenze ottenute nei cicli realizzati;
- salvataggio, al termine di ogni ciclo, dei dati in formato matriciale in un file di testo; Ogni cella della matrice corrisponde al coefficiente angolare medio della retta per ogni pixel inquadrato dalla termocamera.

La restante parte dell'elaborazione dati, ovvero il calcolo delle perdite nel ferro e della loro distribuzione sulla superficie del campione, viene trattata con un breve script in linguaggio MatLab. Il programma sviluppato consente la visualizzazione dell'immagine termica delle perdite nel ferro e il calcolo del valor medio, con esclusione dei valori relativi allo sfondo e all'avvolgimento di eccitazione se inquadrato.

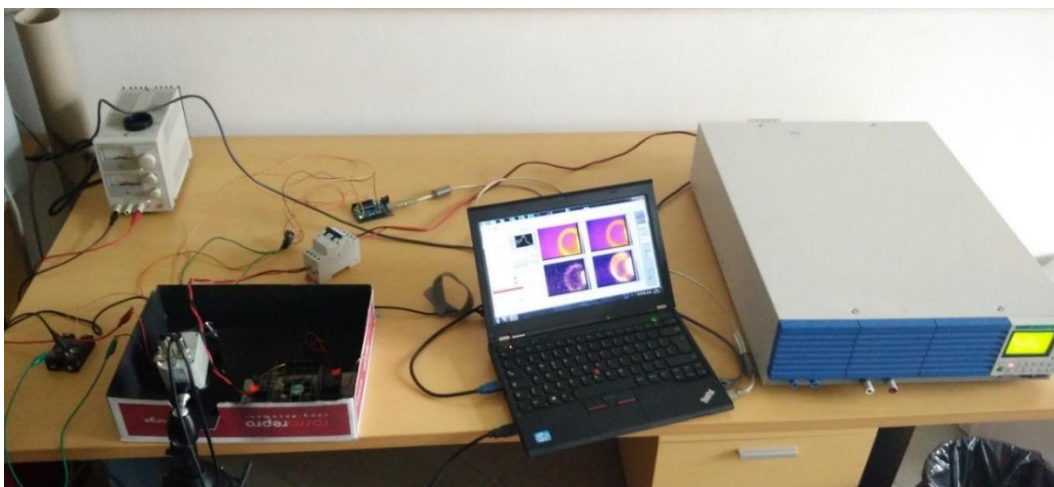


Fig.26 Banco di prova con strumentazione per misurazione con eccitazione di breve durata

## 5.4 Coefficiente $k$ di proporzionalità

Ipotizzando di isolare un elemento infinitesimo di materiale e di trascurare gli scambi di calore per convezione e conduzione, si deduce la relazione fra quantità di calore scambiato per irraggiamento:

$$dQ_{irr} = m \cdot c_s \cdot dT$$

- $m$ : massa dell'elemento infinitesimo
- $c_s$ : calore specifico
- $dT$ : variazione di temperatura

Dividendo per la massa  $m$  e per l'intervallo di tempo  $dt$ , durante il quale avviene lo scambio termico, per ottenere l'energia trasmessa per irraggiamento per unità di massa:

$$W_{irr} = \frac{dQ_{irr}}{m \cdot dt} = c_s \cdot \frac{dT}{dt}$$

La relazione è simile a quella con cui vengono calcolate le perdite specifiche nel ferro in ogni punto del materiale:

$$W_{fe,x,y} = k \cdot a_{x,y}$$

Le relazioni appena descritte non sono riferite alle condizioni stazionarie di irraggiamento, ma sono utili per valutare in condizioni variabili le radiazioni emesse.

In condizioni ideali  $k$  corrisponde al calore specifico del materiale, nella realtà la dipendenza del coefficiente di proporzionalità  $k$  dal valore di emissività della superficie è influenzata da altri fattori, tra cui:

- sensibilità termica della termocamera
- emissività non unitaria della superficie che preclude una corretta relazione fra l'effettiva potenza emessa durante la fase di eccitazione e l'irradianza ricevuta dalla termocamera

Di conseguenza è indispensabile ricavare  $k$  per via sperimentale con le seguenti operazioni:

- Prova a vuoto con frequenza 500Hz, picco di induzione 1T e tensione sinusoidale per ottenere il valore medio delle perdite specifiche nel ferro ( $W_{fe, a vuoto}$ )
- Prova con metodo termografico in cui  $k=1$ , previa scelta di una zona di riferimento sulla superficie del materiale per ottenere la media dei coefficienti angolari delle rette ( $a_{medio,k=1}$ )
- Calcolo del rapporto:  $k = \frac{W_{fe, a vuoto}}{a_{medio,k=1}}$



## 5.5 Preparazione dei campioni

I campioni sono realizzati in SMC con la stessa procedura descritta nel Capitolo 4.

### 5.5.1 Fresatura

I campioni cilindrici ottenuti tramite pressatura devono essere opportunamente sagomati al fine di realizzare un circuito magnetico, prima di essere testati.

Per lavorare a freddo la superficie del campione cilindrico e dargli il profilo desiderato è stata utilizzata una fresatrice a controllo numerico. Tale macchina utilizza utensili rotanti a tagli multipli, detti fresa, con asportazione di truciolo. La fresa si muove sugli assi y e z mentre il banco di lavoro, su cui è ancorato il campione, si sposta sull'asse delle x. Per il tipo di lavorazione desiderata si utilizza una fresa di diametro 4 mm che consente di ottenere raccordi di raggio pari a 2 mm.

I campioni ottenuti sono di due tipi: toroide e nucleo magnetico simile a trasformatore monofase per valutare l'isotropia. Il primo dei due risulta pronto per la fase successiva di verniciatura, il secondo, invece, deve essere sottoposto a ulteriori passaggi prima e dopo la fresatura.

### 5.5.2 Verniciatura

La superficie alquanto lucida dei materiali ferromagnetici compositi si contraddistingue per bassi valori di emissività e alta riflettività della radiazione infrarossa che inficiano la misurazione termografica. Per ottenere misure più attendibili i campioni devono essere verniciati di nero opaco.

Prima di procedere alla verniciatura è necessario rimuovere ogni traccia di resina, distaccante e bave, eventualmente presenti sui campioni, con carta vetrata a grana fine. La superficie liscia e uniforme facilita l'adesione della vernice nera e rende omogenea la sua emissività che sale a 0,90.

### 5.5.3 Avvolgimento

I profili toroide e i campioni per la valutazione dell'isotropia devono essere avvolti da conduttori che si differenziano per numero di spire.

## 5.6 Produzione dei campioni cilindrici toroidi

I tre campioni cilindrici, risultato di tre sequenze diverse di operazioni, sono catalogati con una sigla alfanumerica nella quale il primo termine indica il tipo di resina, il secondo la percentuale di resina, il terzo la pressione applicata, segue l'acronimo AFM per Axial Flux Machine ed infine NoM: campo magnetico non applicato, M campo magnetico applicato in direzione della pressatura, MO campo magnetico applicato in direzione radiale.

Nel caso specifico la resina è fenolica, la percentuale della resina è 0,2%, la pressione applicata è 500MPa.

Per ottenere campioni di altezza prevista 5mm si deve impostare una camera pari 12,5mm.



Fig.27 Campione toroide sagomato

**Campione numero 1 = B 8.2 AFM NoM**

La realizzazione del campione B 8.2 AFM NoM, prevede assenza di campo magnetico applicato durante la pressatura.

**Campione numero 2 = B 8.2 AFM M**

La realizzazione del campione B 8.2 AFM M, prevede campo magnetico applicato nella direzione della pressatura. Il campo magnetico esterno è realizzato con due bobine collegate ad un alimentatore in corrente continua e disposte una sul punzone superiore e l'altra attorno al punzone inferiore della pressa. La configurazione nord-sud delle due bobine permette di applicare un campo magnetico nella direzione della pressatura.

### Campione numero 3 = B 8.2 AF MO

La realizzazione del campione B 8.2 AFM MO, prevede campo magnetico applicato in direzione radiale. Il campo magnetico esterno è realizzato con due bobine collegate ad un alimentatore in corrente continua e disposte una sul punzone superiore e l'altra attorno al punzone inferiore della pressa. La configurazione nord-nord delle due bobine permette di applicare un campo magnetico in direzione radiale.

Tutti e tre i campioni sono sottoposti allo stesso tipo di fresatura per ottenere la medesima forma toroide.

### 5.6.1 Avvolgimento del toroide

L'avvolgimento del toroide prevede tre passaggi:

- Copertura del toroide con nastro isolante nero in corrispondenza della superficie interessata dall'avvolgimento
- Inserimento di una porzione di guaina in gomma per cavi elettrici in corrispondenza della superficie avvolta, che risulta così isolata termicamente dall'avvolgimento di eccitazione che si scalda al passaggio della corrente. Occorre evitare il trasferimento del calore al toroide per conduzione, perché altera le misure termografiche
- Avvolgimento di eccitazione attorno alla guaina in gomma, realizzato con un filo di rame smaltato, lungo 2m e con sezione 0,6mm<sup>2</sup>, prelevato da un rocchetto e lavorato in modo da ottenere 55 spire



Fig.28 Avvolgimento campione toroide per misura termografica

## 5.7 Produzione dei campioni per valutare l'isotropia

I campioni sagomati in modo da avere circuito magnetico simile a quello di un trasformatore monofase a due colonne sono realizzati a partire da due cilindri di diametro 40mm. Essi sono catalogati con una sigla alfanumerica nella quale il primo termine indica il tipo di resina, il secondo la percentuale di resina, il terzo la pressione applicata, segue l'acronimo AFM per Axial Flux Machine ed infine NoM: campo magnetico non applicato, M campo magnetico applicato in direzione della pressatura.

Nel caso specifico la resina è fenolica, la percentuale della resina è 0,2%, la pressione applicata è 400MPa. Viene scelta una pressione di compattazione inferiore rispetto ai toroidi per rendere più evidente l'effetto dell'applicazione del campo magnetico durante la pressatura.

Per ottenere campioni di altezza prevista 13mm si deve impostare una camera pari 33mm.

### Campione numero 1 = B 8.1 AFM NoM

La realizzazione del campione B 8.1 AFM NoM, prevede assenza di campo magnetico applicato durante la pressatura.

### Campione numero 2 = B 8.1 AFM M

La realizzazione del campione B 8.1 AFM M, prevede campo magnetico applicato in direzione della pressatura. Il campo magnetico esterno è realizzato con due bobine collegate ad un alimentatore in corrente continua e disposte una sul punzone superiore e l'altra attorno al punzone inferiore della pressa. La configurazione nord-sud delle due bobine permette di applicare un campo magnetico nella direzione parallela alla pressatura.



Fig.29 Struttura di un campione in S.M.C. utilizzato per valutare l'isotropia con misura termografica

Nella sagoma (Fig.29) le due dimensioni lunghezza e larghezza corrispondono rispettivamente a giogo e colonna.

Tutti i campioni sono sottoposti allo stesso tipo di lavorazione (sagomatura) per ottenere la medesima forma (Fig.30). Il cilindro viene tagliato per mezzo di una lama (2,3mm di spessore) montata sulla fresatrice per ottenere un campione di lunghezza pari a 36mm. La fresatura successiva consente di ottenere la sagoma desiderata di larghezza 13mm che sarà poi tagliata dal resto del cilindro in modo che risulti spessa 3mm.

### 5.7.1 Avvolgimento dei campioni

L'avvolgimento del campione prevede tre passaggi:

- Copertura della colonna e di parte dei gioghi contigui con nastro isolante nero e carta kepton
- Inserimento di una porzione di guaina in gomma per cavi elettrici in corrispondenza della colonna e di parte dei gioghi contigui, che risultano isolati termicamente dall'avvolgimento di eccitazione che si scalda al passaggio della corrente. Occorre evitare il trasferimento del calore al nucleo magnetico per conduzione perché altera le misure termografiche
- Avvolgimento di eccitazione attorno alla guaina in gomma sulla colonna, realizzato con un filo di rame smaltato, lungo 1m e con sezione 0,6mm<sup>2</sup>, prelevato da un rocchetto e lavorato in modo da ottenere 40 spire

Il minor numero di spire rispetto ai toroidi è legato alle ridotte dimensioni dei campioni rispetto ai toroidi.



(a)

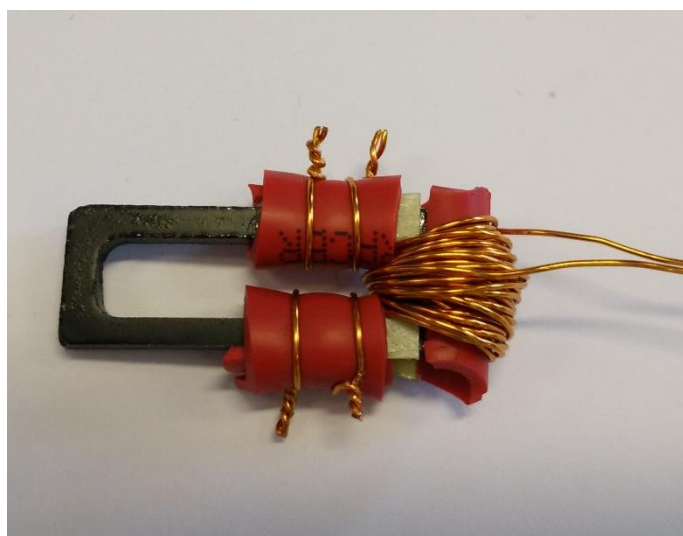
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig.30 La sequenza si riferisce al campione con nucleo magnetico simile a trasformatore monofase: predisposizione della pressa (a); taglio del cilindro (b); sagomatura con fresa (c); campione in fase di lavorazione (d); campione verniciato di nero opaco e avvolto per misura termografica (e).

# Capitolo 6

## STUDIO DEI MATERIALI SMC

### 6.1 Caratterizzazione dei toroidi

I tre campioni toroidali in studio sono gli stessi precedentemente descritti nel capitolo 5.6 e vengono opportunamente preparati per la caratterizzazione magnetica a vuoto.

L'avvolgimento del toroide prevede tre passaggi:

- Copertura del toroide con nastro isolante nero per impedire che gli spigoli vivi possano danneggiare l'isolante del conduttore evitando così il contatto elettrico tra spire differenti degli avvolgimenti e nucleo del toroide
- Avvolgimento secondario realizzato con un filo di rame smaltato, lungo 3m e con sezione 0,25mm<sup>2</sup>, prelevato da un rocchetto e lavorato in modo da ottenere 100 spire equidistanti e non sovrapposte (Fig.31). Lo scopo è di limitare al minimo i flussi dispersi che possono falsare i dati della caratterizzazione.



Fig.31 Avvolgimento secondario del campione toroide

- Avvolgimento primario costituito da un filo di rame isolato in PVC, lungo 7m e con sezione 0,5mm<sup>2</sup>, lavorato in modo da ottenere 200 spire in totale su tre strati. Infatti per avere un distribuzione uniforme si procede ad un primo strato di 75 spire, cui segue un secondo strato sempre di 75 spire ed infine l'ultimo strato di 50 spire (Fig.32).



Fig.32 Avvolgimento primario del campione toroide

La prova a vuoto per la caratterizzazione dei toroidi prevede l'uso di:

- Alimentatore combinato
- Sonda effetto Hall "A6302" Tektronix e amplificatore di segnale programmabile "TM502A" Tektronix con funzione "DeGauss autobalance"
- Interruttore magnetotermico di bassa tensione immediatamente a valle dell'uscita dell'alimentatore, utilizzato come dispositivo di sezionamento
- Scheda di acquisizione dati multifunzionali "NI USB-6211" NATIONAL INSTRUMENTS, compatibile con LabView
- PC portatile collegato tramite interfaccia USB alla scheda di acquisizione dati
- Software in linguaggio LabVIEW



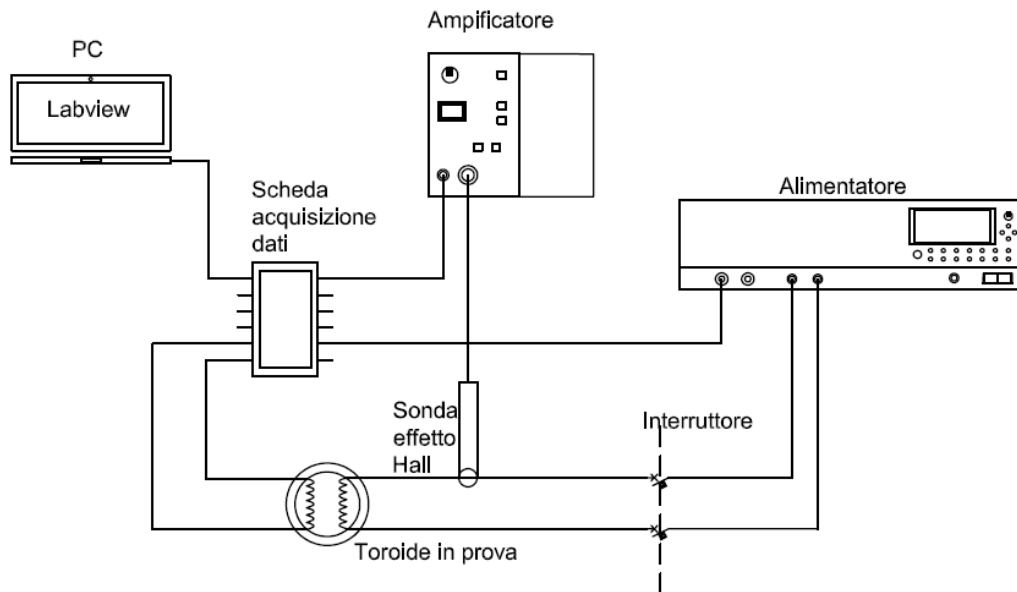


Fig.33 Schema di collegamento apparecchiature per caratterizzazione magnetica a vuoto

La corrente elettrica che scorre nell'avvolgimento primario, fornita dall'alimentatore combinato, è misurata da una sonda ad effetto Hall, combinata all'amplificatore programmabile. Essa genera un flusso magnetico nel campione toroide che concatena l'avvolgimento secondario e induce una f.e.m. ai suoi capi.

La scheda di acquisizione dati, collegata al PC, riceve i segnali di corrente a primario dalla sonda effetto Hall e di tensione a vuoto del secondario. L'integrazione della tensione misurata ai capi dell'avvolgimento secondario consente di ricavare il flusso magnetico.

L'elaborazione dei dati viene effettuata tramite il software LabVIEW e permette di ottenere la caratterizzazione completa del campione toroide in esame.

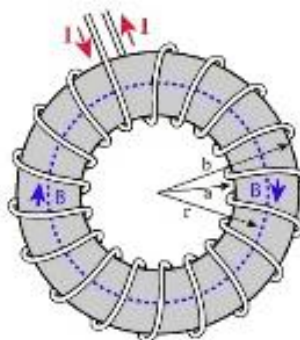


Fig.34 Schema toroide in prova

Prima di iniziare la misurazione è necessario l'uso del software LabVIEW per impostare:

- dati del campione: composizione del materiale, dati geometrici, massa, numero spire del primario e del secondario
- Frequenza e valori massimi di corrente (massimo 3A)
- Frequenza e valori massimi di campo magnetico (massimo 6000A/m per tutte le frequenze, tranne per la prova a 50Hz con limite 10000A/m)
- Modalità "Senza distorsione" che garantisce una forma d'onda di tensione sinusoidale con THD (*Total Harmonic Distorsion*) inferiore all'1% in modo da avere flusso con THD pari o inferiore.

L'intervallo di frequenze studiato è il seguente:

1Hz, 10Hz SD, 20Hz SD, 50Hz SD, 100Hz SD, 150Hz SD, 200Hz SD, 250Hz SD, 300Hz SD, 400Hz SD, 500Hz SD.

La sigla SD indica l'acquisizione dati senza distorsione.

Al termine della misurazione, avviata con il tasto "Acquisisci", il programma LabVIEW rende disponibili in un'unica videata le curve che descrivono:

- Caratteristica di prima magnetizzazione (induzione B - campo magnetico H)
- ciclo di isteresi
- permeabilità magnetica  $\mu$  in funzione di H
- perdite specifiche in funzione di B
- perdite specifiche in funzione della frequenza f

## 6.2 Coercività

La coercività è l'intensità del campo magnetico inverso che viene applicato ad un materiale ferromagnetico per annullarne la magnetizzazione una volta raggiunta la saturazione. Nel SI l'unità di misura viene espressa in A/m, usualmente indicata con  $H_c$ .

Lo strumento in uso è "Koerzimat 1.095", utile per misurare rapidamente il campo coercitivo di materiali ferromagnetici dolci. Dispone di una bobina con schermatura ad alta permeabilità che consente di limitare l'influenza del campo magnetico terrestre e di altri campi magnetici, statici e dinamici, eventualmente presenti nelle vicinanze.



Fig.35 Koerzimat 1.095

### 6.2.1 Produzione dei campioni 'charpy'

I campioni sono realizzati in SMC con la stessa procedura descritta nel Capitolo 4.

I dodici campioni 'charpy' ottenuti sono catalogati con una sigla alfanumerica incisa sulla superficie. Il primo termine indica il tipo di resina, il secondo la percentuale di resina, il terzo la pressione applicata, segue l'acronimo AFM per Axial Flux Machine per campo magnetico non applicato, M campo magnetico applicato in direzione della pressatura, MO campo magnetico applicato in direzione opposta alla pressatura.

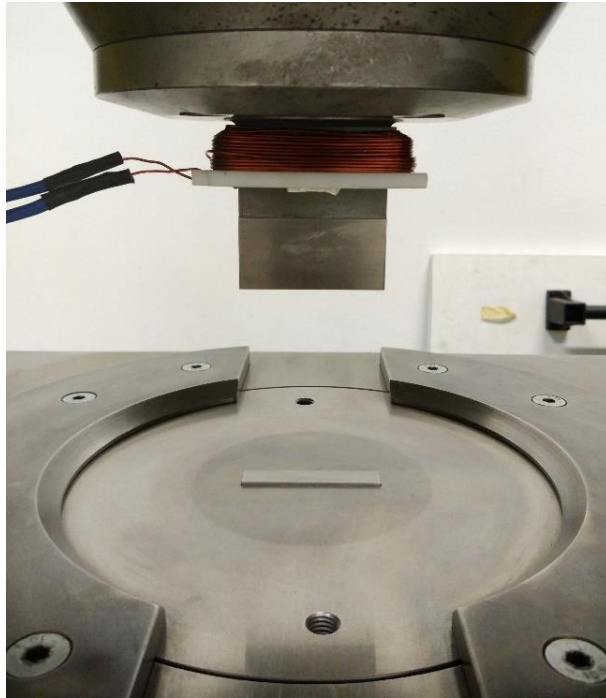


Fig.36 Particolare della pressa con stampo charpy

Nel caso specifico la resina è fenolica, utilizzata al 0,2% in peso.

Per ottenere campioni di altezza prevista 10mm si deve impostare una camera pari 25mm con pressioni di 400MPa e 500MPa. Per ottenere campioni di altezza prevista 10mm si deve impostare una camera pari 26mm con pressioni di 600MPa e 700MPa.

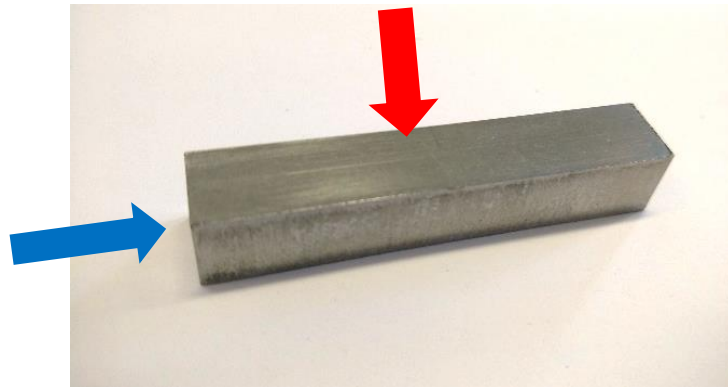


Fig.37 Campione 'charpy'

Le due frecce di Fig.37 indicano la direzione del campo applicato durante la pressatura: parallela per la freccia rossa (M), opposta per la freccia blu (MO).

**Campioni senza campo applicato in pressatura**

Campione	Pressione esercitata (MPa)	Altezza campione (mm)	Peso (g)	Densità ( $g/cm^3$ )
B 8.1 AFM	400	10,43	38,52	6,64
B 8.2 AFM	500	9,94	38,51	6,96
B 8.3 AFM	600	10,03	40,16	7,19
B 8.4 AFM	700	9,43	38,37	7,31

Tab.2 Principali caratteristiche dei campioni senza campo applicato in pressatura

**Campioni con campo applicato nella direzione di pressatura**

Il campo magnetico esterno è realizzato con due bobine collegate ad un alimentatore in corrente continua e disposte una sul punzone superiore e l'altra attorno al punzone inferiore della pressa. La configurazione nord-sud delle due bobine permette di applicare un campo magnetico nella direzione della pressatura.

Campione	Pressione esercitata (MPa)	Altezza campione (mm)	Peso (g)	Densità ( $g/cm^3$ )
B 8.1 M	400	10,22	37,63	6,62
B 8.2 M	500	9,66	37,19	6,92
B 8.3 M	600	9,72	38,62	7,14
B 8.4 M	700	9,93	40,27	7,29

Tab.3 Principali caratteristiche dei campioni con campo applicato in direzione della pressatura

**Campioni con campo applicato nella direzione opposta alla pressatura**

Il campo magnetico esterno è realizzato con due bobine collegate ad un alimentatore in corrente continua e disposte una sul punzone superiore e l'altra attorno al punzone inferiore della pressa. La configurazione nord-nord delle due bobine permette di applicare un campo magnetico in direzione opposta alla pressatura.

Campione	Pressione esercitata (MPa)	Altezza campione (mm)	Peso (g)	Densità ( $g/cm^3$ )
B 8.1 MO	400	9,96	36,78	6,64
B 8.2 MO	500	9,95	37,03	6,69
B 8.3 MO	600	9,30	38,54	7,45
B 8.4 MO	700	9,66	39,19	7,29

Tab.4 Principali caratteristiche dei campioni pressati con campo applicato in direzione opposta alla pressatura

## 6.2.2 Misura della coercività

I provini vengono inseriti all'interno della bobina che genera il campo magnetico fino alla loro saturazione. Segue la diminuzione graduale del campo magnetico fino ad annullarsi, per poi ricrescere con verso opposto fino a quando la magnetizzazione residua viene annullata. Tale ciclo si può effettuare sia manualmente che automaticamente impostando la velocità di magnetizzazione e di misura tramite apposito regolatore. I tempi sono impostati in funzione delle caratteristiche del materiale in prova.

La misurazione della magnetizzazione nei provini e in particolare la magnetizzazione residua, valore che corrisponde a campo esterno nullo, è affidata alla sonda Forster. In modalità manuale viene prima misurata l'intensità della magnetizzazione di saturazione, poi quella residua ed infine il campo coercitivo  $H_c$ . In modalità automatica sono ripetuti più cicli per i quali viene calcolata la media aritmetica delle misure del campo coercitivo. Il valore compare sull'apposito display.

Il valore di  $H_c$  è indipendente dalla forma del provino soltanto se la sua magnetizzazione è completamente uniforme.

I campioni MO sono interessati da un campo magnetico, prodotto dalla bobina del coercimetro, in direzione concorde al campo applicato durante la compattazione. Viceversa per i campioni M.



Fig.38 Inserimento del campione nella bobina del Koerzimat 1.095.

### 6.3 Prova di flessione a tre punti

La prova viene realizzata per mezzo del macchinario ZWICK Z/10 (Fig.39) e specifico software dell'azienda tedesca ZWICK ROELL.



Fig.39 Predisposizione macchinario ZWICK Z/10 per la prova di flessione a tre punti

Le prove di flessione a 3 punti sono eseguite per valutare la flessione dei materiali. Il provino di forma “charpy” viene posizionato su due supporti adattandone la distanza e caricato centralmente con un'incudine superiore (Fig.40). La prova consente di trarre informazioni sulla composizione del materiale, sulla deformazione e sulla resistenza alla rottura.

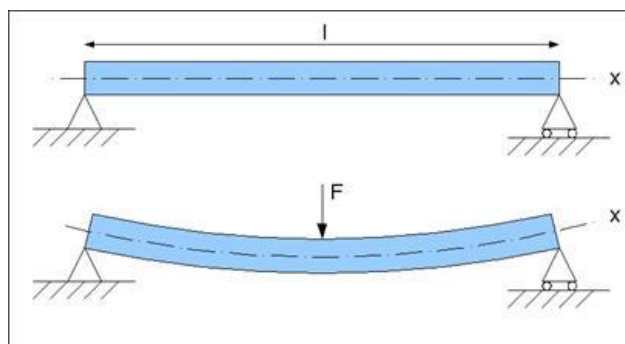


Fig.40 Schema della prova a flessione a tre punti

Molti materiali metallici, se sottoposti a carichi relativamente bassi, presentano sforzo deformazione proporzionali secondo la legge di Hooke che lega la forza applicata  $\sigma$  e la deformazione  $\varepsilon$  tramite la costante di proporzionalità  $E$  cioè il modulo di Young:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

La deformazione elastica è una deformazione reversibile, una volta rimosso il carico applicato, il campione riacquista la sua forma originale. Più è elevato il modulo di Young, maggiore è la rigidità del materiale, minore è la deformazione elastica risultante dall'applicazione del carico.

Il software registra le deformazioni del provino e le mette in relazione ai carichi esercitati. La prova termina con la rottura del provino.

I parametri valutati sono:

- Forza massima sopportata [MPa]
- Forza di rottura [MPa]
- $E$ , Modulo di elasticità (modulo di Young) [GPa], che dipende dalle forze di legame, più il valore è elevato più il materiale è rigido e non si flette facilmente.

I campioni 'charpy' in studio sono gli stessi già descritti nel capitolo 6.2.1 (Fig.41).



Fig.41 Campione 'charpy' sottoposto alla prova a tre punti



## 6.4 Analisi Metallografica

L'analisi metallografica, mediante l'uso del microscopio ottico, viene effettuata per studiare la microstruttura dei resti della sagomatura (Fig.42) dei tre provini toroidi realizzati nel capitolo 5.6.

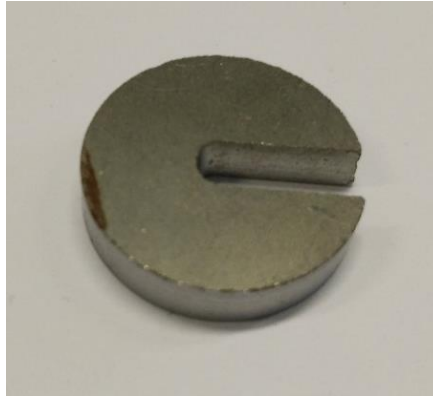


Fig.42 Scarto della sagomatura del campione toroide

L'analisi microscopica, che utilizza ingrandimenti maggiori di 50x, mette in evidenza la forma, le dimensioni, la distribuzione dei componenti e ne consente il riconoscimento, scopre eventuali difetti e differenze.

Prima di usare il microscopio ottico metallografico è necessario preparare, in modo accurato la superficie da visionare, con una procedura che prevede diversi passaggi.

### 6.4.1 Preparazione dei campioni

Prima dell'osservazione microscopica i resti della sagomatura dei tre provini toroidi devono essere sottoposti a una serie di operazioni:

1. Taglio, reso necessario dall'impossibilità di inserire l'intera sagoma nell'inglobatrice. Viene realizzato con troncattrice metallografica di precisione, nella direzione della pressatura. Per evitare danni da riscaldamento viene utilizzato un liquido refrigerante costituito da acqua e olio emulsionabili. Il taglio produce 3 pezzi dei quali se ne sceglie uno e gli altri due sono scartati.
2. Inglobamento. La necessità di fissare in modo efficace i campioni durante la spianatura e lucidatura manuale comporta l'inglobamento.



Fig.43 Macchina inglobatrice

A tale scopo il provino è posizionato nella camera cilindrica (diametro 20mm) della macchina inglobatrice in cui vengono versati 20ml di resina in granuli e si porta la temperatura a 155°C mantenendo una pressione di 10bar per 20 minuti.

Si ottiene un pezzo rivestito dalla resina fenolica termoindurente su tutte le superfici, tranne una.

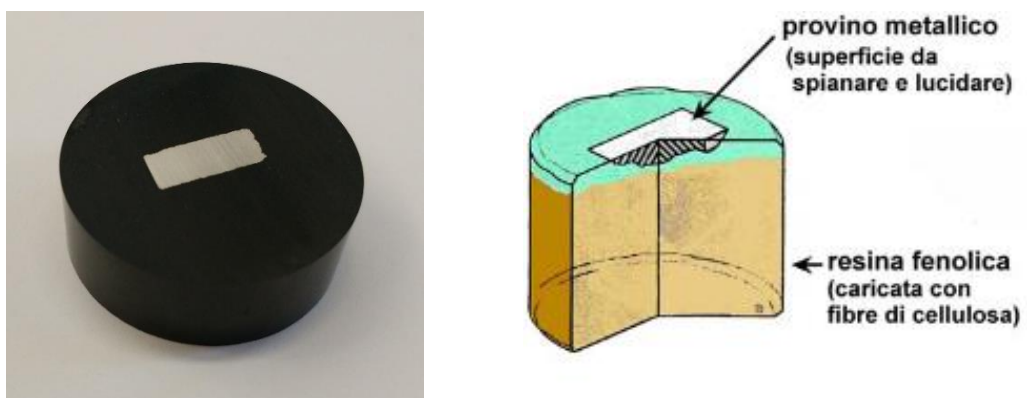


Fig.44 Provino inglobato nella resina (sinistra) e sua sezione (destra)

3. Spianatura. La spianatura consente di privare la superficie dei campioni dalle irregolarità generate dal taglio. Sono usate carte abrasive di carburo di silicio (SiC) montate sul piatto rotante della macchina lucidatrice, che lavora accompagnata da un getto d'acqua

- refrigerante. Le carte abrasive riportano un numero che indica la diversa grana in base al numero di linee abrasive per 25 mm<sup>2</sup>. A basso numero corrisponde una grossolana abrasione e viceversa. Nei 5 passaggi previsti è stata usata granulometria via via più fine: 120, 400, 800, 1200, 2400. L'efficacia della lavorazione viene valutata ad occhio nudo.
4. Lappatura. La lappatura conferisce la lucidatura a specchio. Sono usati panni di tessuto, cotone o nylon, montati sul piatto rotante della macchina lucidatrice e capaci di trattenere sulla superficie una sospensione abrasiva.

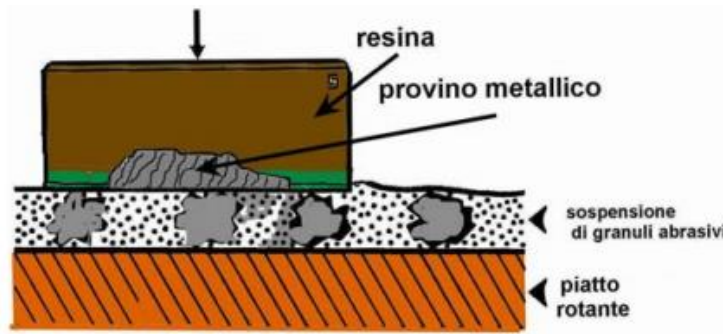


Fig.45 Fase di abrasione durante la lappatura

Ogni panno utilizzato prevede la somministrazione manuale di due spray specifici: un lubrificante e una sospensione diamantata a base acquosa. Sono effettuate due lappature in successione: la prima sospensione utilizza granuli di 3  $\mu\text{m}$  e la seconda di 1  $\mu\text{m}$ . Il processo termina quando la superficie metallica, osservata al microscopio, appare senza rigature.



Fig.46 Macchina lappatrice

5. Attacco chimico. La superficie libera del provino non risulta pronta per l'osservazione al microscopio ottico. Infatti, non sono visibili le caratteristiche strutturali utili per valutare l'idoneità dei campioni ottenuti. La visione appare uniforme, dello stesso colore, con qualche area più scura. In particolare, mancano contorni netti, indispensabili per distinguere i diversi grani gli uni dagli altri. Di qui la necessità di attaccare chimicamente la superficie ed eliminarne la pellicola di qualche millesimo di millimetro per ottimizzarne la visione.

Il reattivo usato è noto con la sigla NITAL 2, e si compone da acido nitrico concentrato al 2% e alcool etilico al 98%. Con la pipetta Pasteur sono prelevate alcune gocce, sono lasciate cadere sulla superficie libera del provino e lasciate agire per dieci secondi. L'acido corrode selettivamente le fasi più reattive, mettendo in evidenza la struttura del materiale.

Seguono il lavaggio con acqua e asciugatura con aria compressa.

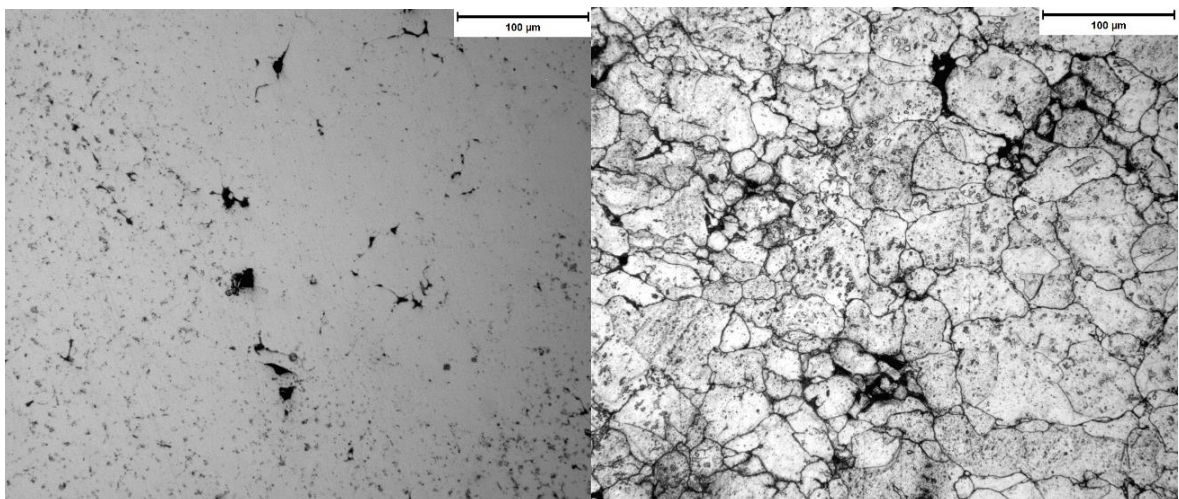


Fig.47 Campione senza attacco chimico (sinistra) e campione dopo attacco chimico (destra)

# Capitolo 7

## ANALISI DEI RISULTATI

### 7.1 Caratterizzazione dei toroidi

#### 7.1.1 Risultati a 500Hz

Di seguito sono riportati tabella e grafici relativi ad alcuni dei parametri ottenuti con la caratterizzazione effettuata a 500Hz dei campioni toroidi pressati a 500 MPa (capitolo 6.1). Nella Tab.5 si trovano i valori dei seguenti parametri: perdite specifiche, induzione massima per campo 5000A/m e permeabilità magnetica massima.

	Perdite specifiche (W/Kg)	Bmax a 5000A/m (T)	$\mu_{max}$
B8.2 (campo non applicato)	133,48	1,10	325
B8.2 MO (Radiale)	132,23	1,14	341
B8.2 M (parallelo pressatura)	126,50	1,14	340

Tab.5 Risultati di alcuni parametri valutati nella caratterizzazione dei toroidi a 500Hz dei campioni pressati a 500MPa

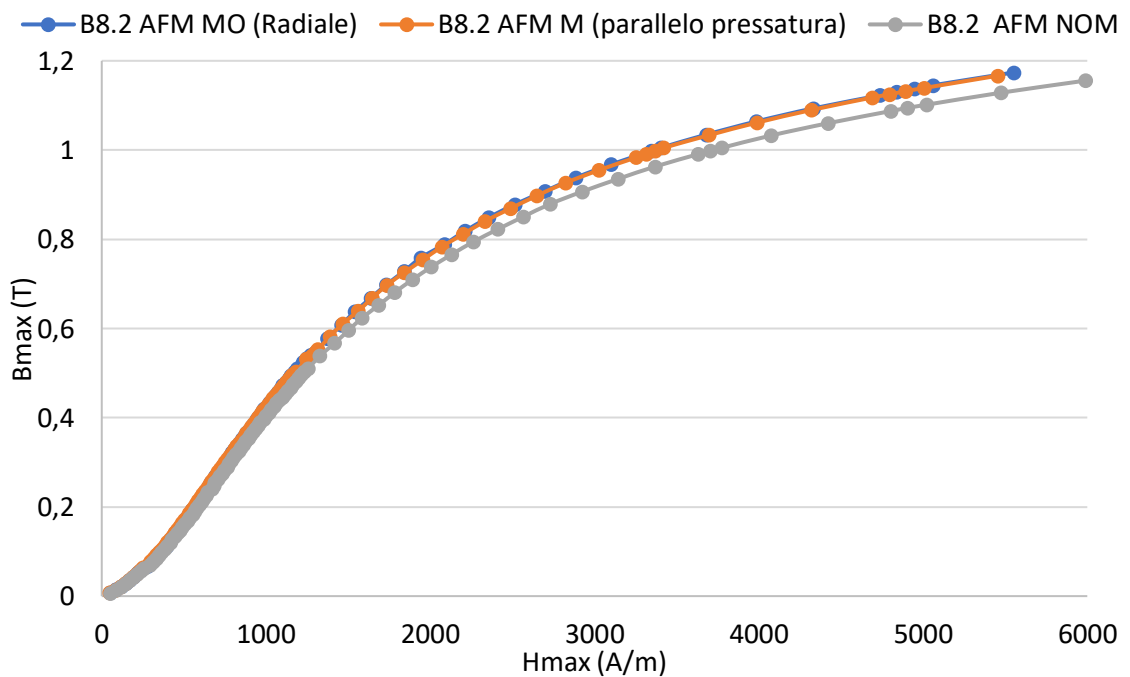


Fig.48 Curve B-H campioni toroidi pressati a 500MPa

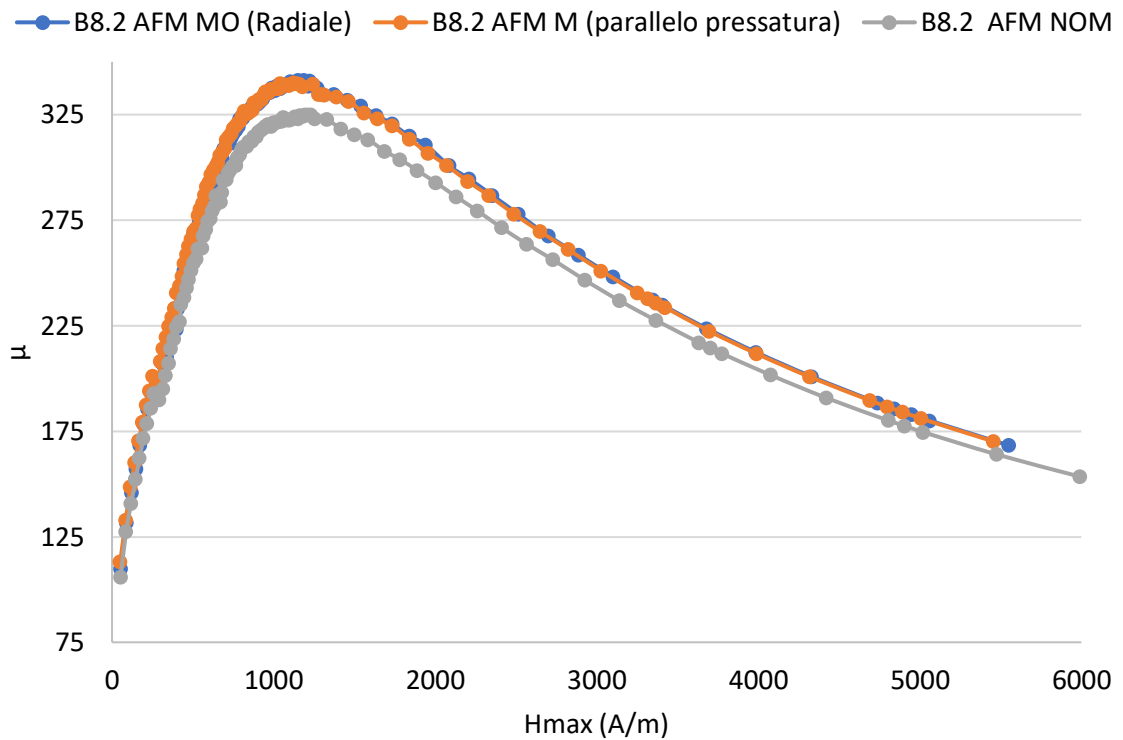


Fig.49 Curve permeabilità magnetica in funzione del campo magnetico dei campioni toroidi pressati a 500MPa

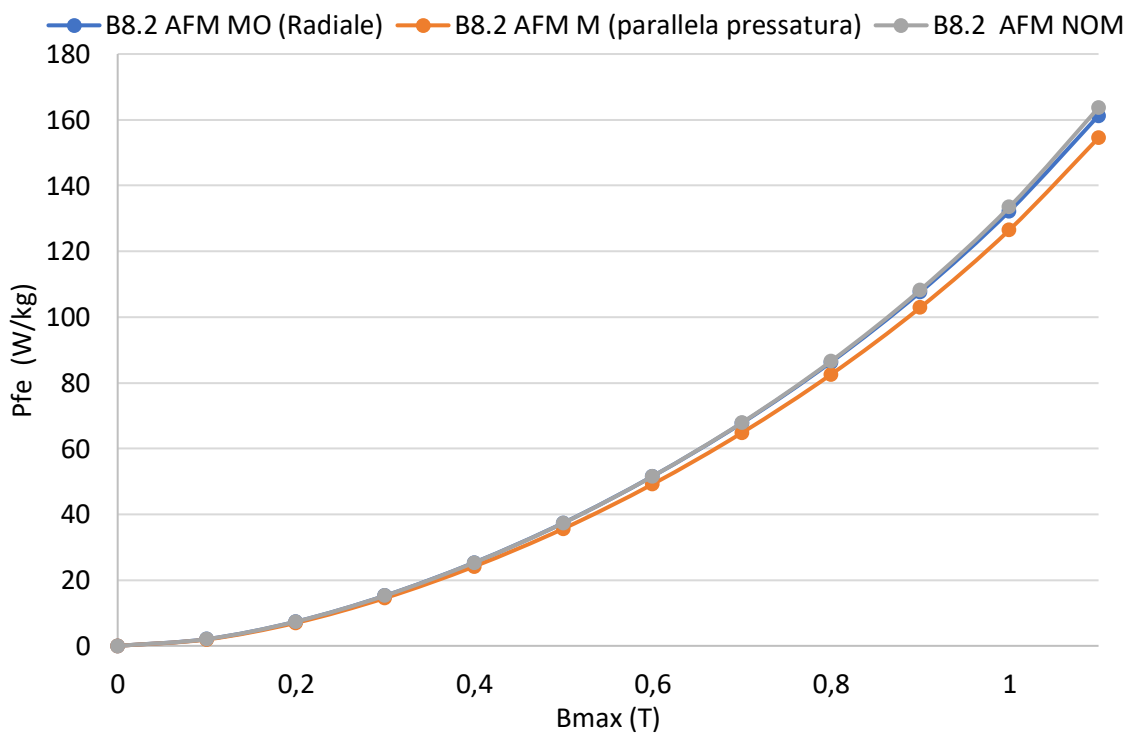


Fig.50 Curve perdite specifiche in funzione dell'induzione magnetica massima dei campioni toroidi pressati a 500MPa

La Fig.48 mostra le caratteristiche B-H dei materiali SMC a confronto, alla frequenza di 500Hz. Le tre curve sono sovrapponibili a quelle ricavate ad altre frequenze. Questa proprietà è tipica dei materiali SMC che, rispetto ai lamierini, sono meno penalizzati dalle perdite per correnti parassite.

Il campione pressato con campo applicato in direzione radiale (B8.2 AFM MO) e il campione pressato senza campo (B8.2 AFM NoM) non presentano sostanziali differenze nelle caratteristiche B-H (Fig.48) e Pfe-B (Fig.50). Invece per la caratteristica mu-H (Fig.49) il primo campione presenta una permeabilità magnetica massima maggiore del 4,7% rispetto al secondo campione.

Più rilevanti sono le differenze tra il campione pressato con campo magnetico applicato in direzione parallela (B8.2 AFM M) e il campione pressato senza campo applicato (B8.2 AFM NoM). Il primo campione rispetto al secondo presenta:

- Induzione massima per campo 5000 A/m superiore del 3,51% (Fig.48)
- permeabilità massima superiore del 4,4% (Fig.49)
- perdite specifiche inferiori comprese tra 4,62% e 5,60% con B=1,1T (Fig.50)

Le perdite specifiche nel ferro al variare della frequenza sono esprimibili come una funzione polinomiale del secondo ordine e termine noto nullo. Nell'espressione il termine quadratico esprime le perdite per correnti parassite, il termine lineare le perdite per isteresi.

$$P_{fe} = P_{cp} + P_{ist} = \alpha \cdot f^2 + \beta \cdot f$$

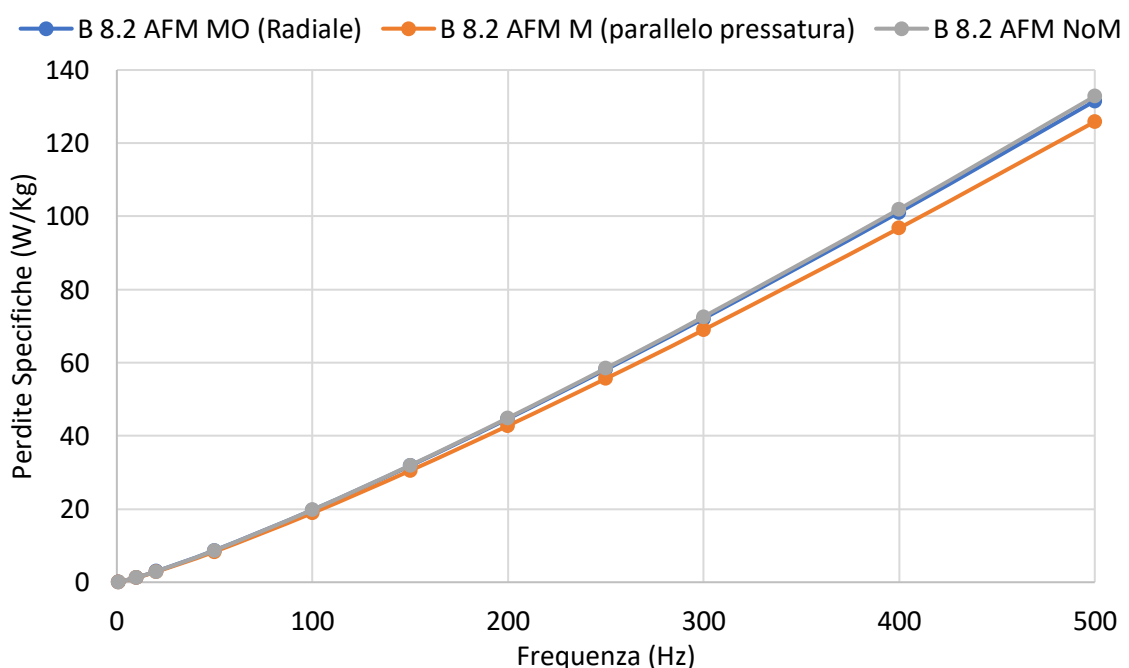


Fig.51 Perdite specifiche nel ferro in funzione della frequenza dei campioni toroidi pressati a 500MPa

Il contributo delle perdite eccedenti non viene scorporato dalle perdite nel ferro. Tuttora è oggetto di studio un metodo valido per i materiali SMC e non rientra nello scopo della presente trattazione.

Il campione pressato con campo applicato in direzione radiale (B8.2 AFM MO) e il campione pressato senza campo (B8.2 AFM NoM) non presentano sostanziali differenze nelle perdite specifiche nel ferro (Fig.51 , Fig.52).

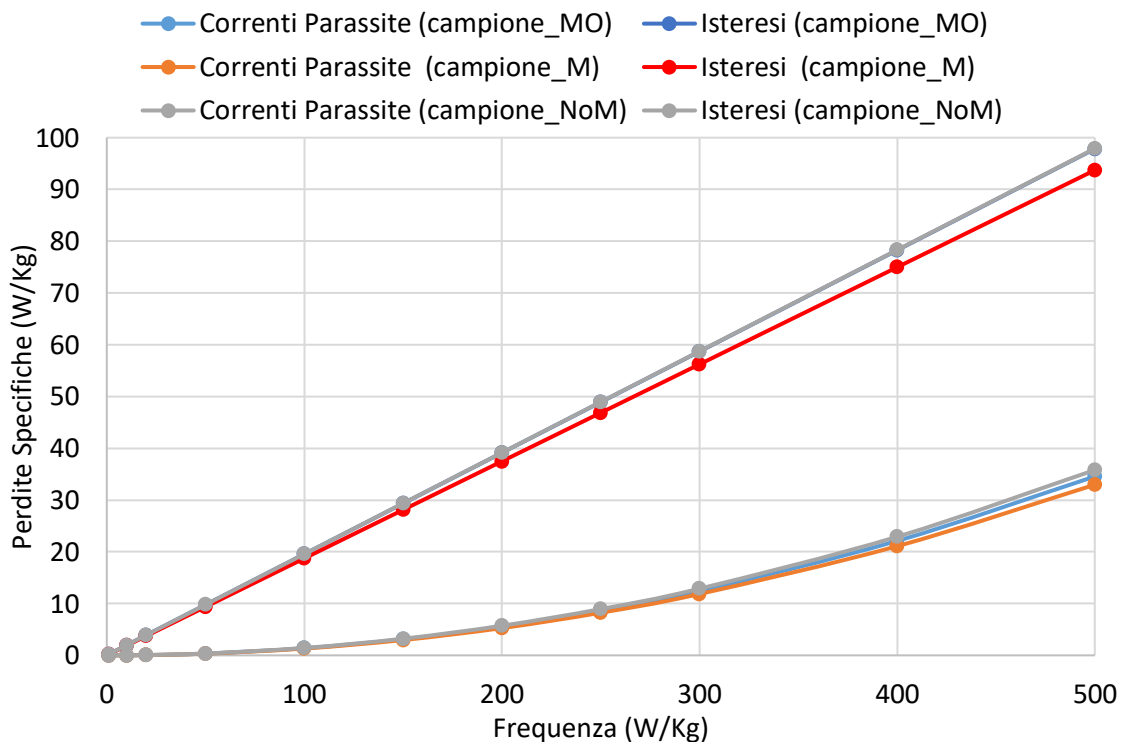


Fig.52 Perdite specifiche per correnti parassite e isteresi in funzione della frequenza dei campioni toroidi pressati a 500MPa

Più rilevanti sono le differenze tra il campione pressato con campo magnetico applicato in direzione parallela (B8.2 AFM M) e il campione pressato senza campo applicato (B8.2 AFM NoM). Il primo campione rispetto al secondo presenta, alla frequenza di 500Hz (Fig.51 , Fig.52) :

- Perdite specifiche nel ferro inferiori del 5,23 %
- Perdite specifiche per correnti parassite inferiori del 7,94%
- Perdite specifiche per isteresi inferiori del 4,26%



## 7.2 Termografia

### 7.2.1 Campioni Toroidi

Di seguito sono riportati i risultati relativi alle misure termografiche realizzate sui campioni toroidi pressati a 500 MPa (capitolo 5.6).

L'alimentatore viene configurato in modo da controllare la corrente. Si impostano una frequenza di 500Hz e un valore picco-picco pari a 16,9A che corrisponde a circa 6A in valore efficace. Tale intensità di corrente nelle 55 spire genera un'induzione nel circuito magnetico di 1T, utile per confrontare le perdite specifiche (cifra di perdita) con i risultati della prova a vuoto.

La relazione tra i valori di picco dell'induzione B e del campo H dei toroidi pressati a 500 MPa si ricava dalle caratteristiche magnetiche della prova a vuoto.

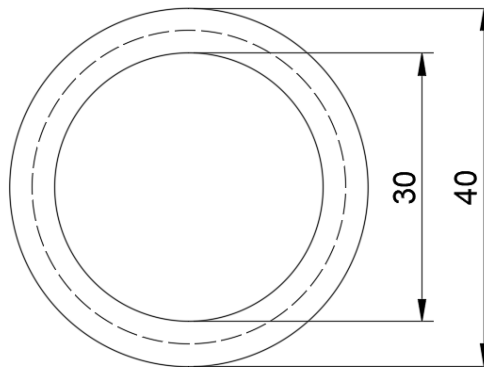


Fig.53 Campione Toroide con lunghezza del percorso medio tratteggiato (quote in millimetri)

La legge della circuitazione magnetica lega il campo magnetico di picco  $\hat{H}$  nel toroide con la corrente di picco  $\hat{I}$  nell'avvolgimento:

$$\hat{H} \cdot l_m = N \cdot \hat{I}$$

- $l_m = 2\pi r_m$  , rappresenta la lunghezza del percorso medio nel toroide, dove  $r_m = \frac{r_e + r_i}{2}$  , raggio medio del toroide tra raggio esterno ( $r_e$ ) ed interno ( $r_i$ ).
- N, numero di spire

### Misurazione con eccitazione di lunga durata

Di seguito le immagini termografiche elaborate con Matlab relative alla misurazione di lunga durata (capitolo 5.2) con eccitazione di 8s e raffreddamento 92s, ripetuta per 32 cicli.

- $P_{media}$ : perdita nel ferro media della superficie inquadrata
- $P_{max}$ : perdita nel ferro massima della superficie inquadrata

I numeri al lato sinistro ed inferiore di ogni figura termografica rappresentano i pixel inquadrati dalla termocamera.

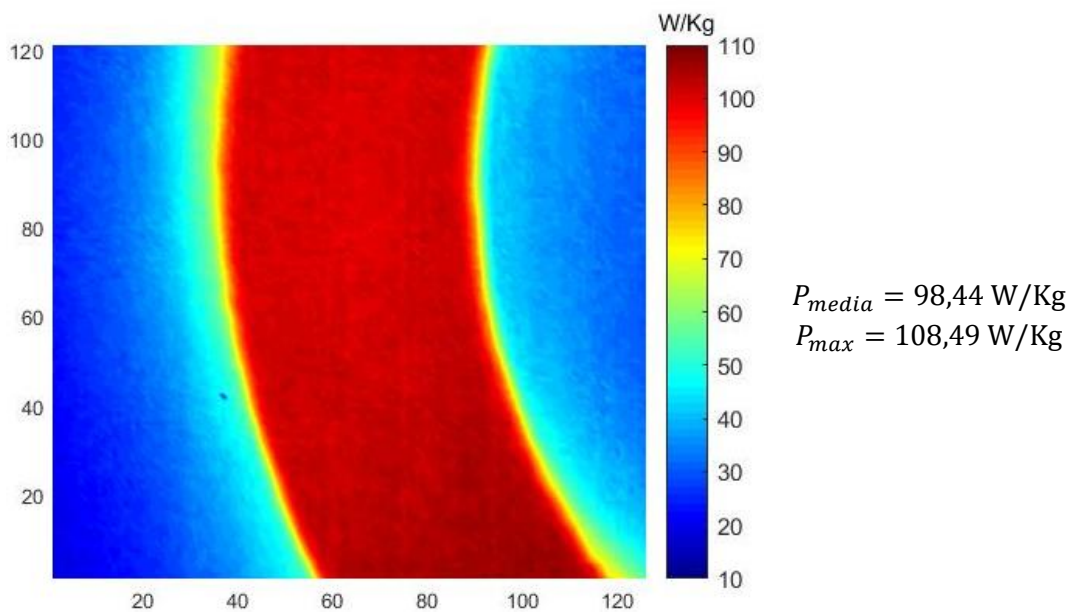


Fig.54 Immagine termografica del toroide pressato senza campo (NoM), eccitazione lunga durata

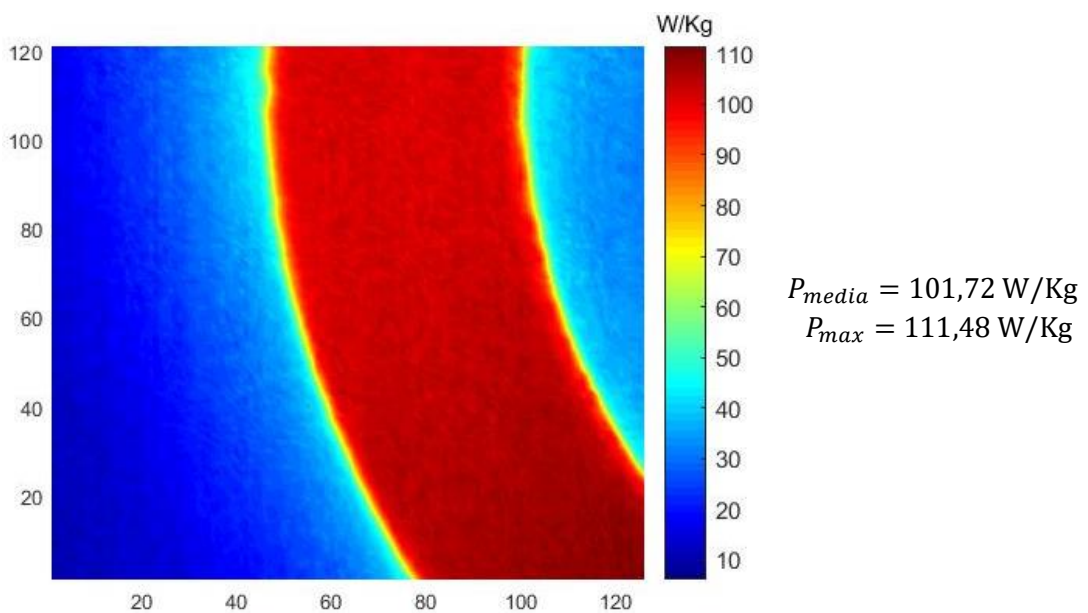


Fig.55 Immagine termografica del toroide pressato con campo radiale (MO), eccitazione lunga durata

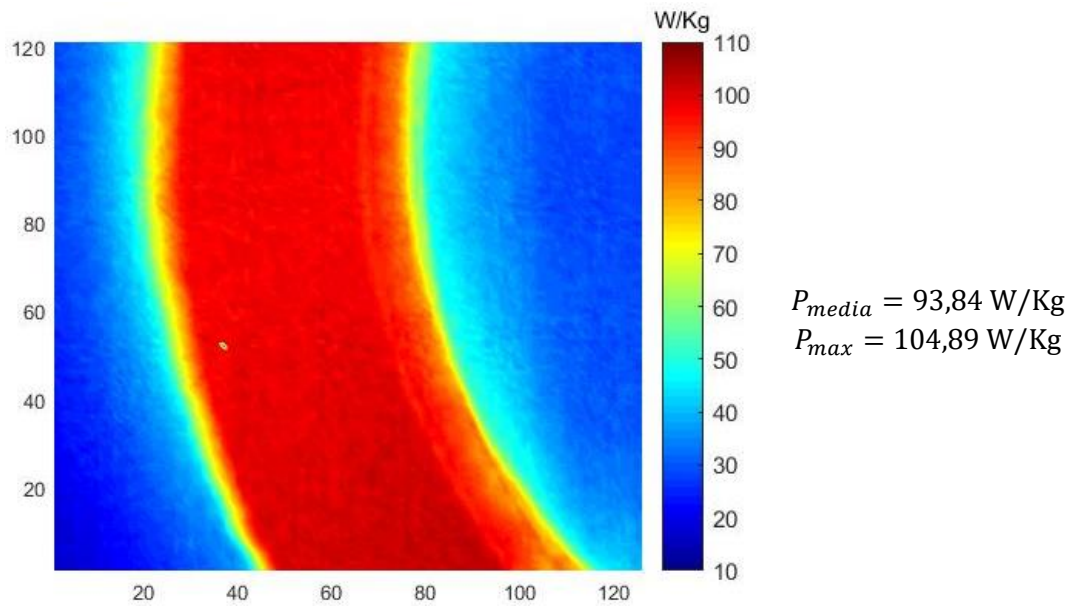


Fig.56 Immagine termografica del toroide pressato con campo parallelo (M) , eccitazione lunga durata

#### Misurazione con eccitazione di breve durata

Di seguito le immagini termografiche elaborate con Matlab relative alla misurazione di breve durata (capitolo 5.3) con eccitazione di 1s e raffreddamento 19s, ripetuta per 260 cicli.

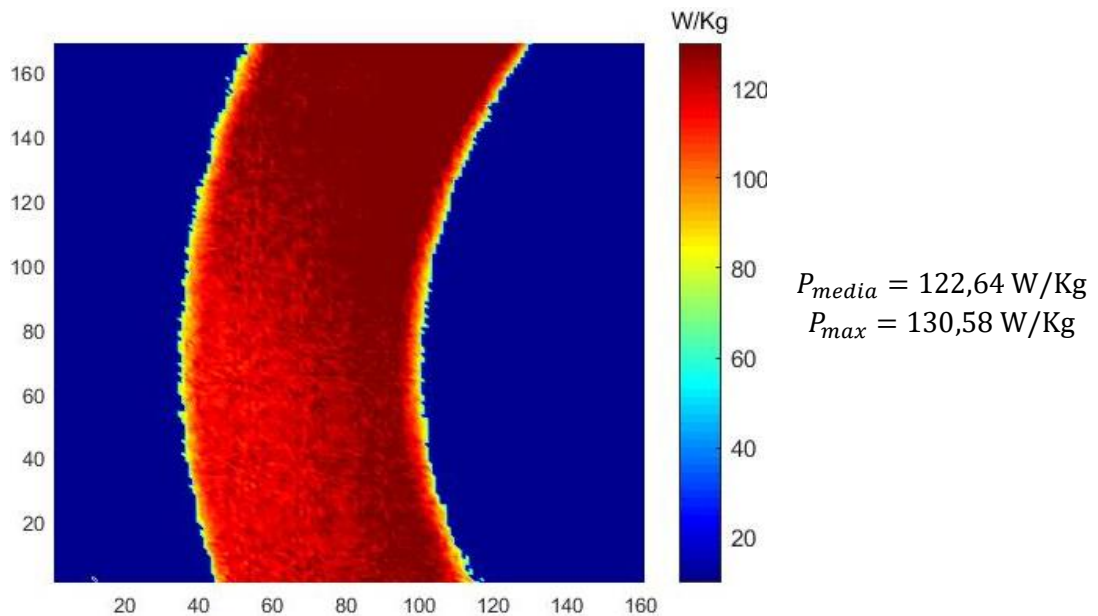


Fig.57 Immagine termografica del toroide pressato senza campo (NoM) , eccitazione breve durata

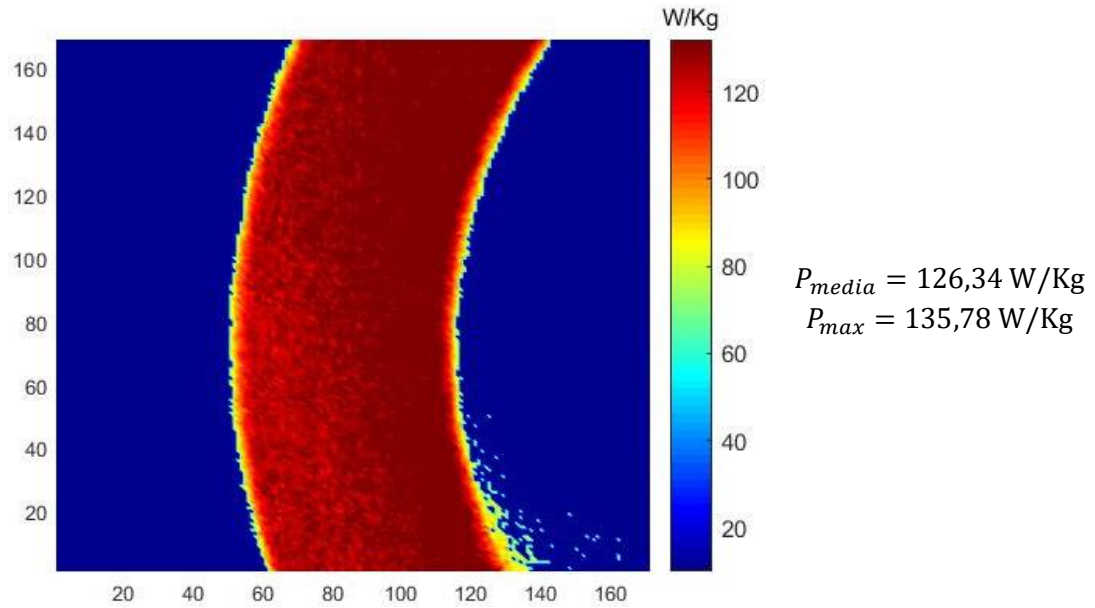


Fig.58 Immagine termografica del toroide pressato con campo radiale (MO) , eccitazione breve durata

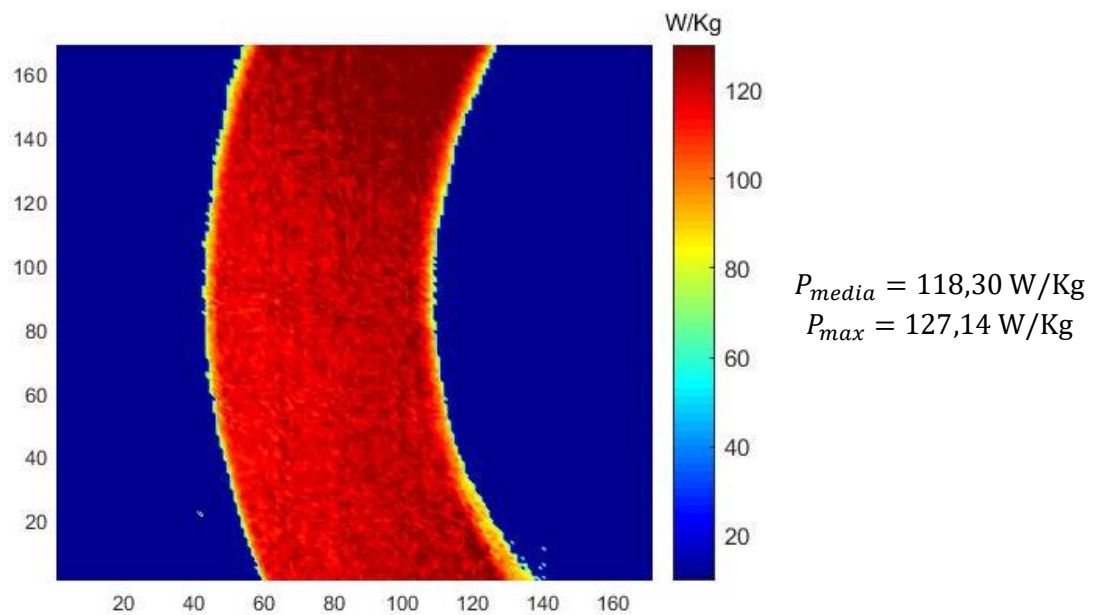


Fig.59 Immagine termografica del toroide pressato con campo parallelo (M) , eccitazione breve durata

Il confronto tra i risultati dei due metodi di misurazione termografica (Fig.60), ovvero eccitazione di breve o lunga durata, evidenzia:

- Entrambi i metodi mostrano valori di perdite specifiche medie inferiori nel campione pressato con campo in direzione parallela (M).
- Entrambi i metodi mostrano valori perdite specifiche medie superiori nel campione pressato con campo in direzione radiale (MO).

Lo scostamento tra i valori ottenuti nelle due misurazioni termografiche è circa 20%.

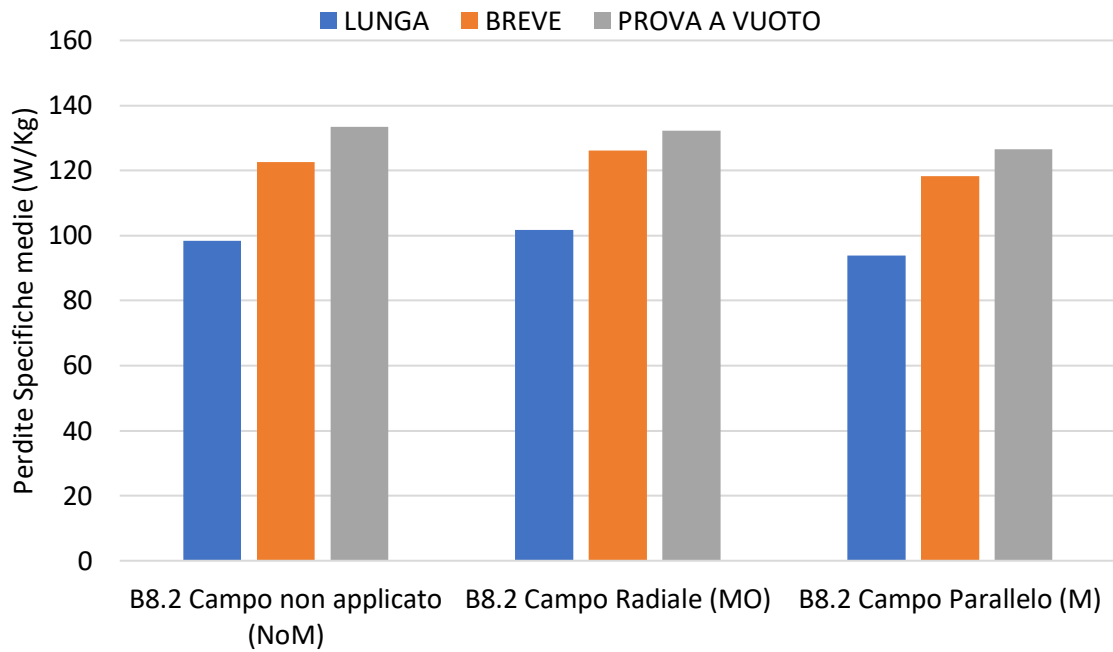


Fig.60 Confronto dei risultati tra differenti metodi di misura

Il confronto tra i risultati dei due metodi di misurazione sopra citati con quelli della prova a vuoto (Fig.60), evidenzia che il metodo di misurazione termografica più attendibile è quello con eccitazione di breve durata. Infatti, lo scostamento tra i valori ottenuti nelle due misurazioni è inferiore a 8,5%.

## 7.2.2 Valutazione dell'isotropia

Di seguito sono riportati i risultati relativi alle misure termografiche, realizzate sui campioni pressati a 400 MPa con nucleo magnetico simile a trasformatore monofase (capitolo 5.7).

L'alimentatore viene configurato in modo da controllare la corrente. Si impostano una frequenza di 500Hz e un valore picco-picco pari a 16,9 A che corrisponde a circa 6A in valore efficace. Tale intensità di corrente nelle 40 spire genera un'induzione nel circuito magnetico di 0,84T.



Fig.61 Campione in analisi con lunghezza del percorso medio tratteggiato (quote in millimetri)

La legge della circuitazione magnetica lega il campo magnetico di picco  $\hat{H}$  nel campione con la corrente di picco  $\hat{I}$  nell'avvolgimento:

$$\hat{H} \cdot l_m = N \cdot \hat{I}$$

- $l_m$ , rappresenta la lunghezza del percorso medio nel campione
- N, numero di spire

La misurazione viene effettuata con eccitazione di breve durata. La Fig.62 mostra la superficie inquadrata dalla termocamera. La scala colore rappresenta le temperature appena dopo l'eccitazione di un secondo del ciclo di misura. In nero si evidenzia la porzione in cui sono calcolate le perdite nel ferro.

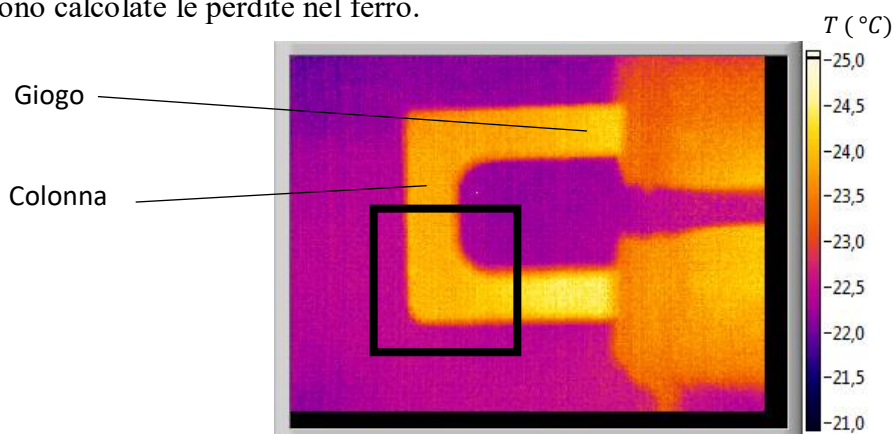


Fig.62 Campione inquadrato dalla termocamera

In analogia con la nomenclatura dei trasformatori vengono chiamati gioghi i tratti più lunghi in cui non sono presenti avvolgimenti e colonne i tratti più corti. Una colonna presenta l'avvolgimento di eccitazione, l'altra è quella inquadrata dalla termocamera (Fig.62).

Di seguito le immagini termografiche elaborate con Matlab relative alla misurazione di breve durata con eccitazione di 1s e raffreddamento 19s, ripetuta per 260 cicli. I numeri al lato sinistro ed inferiore rappresentano i pixel inquadrati dalla termocamera.

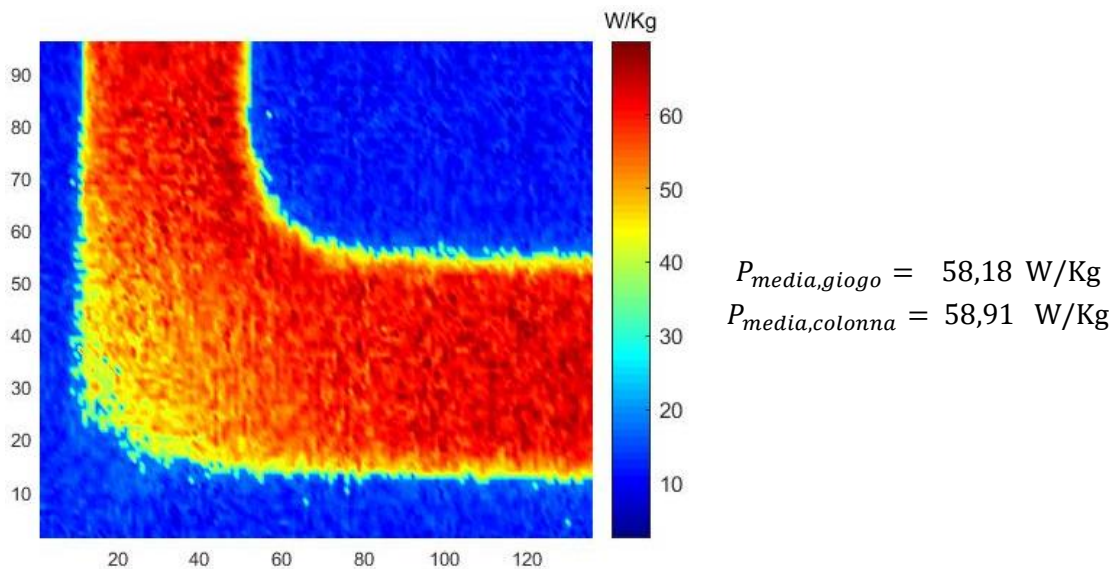


Fig.63 Campione in analisi pressato senza campo applicato

Nel campione pressato senza campo applicato, le perdite nel ferro medie di giogo e colonna sono simili tra loro. Invece, nel campione con campo applicato in direzione parallela alla pressatura, le perdite del giogo superano del 4,21% le perdite della colonna.

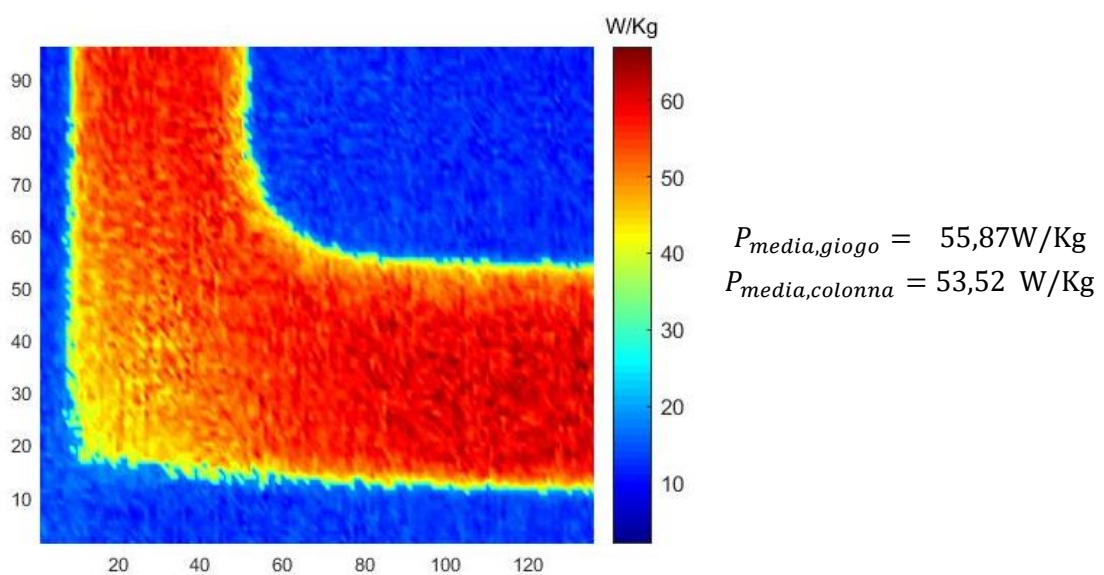


Fig.64 Campione in analisi pressato con campo applicato in direzione parallela alla pressatura

### 7.3 Coercività

Il grafico di Fig.65 presenta i risultati della misurazione del campo coercitivo sui campioni ‘charpy’ (capitolo 6.2). Si notano valori di coercività minori per i campioni pressati con campo opposto alla direzione di pressatura (MO), valori che rappresentano un materiale più dolce rispetto agli altri campioni. A bassa pressione non risultano differenze significative tra campioni pressati senza campo applicato (NoM) e con campo parallelo (M). Ad alta pressione i campioni pressati con campo parallelo (M) hanno valori che rappresentano un materiale più duro.

I campioni MO sono interessati da un campo magnetico, prodotto dalla bobina del coercimetro, in direzione concorde al campo applicato durante la compattazione. Viceversa per i campioni M.

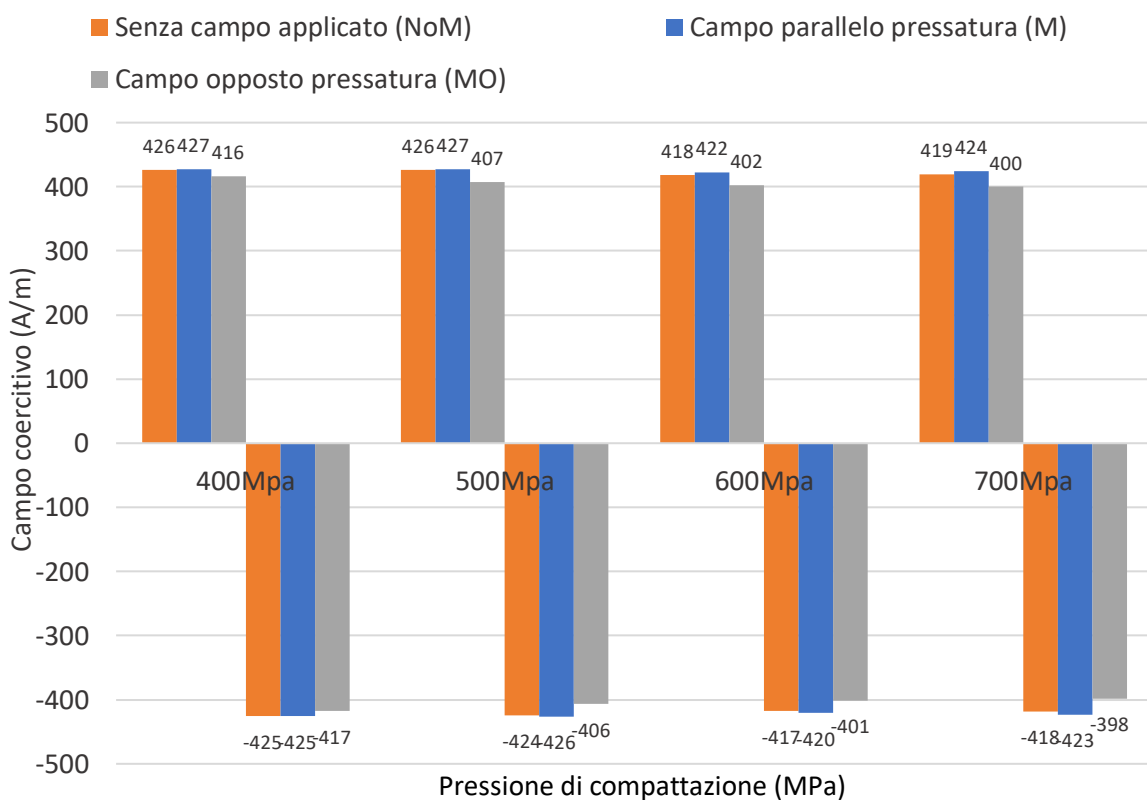


Fig.65 Risultati della misurazione del campo coercitivo sui campioni con pressione di compattazione da 400Mpa a 700MPa



## 7.4 Prova di flessione a tre punti

Di seguito sono riportati i risultati relativi alle prove di flessione a tre punti realizzate sui campioni ‘charpy’ (capitolo 6.3).

Nelle Tab.6 e Tab.7 , rispettivamente per campioni pressati a 400MPa e 700MPa, si trovano i valori di: modulo di Young, forza massima sopportata, allungamento del provino alla forza massima sopportata, forza di rottura, allungamento del provino alla forza di rottura.

I grafici di Fig.66 e Fig.67, rispettivamente per campioni pressati a 400MPa e 700MPa, mostrano l’andamento delle curve della forza applicata in MPa in funzione della deformazione percentuale.

### 7.4.1 Campioni pressati a 400MPa

Legenda	$E_{mod}$ (GPa)	$F_{max}$ (MPa)	dL a $F_{max}$ (mm)	$F_{Rottura}$ (MPa)	dL a rottura (mm)
B 8.1 MO	19,9	38,8	0,1	7,77	0,2
B 8.1 AFM	18,4	38,6	0,1	7,71	0,2
B 8.1 M	14,5	39,6	0,1	7,92	0,2

Tab.6 Risultati della prova a tre punti dei campioni pressati a 400MPa

Le curve di Fig.66 evidenziano una prestazione meccanica simile per i tre campioni pressati a 400MPa con campo applicato in direzione opposta alla pressatura (MO), senza campo applicato (NoM) e con campo applicato in direzione parallela (M).

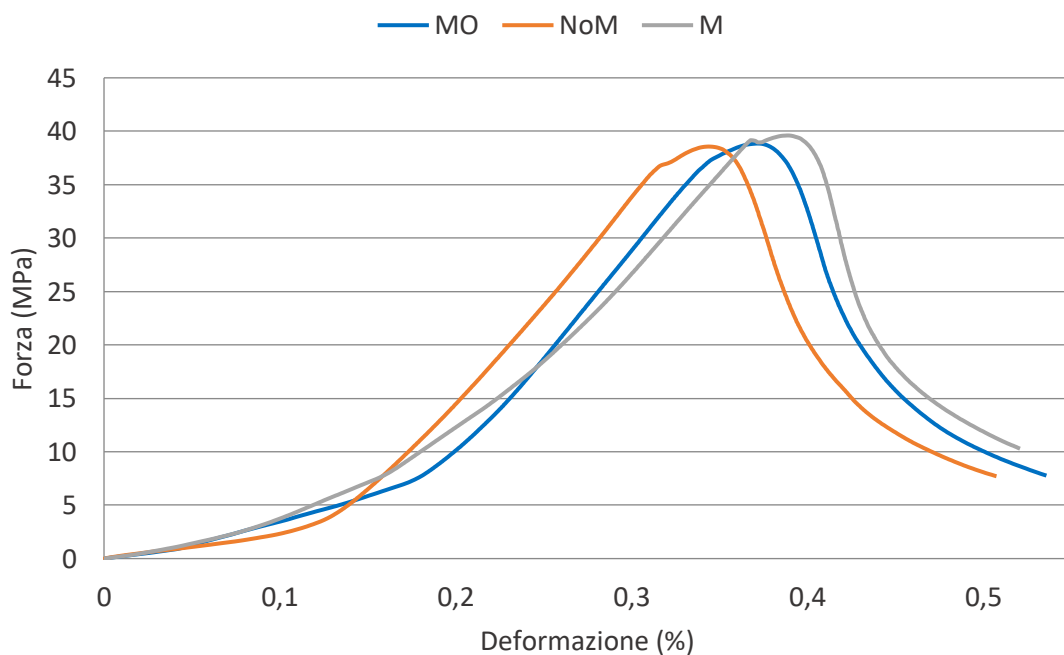


Fig.66 Grafico Deformazione-Forza applicata dei campioni pressati a 400MPa

### 7.4.2 Campioni pressati a 700MPa

Legenda	$E_{mod}$ (GPa)	$F_{max}$ (MPa)	dL a $F_{max}$ (mm)	$F_{Rottura}$ (MPa)	dL a rottura (mm)
B 8.4 MO	28,5	78,5	0,2	15,7	0,2
B 8.4 AFM	29,2	85,4	0,1	17,1	0,2
B 8.4 M	26,9	78,3	0,1	15,6	0,2

Tab.7 Risultati della prova a tre punti dei campioni pressati a 700MPa

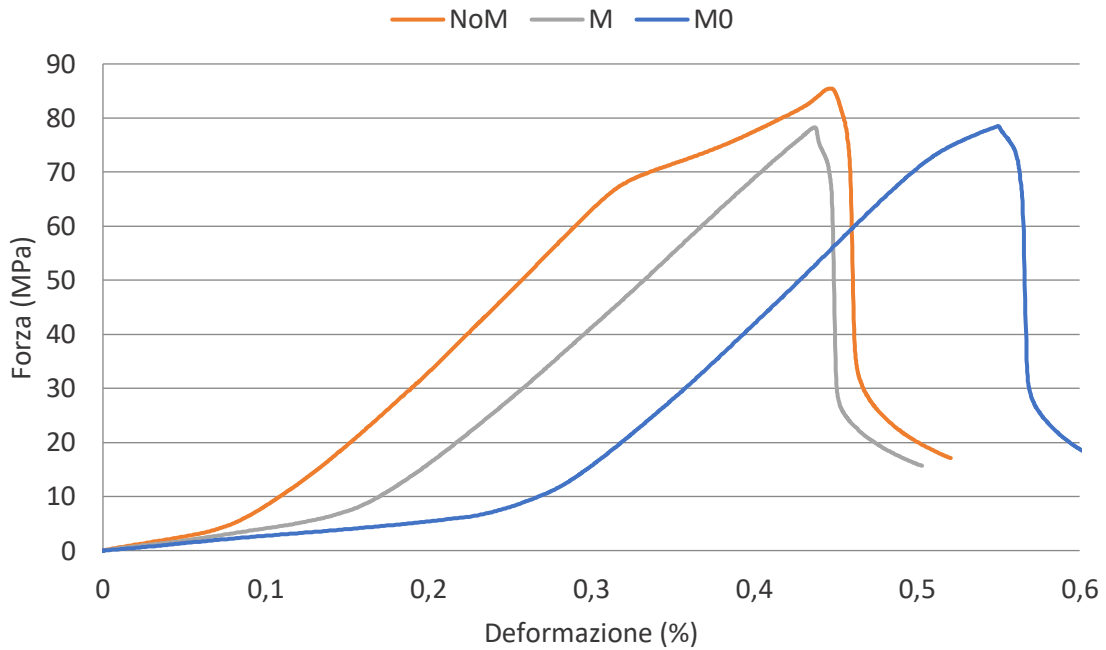


Fig.67 Grafico Deformazione-Forza applicata dei campioni pressati a 700MPa

Le curve di Fig.67 evidenziano una forza massima simile per i campioni pressati a 700MPa con campo in direzione opposta alla pressatura (MO) e con campo applicato in direzione parallela (M). Il campione pressato senza campo applicato (NoM) presenta una forza massima maggiore del 8,2%.

In particolare, i due campioni pressati con campo applicato presentano una deformazione percentuale maggiore, per stessa forza esercitata, del campione pressato senza campo applicato.

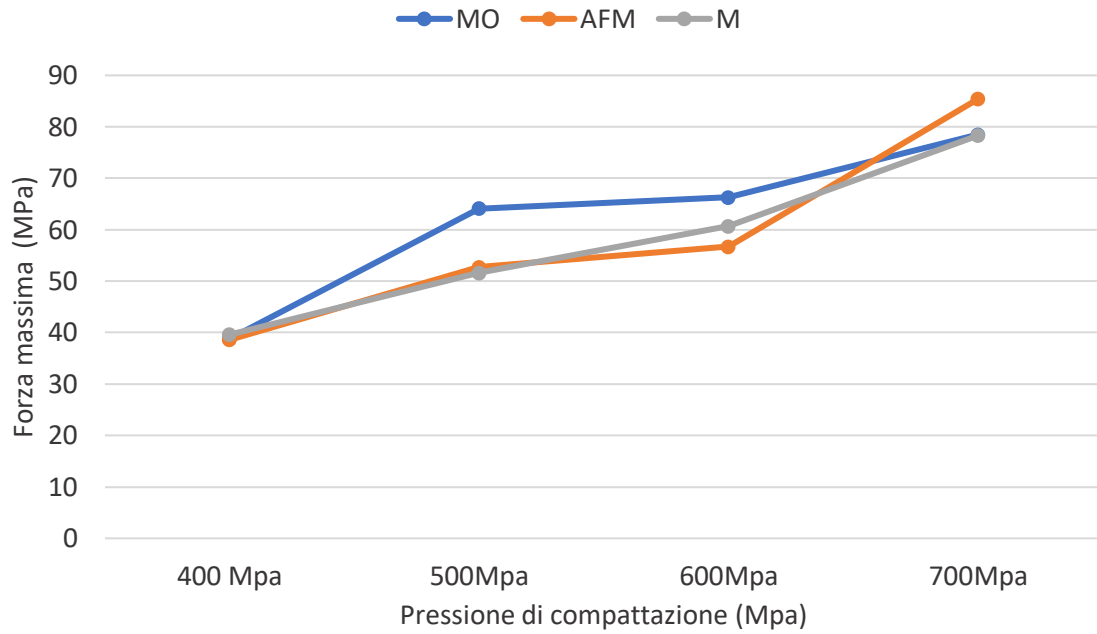


Fig.68 Forza massima sopportata in funzione della pressione di compattazione

Il grafico di Fig.68 mostra che all'aumentare della pressione di compattazione aumentano le prestazioni meccaniche.

Il grafico di Fig.69 evidenzia che il Modulo di elasticità (E), dopo l'iniziale aumento comune ai tre campioni, tende a stabilizzarsi all'aumentare della pressione di compattazione.

I risultati sono attendibili soltanto parzialmente a causa del limitato numero di sperimentazioni.

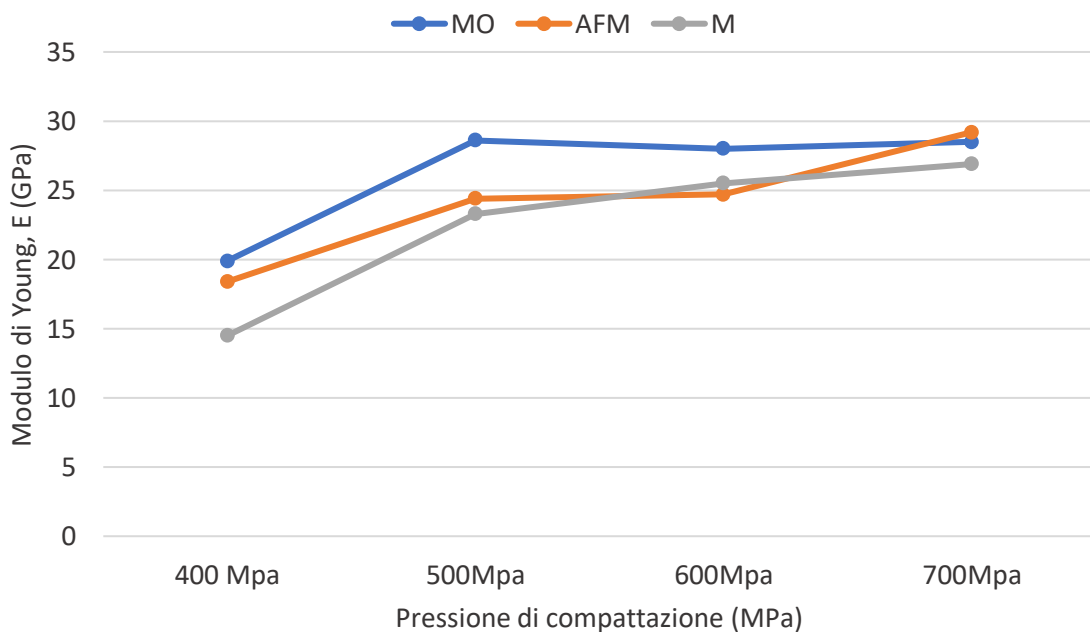


Fig.69 Modulo di Young (E) in funzione della pressione di compattazione

## 7.5 Visione al microscopio ottico

Una volta terminate le fasi di preparazione della superficie libera del campione (capitolo 6.4), si procede al controllo qualitativo dello stesso con il microscopio ottico metallografico a luce riflessa. La diversa riflessione del fascio luminoso che colpisce la superficie evidenzia le variazioni di colore e le parti, matrice e fase dispersa, del materiale composito.



Fig.70 Microscopio metallografico Leica MEF4M

L'apparecchio utilizzato è un Leica MEF4M, monta un oculare 10x e un revolver con 5 obiettivi: 5x, 10x, 20x, 50x, 100x. L'ingrandimento totale si ottiene moltiplicando l'ingrandimento dell'oculare per quello dell'obiettivo scelto.

Sono state visionate tre tipi di immagini relative ai campioni:

- B8.2 AFM NoM senza applicazione di campo
- B8.2 M ottenuto con campo applicato nella direzione di pressatura
- B8.2 AFM MO ottenuto con campo applicato nella direzione radiale

Le immagini di Fig.71 e Fig.73 sono molto simili: presentano grani di ferro di colore chiaro con sezione prevalentemente irregolare, altri hanno sezione tendenzialmente circolare e/o ellittica. I contorni rappresentano la fase dispersa di resina fenolica che circonda la matrice ferrosa, appaiono più scuri e con tratti netti. Il loro spessore medio è di 2  $\mu\text{m}$ . Sono presenti aree di colore nero di forma e ampiezza variabile che corrispondono o a spazi vuoti o a cumuli di resina.

A differenza delle immagini di Fig.71 e Fig.73 , nell'immagine di Fig.72, oltre alle caratteristiche descritte in precedenza, le aree di colore nero risultano meno frequenti e con dimensioni minori. La peculiarità da sottolineare è la presenza di grani con più strati perché compenetrati all'interno di grani più grandi. Probabilmente tale fenomeno non è legato all'anisotropia della polvere di ferro, perché tale proprietà non è sufficiente al suo orientamento preferenziale quando soggetta all'applicazione del campo. Dunque, una possibile spiegazione è da ricercarsi nelle forze di attrazione magnetica che portano alla minima riluttanza determinando una migliore disposizione dei singoli grani che rende più efficace la compattazione.

### B8.2 AFM NoM senza applicazione di campo

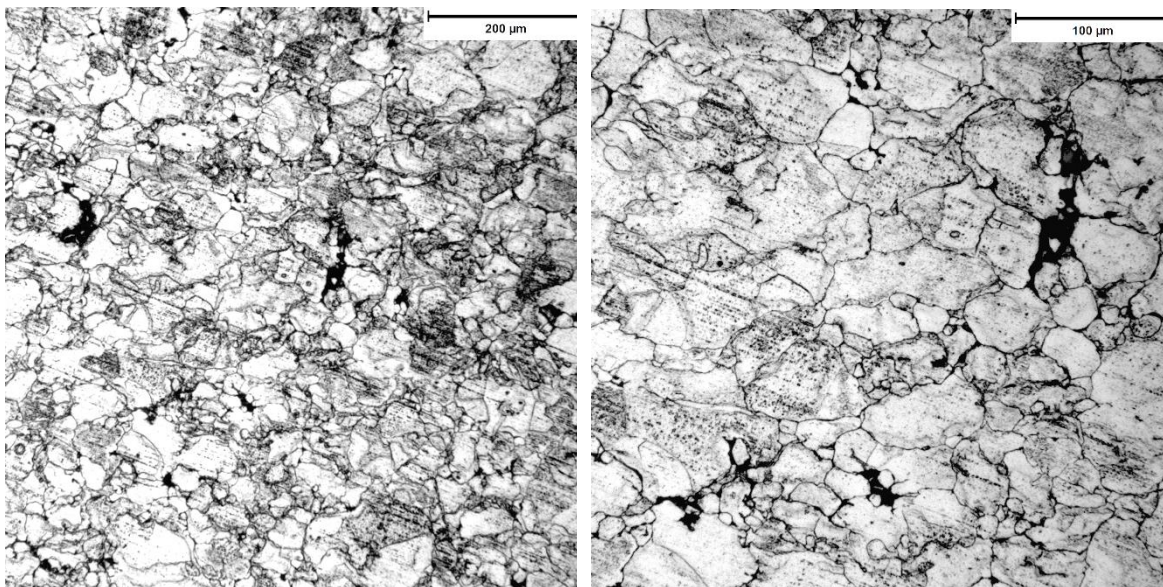


Fig.71 Campione pressato senza campo applicato 100x (a sinistra) e 200x (a destra)

### 8.2 M ottenuto con campo applicato nella direzione di pressatura

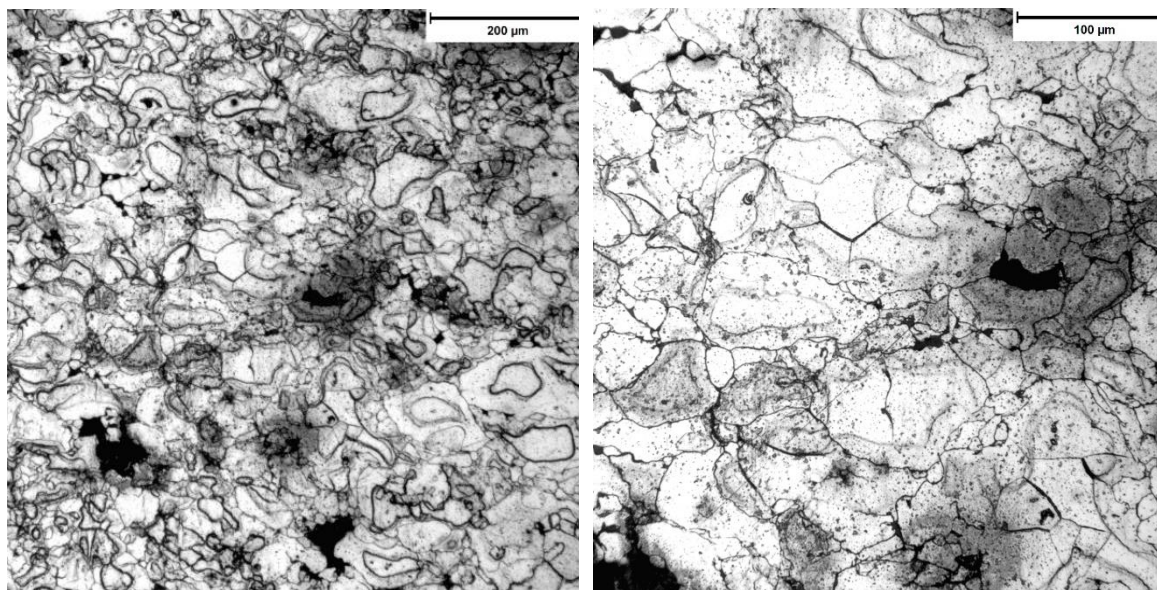


Fig.72 Campione pressato con campo magnetico parallelo 100x (a sinistra) e 200x (a destra)

### B8.2 AFM MO ottenuto con campo applicato nella direzione radiale

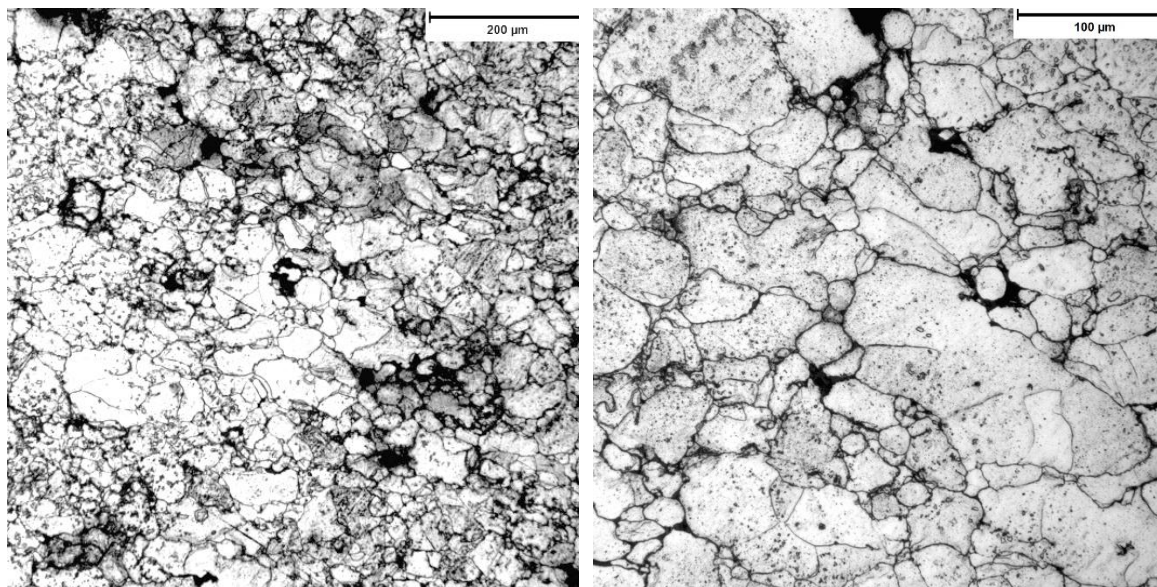


Fig.73 Campione pressato con campo magnetico radiale 100x (a sinistra) e 200x (a destra)

# Capitolo 8

## REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO

### 8.1 Calcolo Analitico

Per la determinazione dei parametri geometrici ed elettrici del prototipo viene utilizzato lo script Matlab, sviluppato nelle precedenti tesi [1] e [2] e, adattato per il calcolo analitico in questione. Nel diagramma di flusso di Fig.75 è schematizzata la sequenza delle operazioni eseguite per il dimensionamento. Il programma Matlab prevede la scelta di alcuni parametri in ingresso del motore per determinare le caratteristiche del motore in diverse condizioni di lavoro.

Uno dei dati che influenza maggiormente le prestazioni del motore, perché incide sulla densità di coppia, è il rapporto tra diametro interno e diametro esterno dello statore (coefficiente  $k_D$ ). La coppia elettromagnetica media per un motore a flusso assiale è data:

$$T_{em} = \pi B_{avg} \cdot A_i \cdot R_2^3 (k_D - k_D^3)$$

- $B_{avg}$ : induzione media al traferro
- $A_i$ : densità di corrente lineare
- $R_2$ : raggio esterno del motore

Dalla formula precedente si deduce che la massima coppia erogabile si ottiene con  $k_D \cong 1/\sqrt{3}$ , come risulta nel grafico di Fig.74 con la coppia normalizzata al valore massimo.

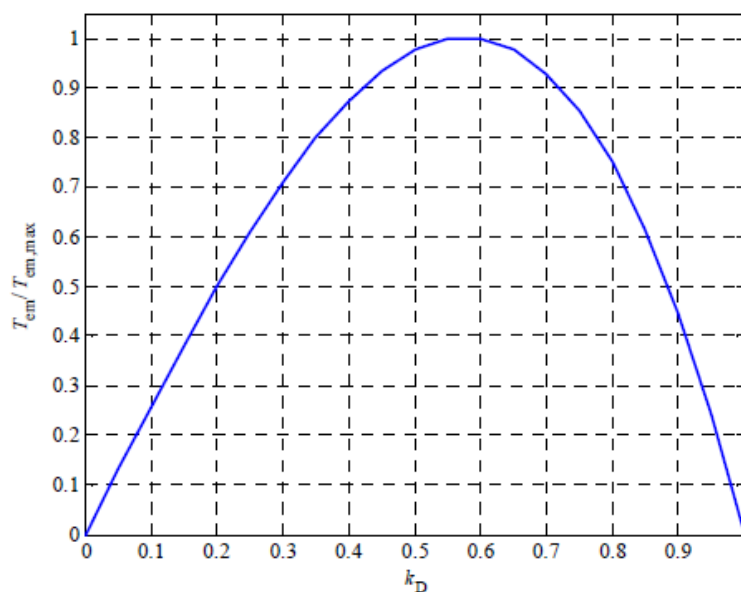


Fig.74 Andamento di coppia in funzione di  $k_D$

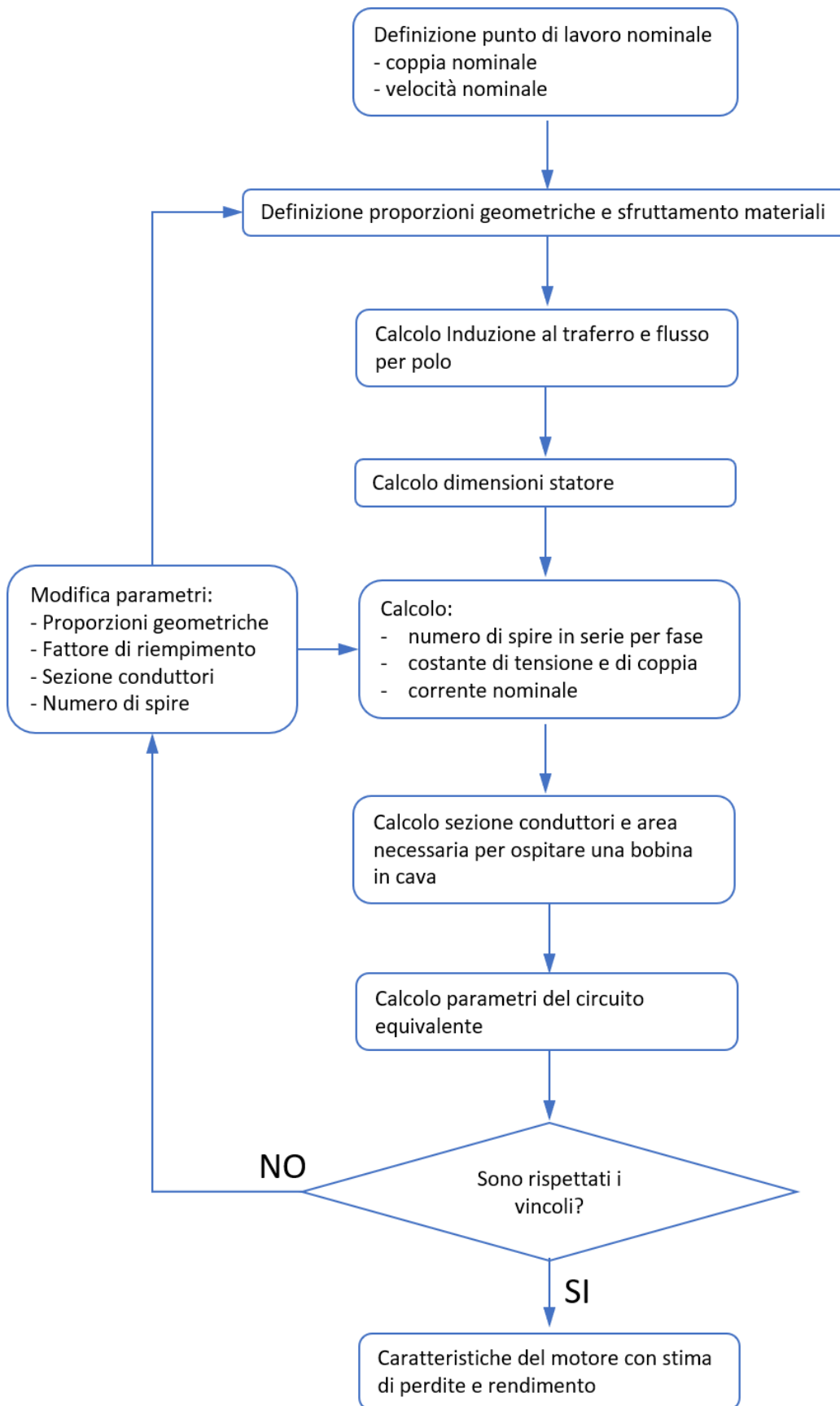


Fig.75 Diagramma di flusso del calcolo analitico



Ottenute le grandezze elettriche con il calcolo analitico, si procede con la verifica del punto di lavoro prescelto. Viene considerato il modello in asse d-q (Fig.76):

$$\bar{V}_{dq} = R_s \cdot \bar{I}_{dq} + jpp\omega_m \bar{\lambda}_{dq} + \bar{E}_{fem}$$

$$\bar{E}_{fem} = jpp\omega_m \cdot \bar{\lambda}_m$$

$$\bar{\lambda}_{dq} = L_s \cdot \bar{I}_{dq} + \bar{\lambda}_m$$

- $R_s$ : resistenza di fase
- $pp$ : paia-poli
- $\omega_m$ : pulsazione meccanica
- $\bar{I}_{dq}$ : vettore corrente in assi d-q
- $\bar{E}_{fem}$ : vettore f.e.m.
- $\bar{\lambda}_m$ : vettore flusso concatenato dovuto ai magneti

L'induttanza sincrona  $L_s$  nel sistema trifase risulta equivalente alle induttanze negli assi d-q del modello circuitale perché il motore è isotropo. In particolare:

$$L_s = L_q = L_d$$

- $L_q$ : induttanza in asse q
- $L_d$ : induttanza in asse d

Essendo il motore isotropo è possibile controllare la coppia a regime soltanto con la corrente in asse q.

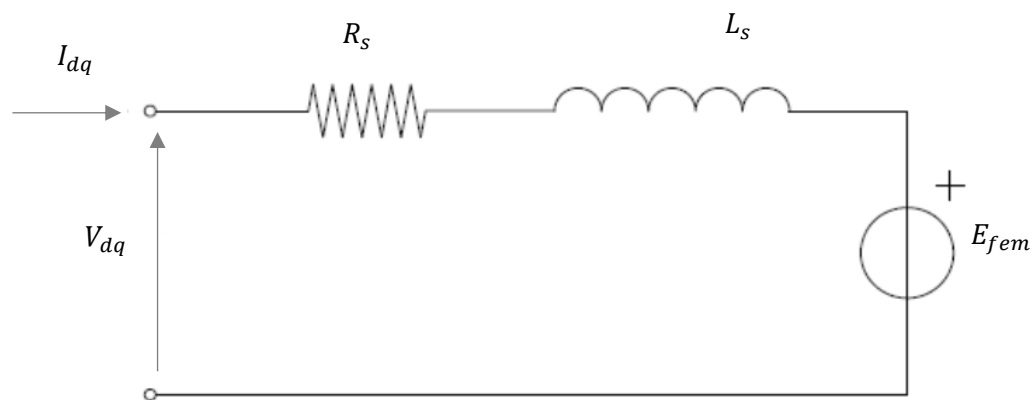


Fig.76 Circuito equivalente motore

La rappresentazione vettoriale del modello in assi d-q permette di disegnare il diagramma di Fig.77.

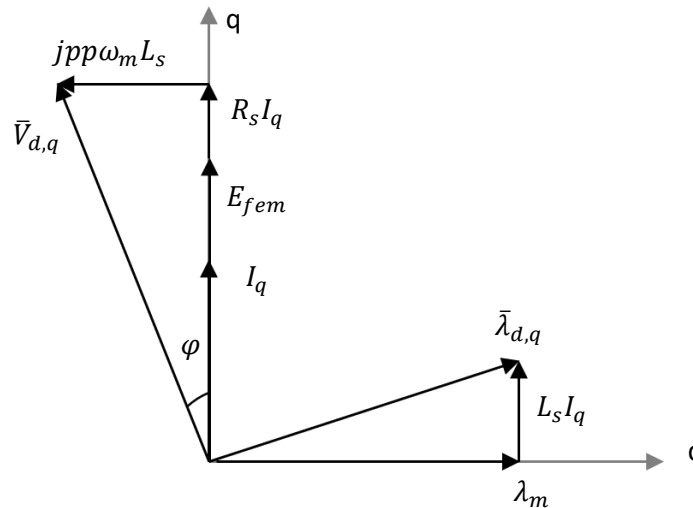


Fig.77 Diagramma vettoriale del modello in assi d-q

Per il funzionamento del motore, nel punto di lavoro prescelto, è necessario che la tensione di alimentazione sia maggiore della tensione  $V_{d,q}$ . In caso contrario si procede con un nuovo dimensionamento che prevede una spira in meno per ogni dente, fino a quando non viene rispettata la condizione sulla tensione.

Nelle Tab.8, Tab.9, Tab.10 vengono riportati: dati di ingresso del dimensionamento, caratteristiche e sfruttamento dei materiali utilizzati, principali dimensioni geometriche.

Coppia nominale	$T_n$	200 mNm
Velocità nominale	$n_n$	4000 rpm
Potenza meccanica	$P_m$	83,78 W
Tensione DC-link	$V_{DC}$	12 V
Frequenza Nominale	$f_n$	266,67 Hz
Numero cave	$N_c$	12
Numero fasi	$m$	3
Numero coppie polari	$pp$	4
Numero di cave polo fase	$q$	0,5
Fattore avvolgimento	$k_{avv}$	0,933
Coefficiente di impacchettamento	$k_{fill}$	0,375
Numero di bobine per fase	$N_b$	4

Tab.8 Dati di ingresso del dimensionamento

Densità SMC Statore	$\gamma_{SMC}$	7240 Kg/m <sup>3</sup>
Densità magneti NdFeB	$\gamma_{NdFeB}$	5655 Kg/m <sup>3</sup>
Altezza magnete	$l_m$	3,5 mm
Induzione residua magnete	$B_r$	0,591 T
Massima energia prodotta del magnete	$(B \cdot H)_{max}$	61,69 kJ/m <sup>3</sup>
Densità rame	$\gamma_{rame}$	8940 Kg/m <sup>3</sup>
Resistività rame	$\rho_{rame}$	1,6810 <sup>-8</sup> Ω · m
Induzione massima del giogo di statore	$B_{s,max}$	1,2 T
Induzione massima del giogo di rotore	$B_{r,max}$	1,5 T
Induzione massima del dente di statore	$B_{t,max}$	1,5 T
Densità di corrente	$J$	8,5 A/mm <sup>2</sup>
Massima densità lineare di corrente	$A_{max}$	200 A/cm

Tab.9 Caratteristiche e sfruttamento dei materiali

Diametro esterno massimo (con scarpa)	$D_{2,max}$	68 mm
Diametro esterno	$D_2$	64 mm
Rapporto diametro interno/esterno	$k_D$	0,6406
Diametro albero	$D_{sh}$	8 mm
Diametro per cuscinetto	$D_{ball}$	22 mm
Traferro	$l_{tr}$	1 mm
Apertura di cava	$w_0$	2 mm
Spessore carta kepton	$w_k$	0,2 mm
Altezza statore	$h_{statore}$	15,8 mm
Altezza scarpa	$h_1$	2 mm

Tab.10 Dimensioni geometriche in ingresso

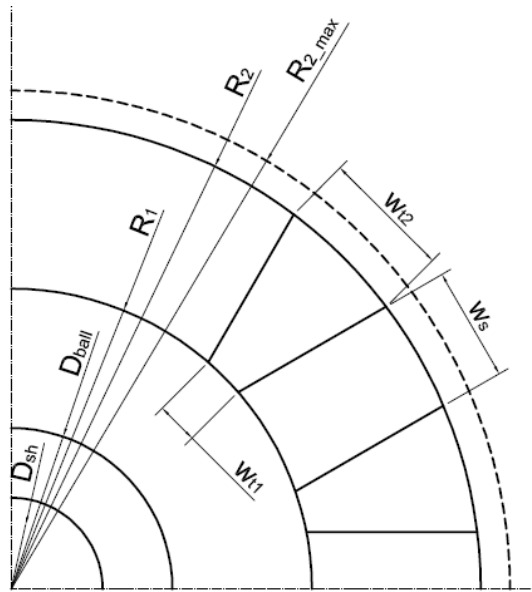


Fig.78 Vista dall'alto di una parte dello statore con principali grandezze geometriche

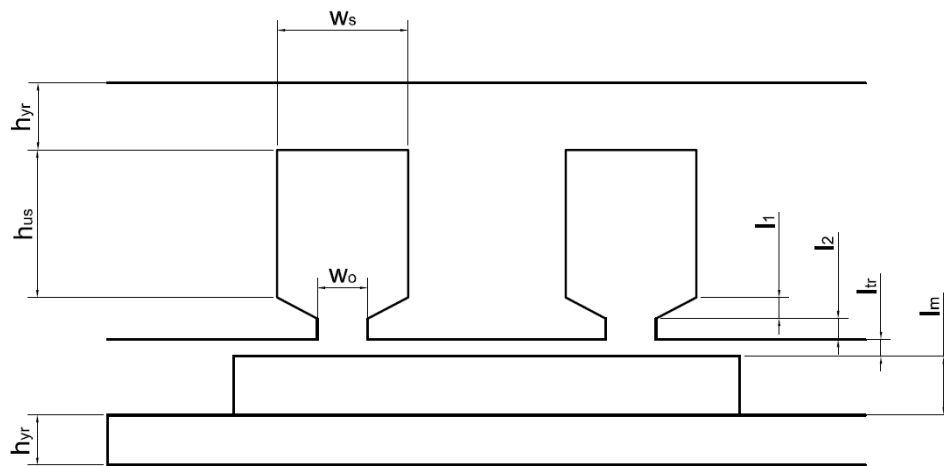


Fig.79 Schema di statore e rotore con principali grandezze geometriche

L'elaborazione dei dati di ingresso porta ai risultati delle Tab.11, Tab.12: dimensioni geometriche, caratteristiche elettriche.

Altezza utile di cava	$h_{us}$	9,5 mm
Larghezza utile di cava	$w_s$	7,8 mm
Spessore dente al diametro interno	$w_{t1}$	2,93 mm
Spessore dente al diametro esterno	$w_{t2}$	8,96 mm
Altezza giogo di rotore	$h_{yr}$	3 mm
Area utile di cava per conduttori	$A_{us_b}$	37,05 mm

Tab.11 Dimensioni geometriche

Corrente nominale	$I_n$	10,73 A
Resistenza di fase	$R_s$	37,98 mΩ
Induttanza sincrona	$L_s$	94 μH
Forza elettromotrice	$E_{fem}$	3,54 V
Costante di velocità	$K_{e,y}$	0,0531 V/rps
Costante di coppia	$K_{t,y}$	0,0186 Nm/A
Perdite joule	$P_j$	13,13 W
Perdite nel ferro	$P_{fe}$	8,08 W
Efficienza	$\eta$	0,80

Tab.12 Caratteristiche elettriche

	Da calcolo analitico		Soluzione adottata	
Numero di spire per fase	$N_y$	10	$N_{y, //}$	20
Diametro del conduttore	$D_{cond}$	1,3 mm	$D_{cond, //}$	0,85 mm
Sezione del conduttore	$S_{cond}$	1,329 mm <sup>2</sup>	$S_{cond, //}$	0,57 mm <sup>2</sup>

Tab.13 Caratteristiche avvolgimento da calcolo analitico (sinistra) e soluzione adottata (destra)

La tabella (Tab.13) riporta le caratteristiche relative all'avvolgimento.

Il diametro del filo  $D_{cond}=1,3mm$ , ottenuto con il dimensionamento, non risulta adatto per l'avvolgimento manuale, per cui si utilizzano due fili di diametro  $D_{cond, //} = 0,85mm$  collegati in parallelo.

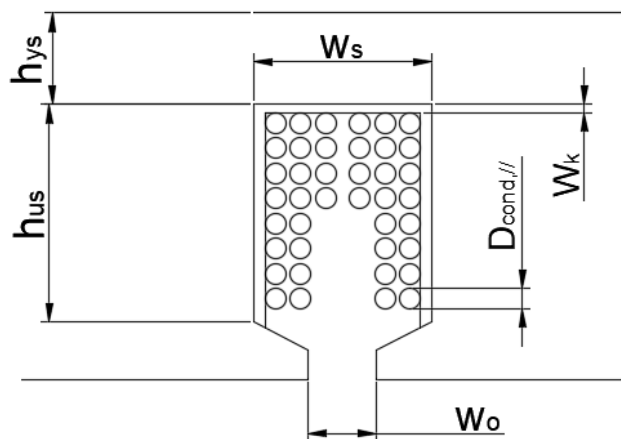


Fig.80 Schema posizionamento conduttori in cava

La configurazione a doppio strato non è realizzabile perché l'altezza complessiva di statore è 15,8mm, per cui l'avvolgimento prevede tre strati, che danno cave più basse e larghe (Fig.80).

La Fig.81 mostra il modello del prototipo realizzato in SolidWorks e la Fig.82 la sua sezione.

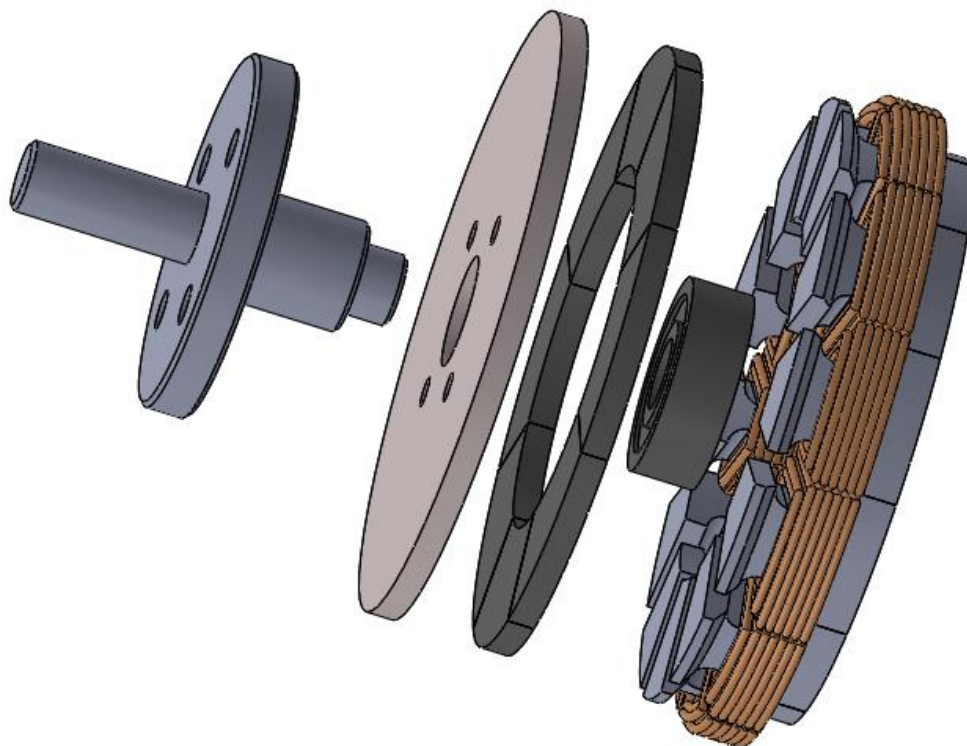


Fig.81 Dettaglio delle componenti del motore. Da sinistra a destra: albero, giogo di rotore, magneti, cuscinetto a sfere e statore con avvolgimenti

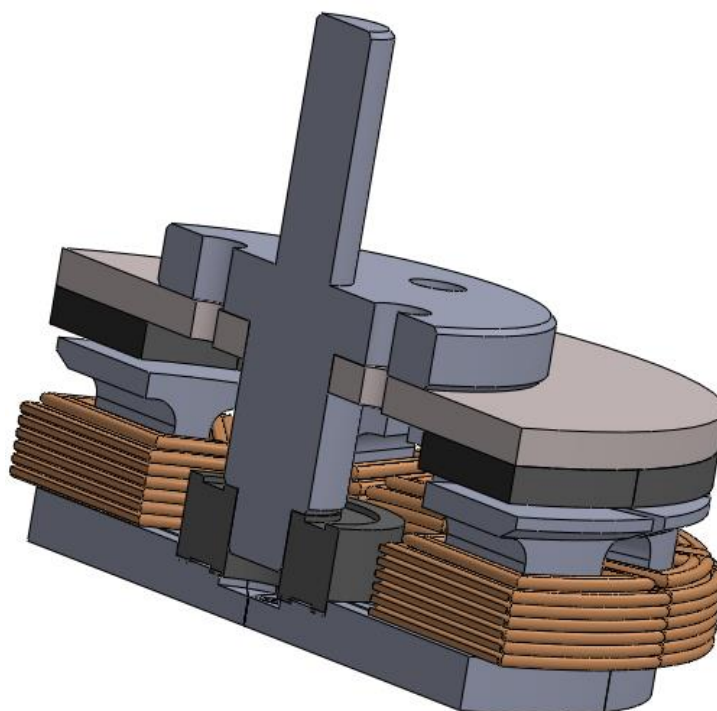


Fig.82 Sezione del prototipo

## 8.2 Rotore

La Fig.83 mostra il modello del rotore da produrre.

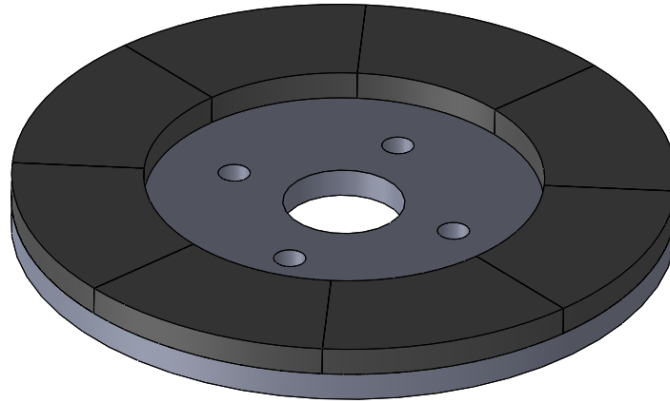


Fig.83 Modello del rotore da produrre

### 8.2.1 Magneti di rotore

#### Componenti della mescola

I plasto-magneti prodotti e studiati risultano costituiti da:

- polvere di Neodimio-Ferro-Boro, nota come “NdFeB”, commercializzata dall’azienda Magnequench.  
Essa risulta particolarmente adatta alla produzione di strutture ad alta densità grazie all’assenza quasi totale di impurità e alla facile compressione.
- resina fenolica in polvere, polimero derivato dalla reazione tra fenolo e formaldeide.  
È un materiale termoindurente con struttura lineare che, per effetto del calore, crea legami trasversali tra le molecole realizzando la reticolazione, che conferisce rigidità.

#### Fasi preliminari

Per evitare inalazioni nocive si opera sotto cappa chimica, la cui aspirazione deve essere temporaneamente spenta e lo sportello “sali-scendi” abbassato per evitare eventuali correnti d’aria che potrebbero falsare le misure. Utilizzando il cucchiaio spatola le due polveri sono messe in un becker, rispettando le seguenti percentuali in peso: 96,7% per ferro e 3,3% per resina fenolica. Si sceglie di utilizzare 3,3% di resina fenolica per conferire ai plastomagneti migliori proprietà meccaniche (alta resistenza alla deformazione) ed elettromagnetiche (minori correnti parassite).

Per le pesate viene utilizzata la bilancia “Sartorius GP3202” (Fig.84), strumento con portata 3200 g e sensibilità  $\pm 0,01$ g. La quantità di polvere prevista per ottenere 6 provini cilindrici di diametro 40 mm e altezza 3,6 mm è di 200g, di cui 193,4 g di NdFeB e 6,6 g di resina fenolica. Dei 6 cilindri ottenuti, 4 sono fresati per ricavare 2 sagome ciascuno, per un totale finale di 8 plasto-magneti, un cilindro è di riserva e uno è sottoposto alla caratterizzazione all'isteresigrafo. Per evitare che la resina fenolica aderisca alle pareti del contenitore, alterando le percentuali della futura composizione, è sufficiente inserire nel becker prima la polvere di NdFeB.

Altro accorgimento è quello di inserire la resina all'interno di una concavità ottenuta nella massa della polvere di NdFeB.

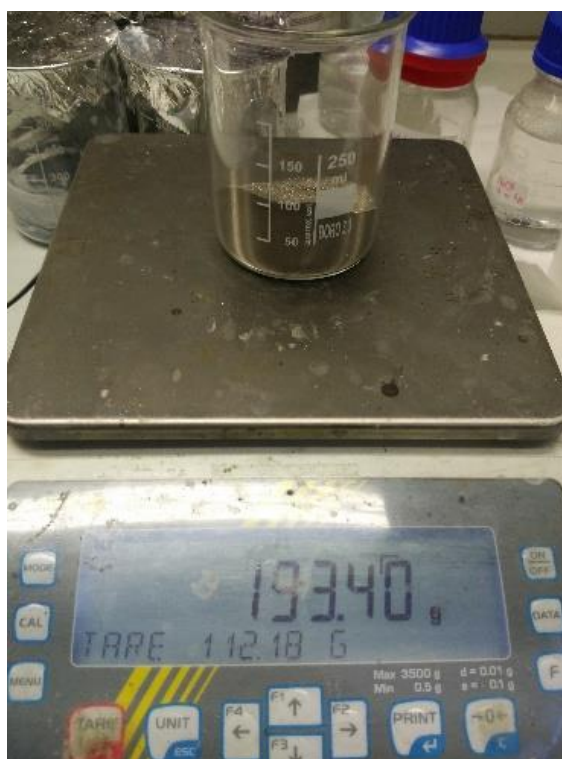


Fig.84 Massa della polvere NdFeB

### Preparazione della miscela

Terminate le fasi preliminari la cappa aspirante viene accesa. Dopo una prima miscelazione mediante il cucchiaio spatola, il contenuto del becker viene versato in un recipiente di plastica con doppio tappo. terminate le operazioni sotto cappa, è prevista una miscelazione meccanica con la turbula, mescolatore a movimentazione tridimensionale azionato per almeno 30 minuti, per assicurare la perfetta distribuzione della resina nella matrice del NdFeB.



### Pressatura della miscela

La pressa lavora con l'uso di un software elaborato in ambiente LabView che consente di impostare i valori dell'altezza della camera, della pressione e della velocità del punzone che sono interdipendenti.

Nei processi industriali, per facilitare l'estrazione dei campioni ottenuti con la pressa, viene addizionata alla miscela una sostanza distaccante. Per evitare che il plasto-magnete abbia una densità minore rispetto a quella attesa e siano presenti componenti non attivi, è preferibile utilizzare uno spray distaccante da applicare sulle pareti della camera, cioè dello spazio che ospita la miscela da compattare, soltanto al momento della pressatura. La miscela viene inserita fino a riempire completamente la camera, le cui dimensioni sono impostate in funzione del risultato.

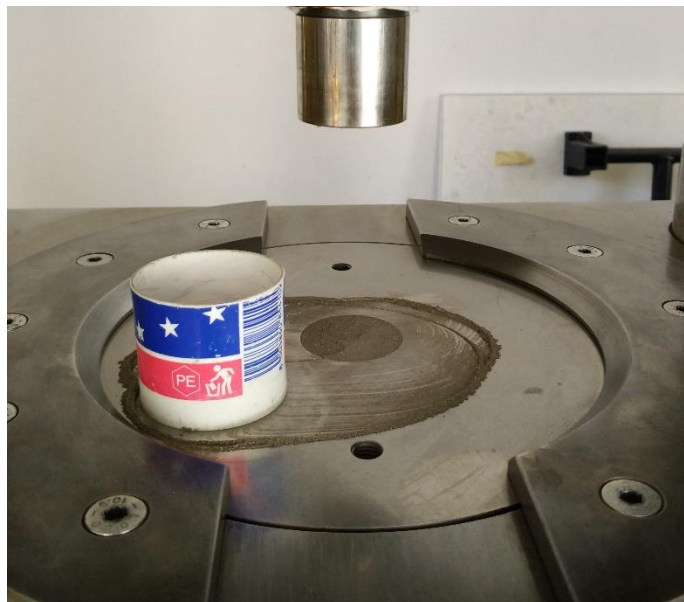


Fig.85 Polvere di NdFeB e resina fenolica nello stampo della pressa

La pressa monta uno stampo cilindrico con diametro pari a 40mm e viene impostata una camera di altezza 8mm, il cui rapporto di pressatura 2,1 permette di ottenere sagome cilindriche alte circa 3,6mm.

La successiva pressatura avviene a freddo esercitando una pressione di 600MPa, corrispondente, nel circuito oleodinamico, al valore pressorio di 114bar. Per evitare la comparsa di crepe nel provino è importante applicare una pressione di mantenimento pari a 10bar al momento dell'estrazione. Una volta pressata la miscela si estrae, si misura e si cataloga con una sigla alfanumerica.

### Trattamento Termico

La sola pressatura non conferisce ai provini le proprietà meccaniche attese, perché la resina non presenta i legami fra le catene che la caratterizzano, dunque manca la reticolazione del polimero.

La **cura** (*curing*), cioè il processo di reticolazione della matrice polimerica, si ottiene con trattamento termico. Allo scopo i campioni sono posti in un recipiente di alluminio e messi in un forno industriale alla temperatura di 150 °C per 30 minuti.

### Misura della massa

Dopo il trattamento termico di ogni provino ne viene misurata la massa con una bilancia di precisione con sensibilità  $10^{-4}g$  e che dispone di una copertura di vetro per ridurre eventuali errori di misura dovuti a correnti d'aria.

### Calcolo della densità

Noti la massa e il volume viene calcolata la densità di ciascun provino per scegliere quelli con i valori più simili.

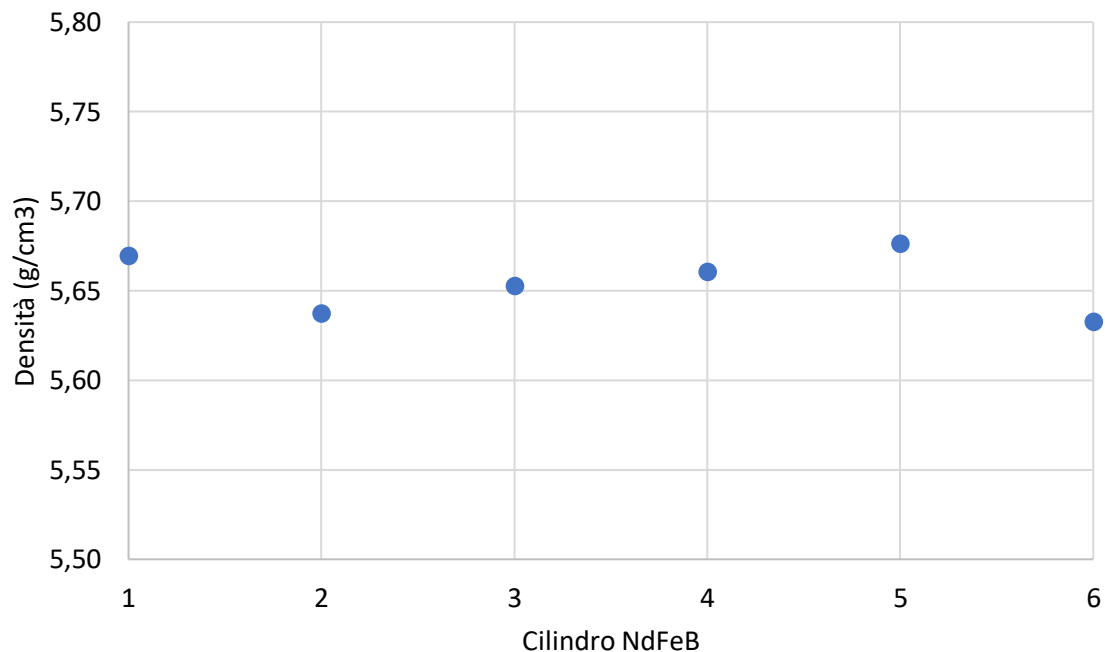


Fig.86 Densità dei cilindri di NdFeB

La densità media dei cilindri risulta 5,66 g/cm<sup>3</sup>. Sono scartati i cilindri di NdFeB che presentano densità meno prossime al valor medio, ovvero il numero 5 e 6. I restanti 4 cilindri, con scostamento tra densità inferiore allo 0,31%, sono selezionati per la fase successiva di fresatura.

### Fresatura

Per lavorare a freddo la superficie dei 4 campioni cilindrici, in modo da ottenere da ciascuno di essi le due sagome desiderate, è stata utilizzata una fresatrice a controllo numerico. Tale macchina utilizza utensili rotanti a tagli multipli, detti fresa, con asportazione di truciolo. La fresa si muove sugli assi y e z mentre il banco di lavoro, su cui è ancorato il campione, si sposta sull'asse delle x. Per ottenere nei cilindri l'altezza di 3,5mm è necessario spianarne la superficie con una fresa di diametro 10mm. Invece per la sagomatura degli stessi si utilizza una fresa di diametro 3mm.

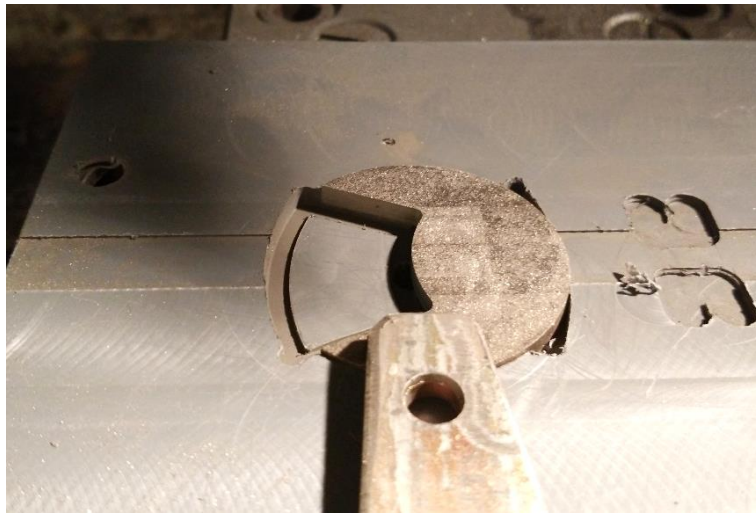


Fig.87 Sagomatura del cilindro NdFeB bloccato con staffa

Dopo la fresatura ogni sagoma viene spruzzata con lacca protettiva dell'azienda Struers per evitare l'attacco da agenti esterni.

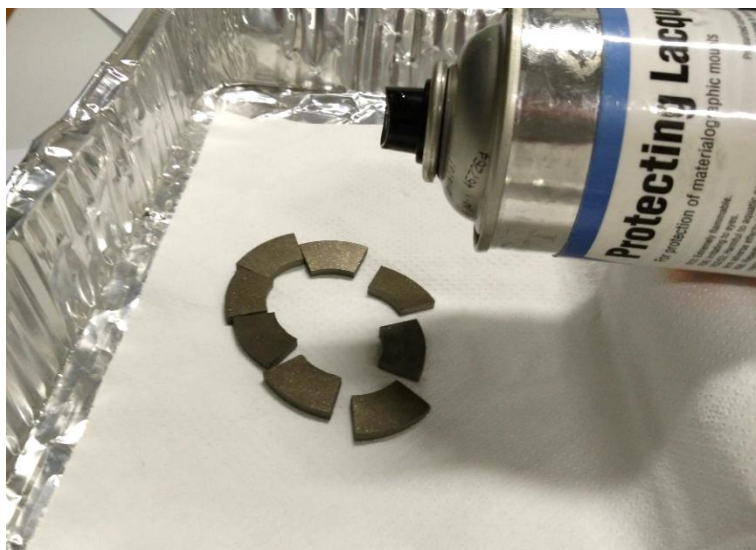


Fig.88 Applicazione lacca protettiva

## Magnetizzazione

I dischi sagomati di NdFeB vengono magnetizzati con le opportune polarità tramite il magnetizzatore con bobina di diametro 100mm e altezza 150mm.



Fig.89 Magnetizzatore

## Caratterizzazione del magnete NdFeB

L'isteresigrafo viene utilizzato per effettuare la caratterizzazione di un magnete NdFeB.

Lo strumento permette di valutare, alla temperatura ambiente di 22°C, le caratteristiche magnetiche dei materiali ferromagnetici duri, fornendo la curva polarizzazione-campo magnetico (J-H) nel secondo quadrante.

Il magnete viene inserito tra le espansioni polari di un elettromagnete, chiuse su se stesse.

La relazione tra induzione magnetica, polarizzazione magnetica e campo magnetico è:

$$B = J + \mu_0 \cdot H$$

- $B$  : induzione magnetica
- $J$  : polarizzazione magnetica
- $\mu_0$  : permeabilità del vuoto
- $H$  : campo magnetico



Fig.90 Isteresigrafo

Il software gestisce la produzione del campo magnetico, tramite controllo dell'alimentatore, e l'acquisizione della misura, tramite i flussometri.

Il flussometro è un misuratore dinamico di flusso magnetico. La variazione di flusso magnetico nel tempo in un circuito dà origine ad una tensione indotta:

$$V = - \frac{d\Phi}{dt}$$

L'integrale della misura di tensione ai capi di una bobina permette di ricavare il flusso:

$$\Phi = - \int V \cdot dt$$

Il flusso concatenato ad una bobina di N spire di area A, posizionata perpendicolarmente ad un campo magnetico con induzione media B è dato da:

$$\Phi = N \cdot A \cdot B$$

Da tale relazione si ricava l'induzione media B e supponendo una misura in aria, il campo magnetico H è dato da:

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

Altezza magnete	$l_m$	3,5 mm
Campo coercitivo	$H_c$	417,72 kA/m
Campo coercitivo intrinseco	$H_{cj}$	1027,16 kA/m
Induzione residua	$B_r$	0,591 T
Massima energia prodotta	$(B \cdot H)_{max}$	61,69 kJ/m <sup>3</sup>

Fig.91 Principali caratteristiche del magnete NdFeB

Nel grafico di Fig.92 vengono rappresentate le curve J-H e B-H.

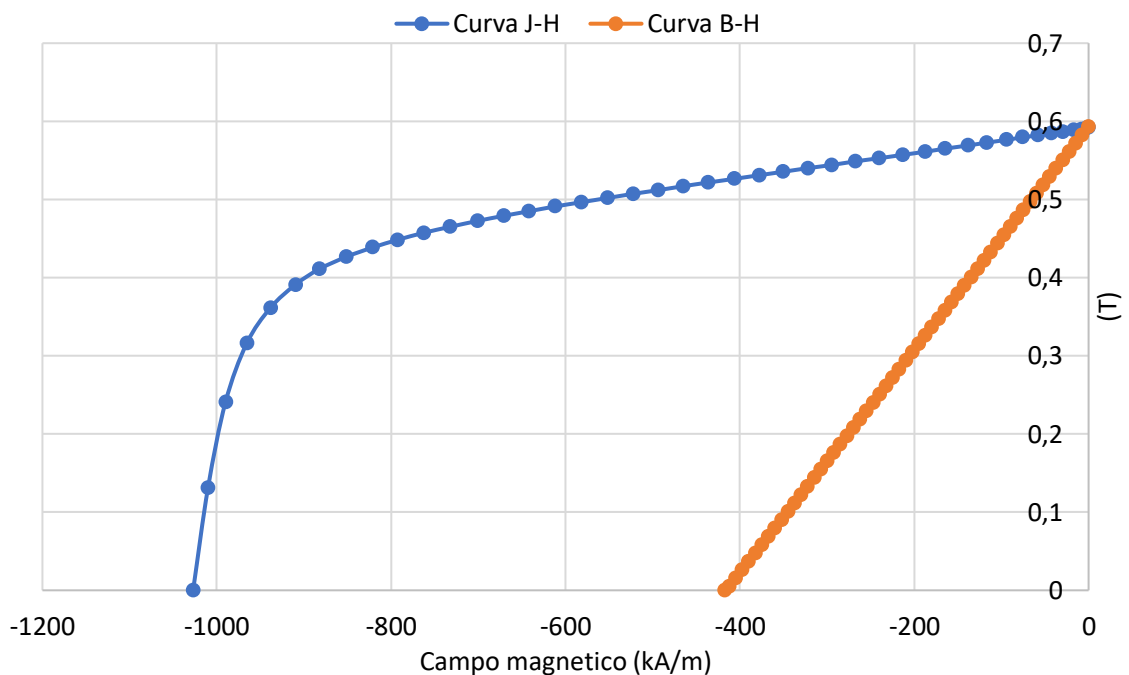


Fig.92 Caratteristiche J-H e B-H del magnete NdFeB

### 8.3.2 Giogo di rotore

Il giogo di rotore si ricava da una lamina di ferro dolce di spessore 5mm. La fresa lavora la lamina in modo da ottenere una sagoma circolare di diametro 68mm con:

- foro circolare centrale di diametro 9mm per alloggiare l'albero del motore
- quattro fori circolari e filettati con diametro 4mm, laterali e simmetrici al foro centrale, per fissare la struttura contenente il cuscinetto a sfera allo statore

La sagoma (Fig.93) viene ridotta ad uno spessore di 3mm con levigatrice metallografica.

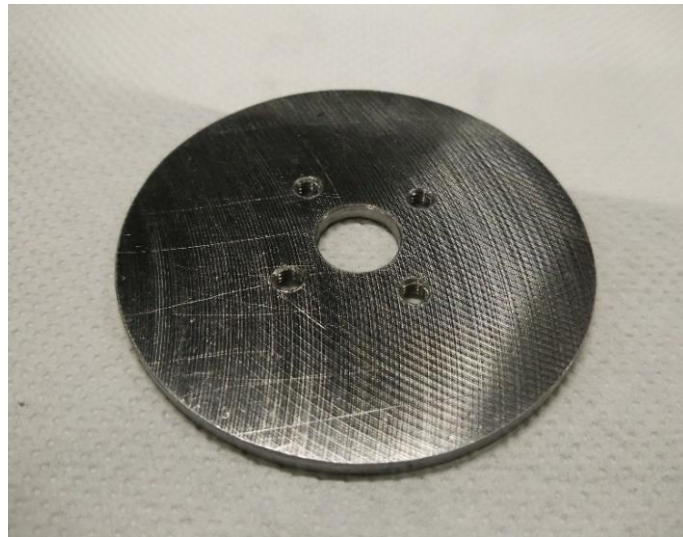


Fig.93 Giogo di rotore al termine delle lavorazioni

### 8.3.3 Assemblaggio del rotore

Prodotti il giogo di rotore e i magneti si procede al loro assemblaggio per ottenere il rotore finale. Gli otto magneti, sagomati in modo da comporre un toroide (Fig.94), sono incollati sulla superficie del giogo di rotore con resina epossidica (Fig.95).

La fase successiva prevede il trattamento termico in forno industriale alla temperatura di 150°C per 30 minuti. Tale operazione consente la cura (*curing*), cioè il processo di reticolazione della resina polimerica.



Fig.94 Otto magneti di NdFeB

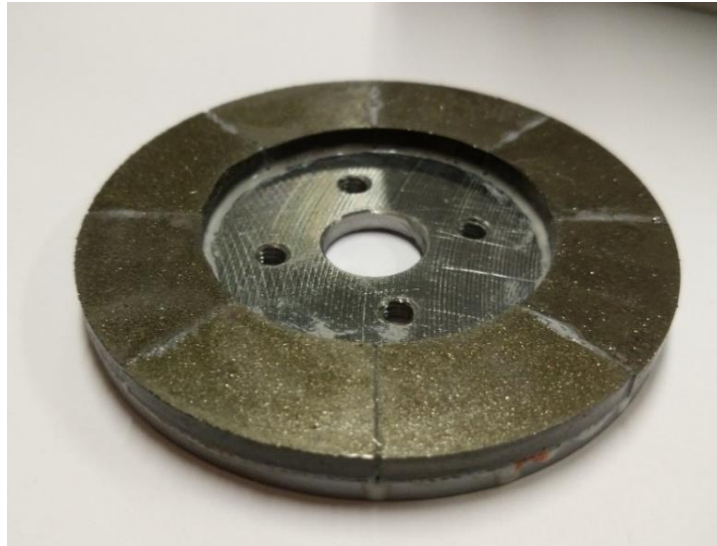


Fig.95 Rotore assemblato

Per osservare posizione e direzione del campo magnetico viene utilizzata la carta verde, ovvero un film plastico contenente una sospensione ferromagnetica di particelle di nichel che si dispongono in base al campo magnetico. Se le linee del campo magnetico sono parallele la carta verde appare più luminosa, se le linee di campo sono perpendicolari la carta verde appare più scura. Il colore più scuro si evidenzia quando la carta è posta sul polo di un magnete (Fig.96).

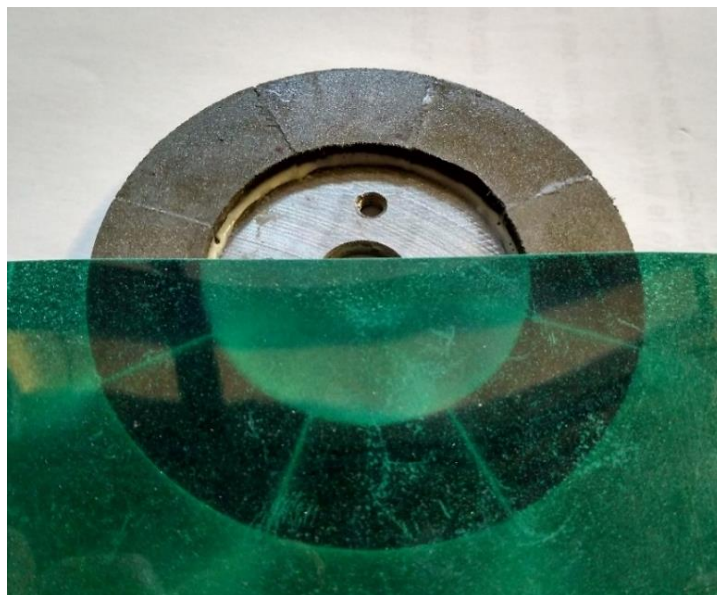


Fig.96 Verifica dell'uniformità della magnetizzazione con carta verde



### 8.3.4 Albero di rotore

L'albero di rotore si ricava da un cilindro di acciaio inox 316, lega cromo (16 ÷ 18%), nichel (11 ÷ 14%), molibdeno (2 ÷ 3%) che aumenta la resistenza alla corrosione.

La lavorazione prevede l'uso del tornio (Fig.97) e della fresa. La fresa agisce sull'albero (Fig.98) per ottenere quattro fori circolari di diametro 4mm, laterali e simmetrici rispetto al centro, che servono per fissare l'albero al giogo con i magneti di rotore.

Segue l'assemblaggio fra albero, giogo di rotore con magneti e cuscinetto a sfera (Fig.99).



Fig.97 Tornio per ottenere l'albero della macchina

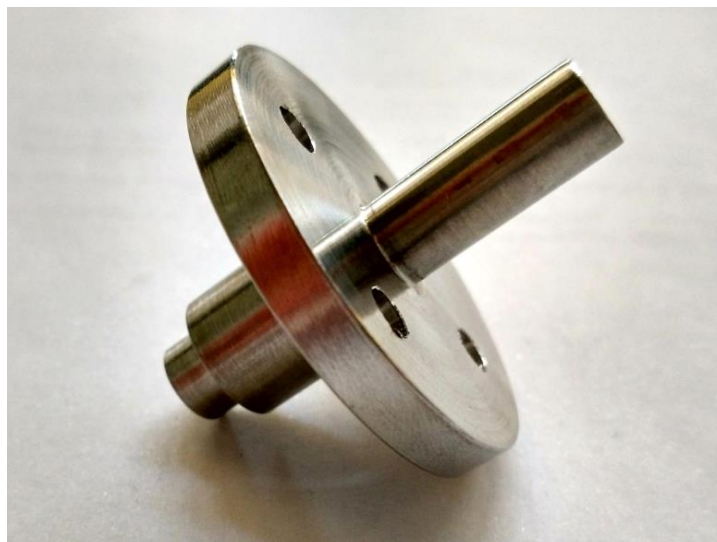


Fig.98 Albero della macchina al termine della lavorazione di tornitura e fresatura



Fig.99 Albero, giogo di rotore con magneti e cuscinetto a sfera

## 8.4 Statore

Lo statore è realizzato in SMC con la stessa procedura descritta nel Capitolo 4 per produrre i campioni da testare, eccetto la fase di pressatura.

La pressa idraulica in uso non consente la compattazione di un unico cilindro di diametro 68mm, diametro esterno massimo del prototipo, dunque si procede alla realizzazione di una macchina modulare composta da sei parti.

La Fig.100 mostra il modello dello statore del prototipo realizzato in SolidWorks.

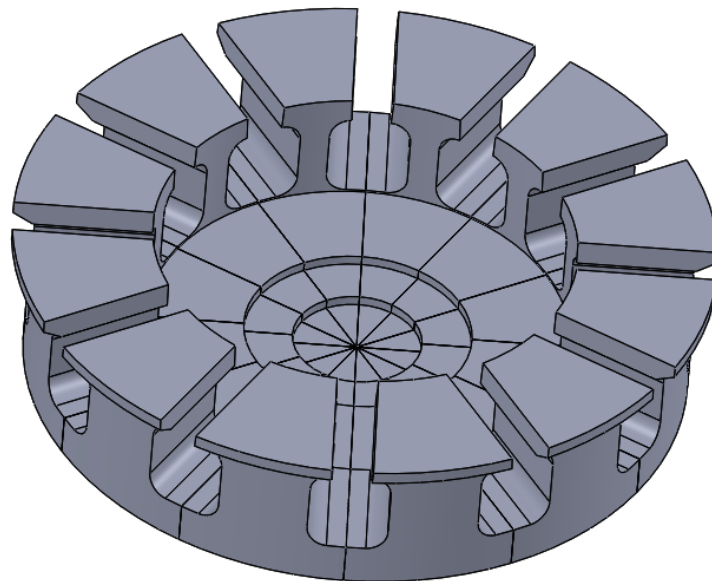


Fig.100 Modello dello statore da produrre

La miscela, costituita da ferro e 0,2% di resina fenolica in peso, viene inserita fino a riempire completamente la camera, le cui dimensioni sono impostate a 33mm. Tale altezza è la massima sfruttabile, ma non consente di ottenere i cilindri di altezza desiderata di circa 16mm. Per ovviare all'inconveniente viene effettuata una prima pressatura manuale delle polveri, cui seguono aggiunte successive di materiale pressato manualmente di volta in volta. La fase successiva prevede l'uso della pressa a freddo, impostata a 600MPa.



Fig.101 Caricamento dello stampo con prima pressatura a mano della polvere

Durante la pressatura è applicato un campo magnetico esterno, realizzato con due bobine collegate ad un alimentatore in corrente continua e disposte una sul punzone superiore e l'altra attorno al punzone inferiore della pressa. Tale configurazione permette di applicare un campo magnetico nord-sud.

Per evitare che il surriscaldamento danneggi il supporto in plastica delle bobine, è stata impiegata una corrente di 35A per un tempo 5s.

Il campo magnetico viene creato nell'istante in cui il punzone raggiunge il livello superiore della camera, pena l'attrazione della miscela al di fuori della stessa.

Prima di ripetere la prova successiva è indispensabile effettuare la smagnetizzazione delle parti coinvolte cambiando la polarità della corrente nelle bobine. Per verificare l'avvenuta smagnetizzazione si ricorre al gaussmetro che deve riportare un valore della densità di flusso magnetico compreso tra  $\pm 5$  mT.

Vengono realizzati otto cilindri (Fig.102), dei quali sei sono sagomati con la fresa (Fig.103), uno è di riserva e uno viene sottoposto ad analisi metallografica.



Fig.102 Otto cilindri di statore



Fig.103 Fresatura cilindri

I sei moduli sagomati (Fig.104) vengono incollati fra loro con resina epossidica (Fig.105) e sottoposti a trattamento termico di curing a 150°C per 30 minuti.

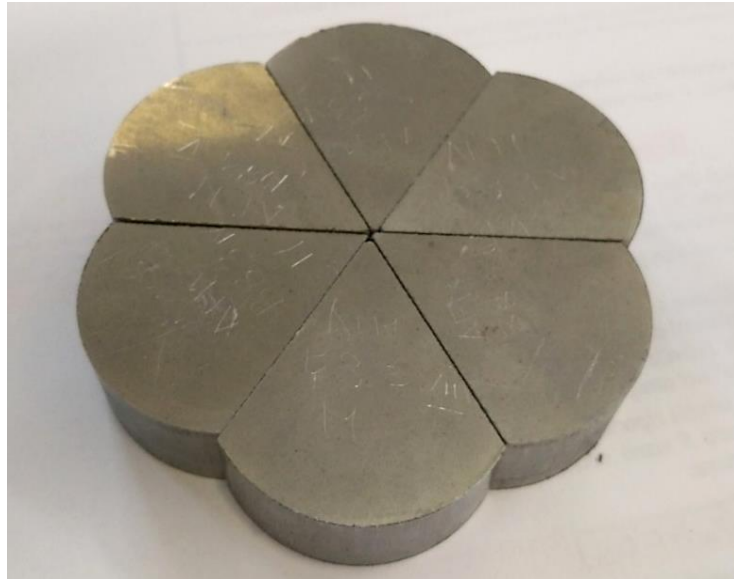


Fig.104 Sei spicchi sagomati

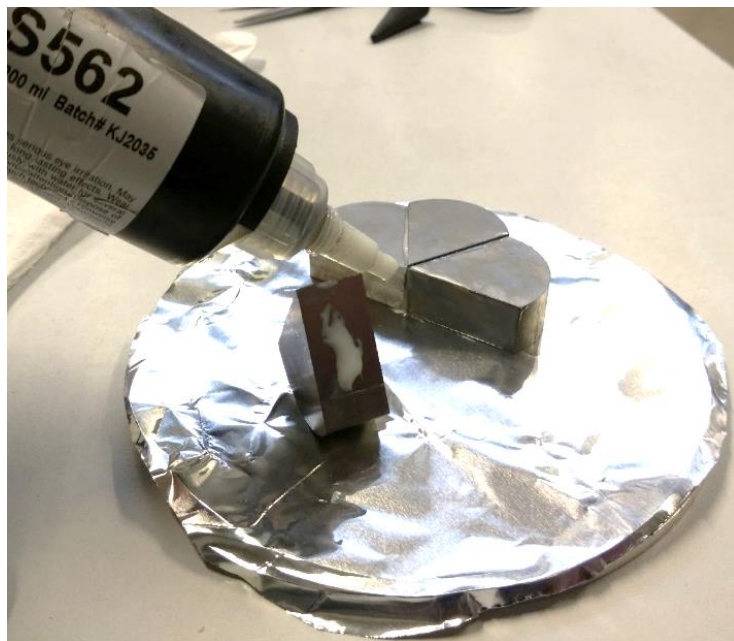


Fig.105 Applicazione della resina epossidica

Dopo il trattamento termico il nucleo di statore viene incollato su un supporto di POM, una resina acetaleica caricata a fibre per aumentare il modulo elastico e renderla più rigida. Tale operazione è necessaria per facilitare l'ancoraggio dello statore durante la fresatura. Per ottenere un'altezza costante di 15,8 mm si usa una levigatrice metallografica.

Seguono diverse fresature per ottenere: diametro interno di 41mm dello statore (Fig.106), diametro massimo esterno comprendente la scarpa di 68 mm e alloggiamento per il cuscinetto per albero di 8mm (Fig.107), diametro esterno di 64mm e apertura cave di 2mm (Fig.108), cave di 7,8 x 9,5mm (Fig.109).



Fig.106 Fresatura al diametro interno di statore



Fig.107 Fresatura diametro massimo esterno comprendente la scarpa e alloggiamento per cuscinetto



Fig.108 Diametro esterno e apertura cave

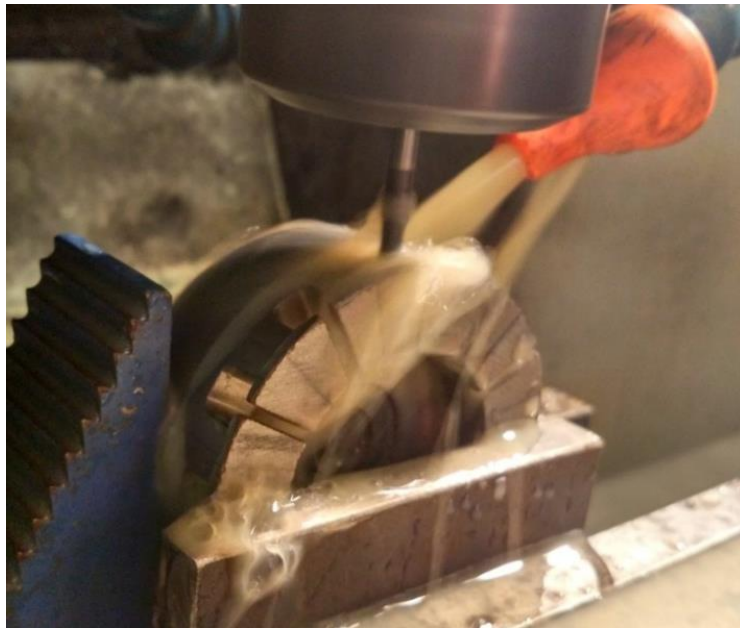


Fig.109 Cave di statore

Osservando la Fig.110 dello statore finito, si notano i bordi esterni irregolari delle scarpe. Il difetto è probabilmente dovuto alla bassa velocità di rotazione della fresa e alla elevata velocità di avanzamento della stessa. Infatti, regolando le due velocità è stato possibile ottenere bordi delle cave più definiti.



Fig.110 Statore al termine della lavorazione di fresatura

Per verificare l'effetto del campo magnetico applicato, viene svolta l'analisi metallografica con microscopio ottico. Uno degli otto cilindri è preparato seguendo la procedura già descritta nel capitolo 6.4 e confrontato con un provino di materiale pressato senza applicazione di campo esterno durante la pressatura.

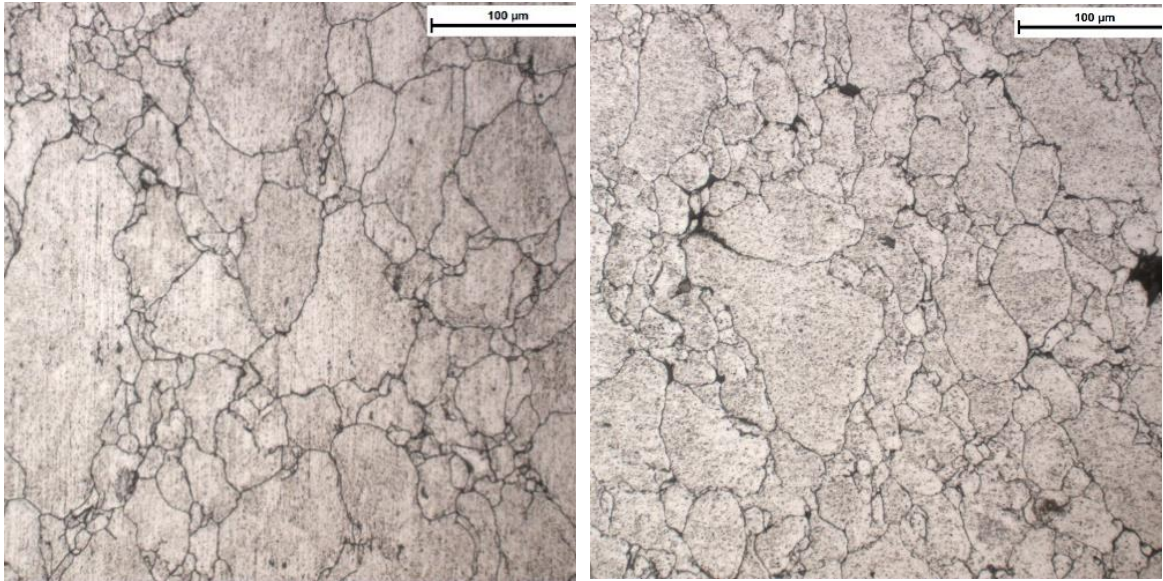


Fig.111 Microstruttura dei due materiali (600MPa) con ingrandimento di 200x. Campione senza campo applicato a sinistra e con campo in direzione della pressatura a destra.

Le immagini di Fig.111 relative ai cilindri pressati senza campo applicato (B8.2 NoM) e con campo applicato (B8.2 M) sono simili e non si rilevano le differenze riscontrate nell'analisi dei campioni toroidi di capitolo 7.5. Le possibili cause sono: campo magnetico di intensità insufficiente perché le linee di campo passano in gran parte nelle colonne della pressa che hanno permeabilità maggiore rispetto alle polveri; campo magnetico applicato per un tempo troppo breve perché abbia effetto su cilindri con massa maggiore rispetto ai campioni toroidi.

## 8.5 Avvolgimento

Prima di procedere all'avvolgimento si provvede alla copertura dei denti di statore con carta kepton e nastro isolante nero. L'operazione evita il contatto elettrico tra spire differenti degli avvolgimenti e nucleo di statore e impedisce che gli spigoli vivi possano danneggiare l'isolante dei conduttori.

Si utilizza il filo dell'azienda Block con diametro complessivo 0,9mm, di cui 0,85mm per il rame, che è isolato con PUR (poliuretano). La temperatura massima di funzionamento è 155°C.



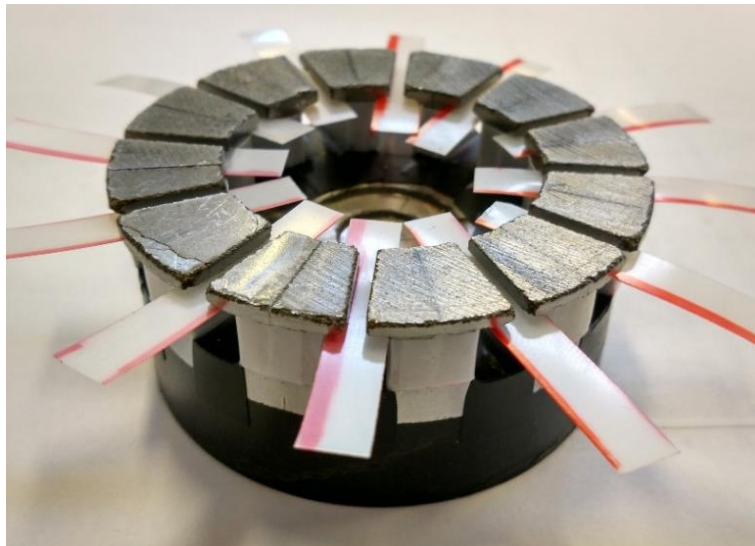


Fig.112 Predisposizione all'avvolgimento

Ciascuno dei 12 denti viene avvolto da 10 spire per formare la prima bobina, indicata con A, cui seguono altre 10 spire che formano la seconda bobina, indicata con B e collegata in parallelo con la prima. In ogni cava sono presenti 40 spire. Ogni bobina viene identificata con una sigla alfanumerica.

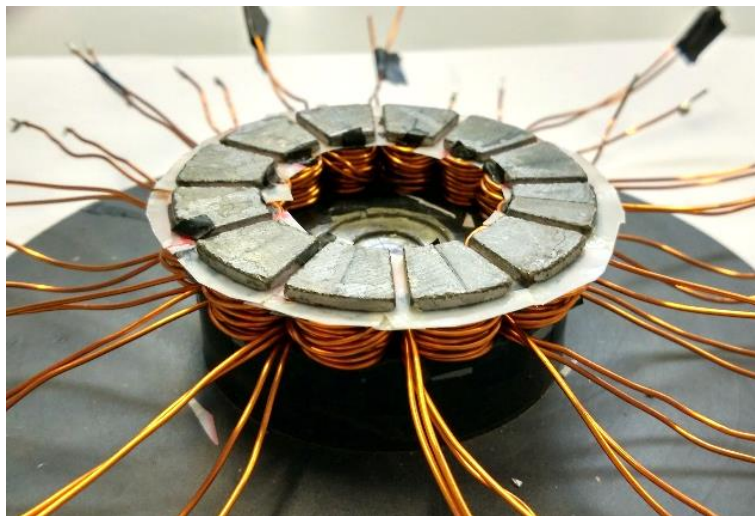


Fig.113 Avvolgimento in corso d'opera

Completato l'avvolgimento è necessario verificare l'eventuale presenza di cortocircuiti tra spire diverse e/o tra spire e nucleo di statore. Allo scopo si eseguono varie misure:

- Resistenza bobina-nucleo effettuata con multimetro digitale
- Resistenza di ogni bobina effettuata con un ponte RLC della Fluke modello PM6306
- Induttanza di ogni bobina effettuata con un ponte RLC della Fluke modello PM6306
- Misura della tensione prodotta da ogni bobina, effettuata sul motore assemblato.

Risultati dei test sull'avvolgimento

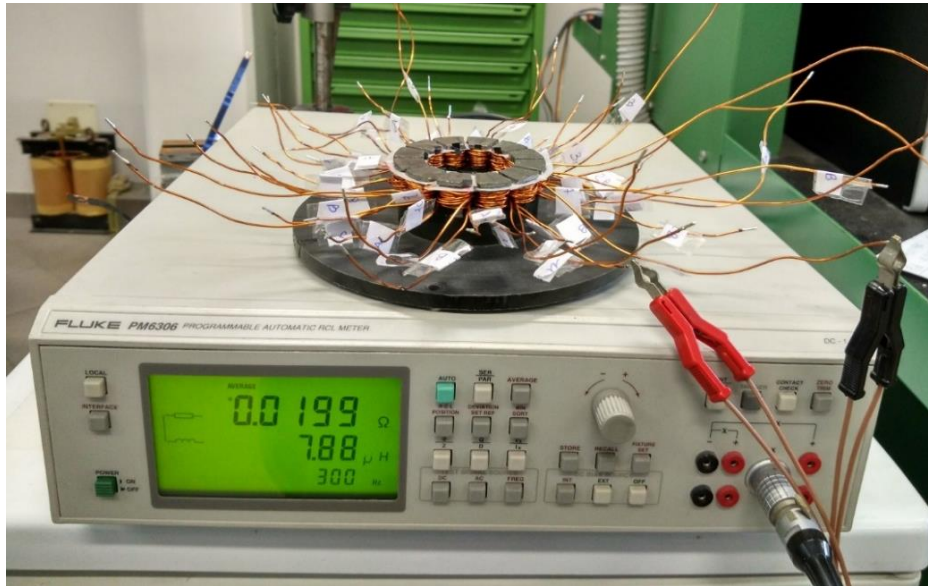


Fig.114 Misurazione di resistenza e induttanza di ogni bobina con ponte RLC

La resistenza è prima testata in corrente continua e poi con una frequenza di 300Hz, ad una temperatura di 21,4°C. I risultati sono visibili nel grafico di Fig.115.

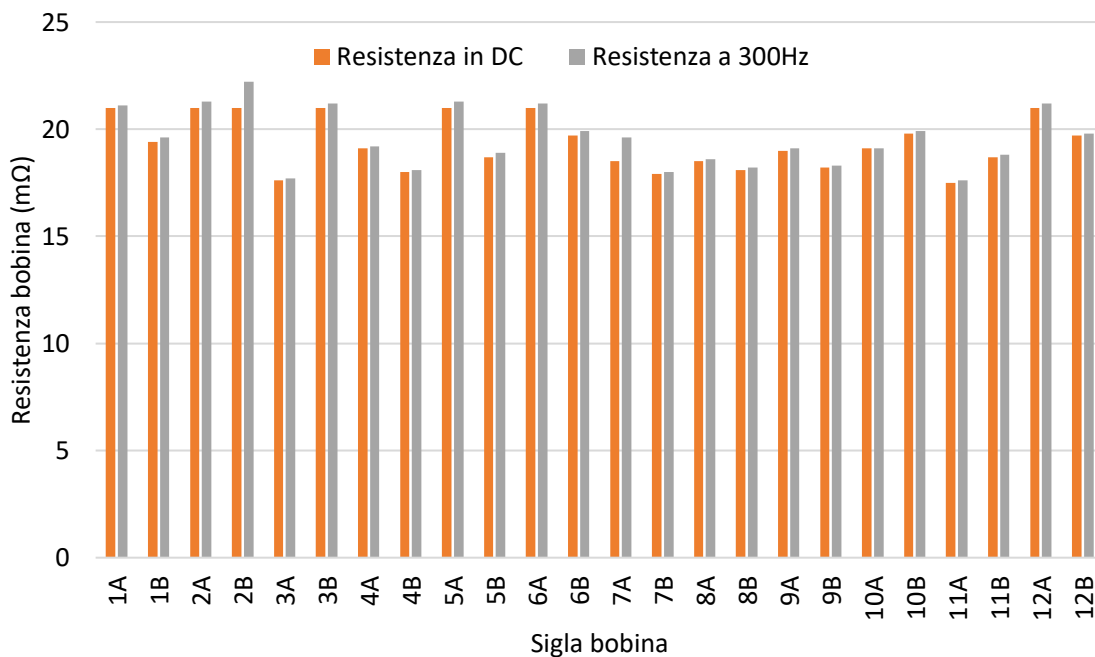


Fig.115 Resistenza di ogni bobina in DC e 300Hz

Tutte le bobine hanno valori simili di resistenza al variare della frequenza.

I valori medi sono:  $R_{DC} = 19,35 \text{ m}\Omega$  ,  $R_{300\text{Hz}} = 19,54 \text{ m}\Omega$ .

Alla frequenza di 300Hz il valore della resistenza media è maggiore del 0,94 % a causa dell'effetto pelle. La variazione massima della resistenza in corrente continua di una bobina rispetto al valor medio è del 10 %.

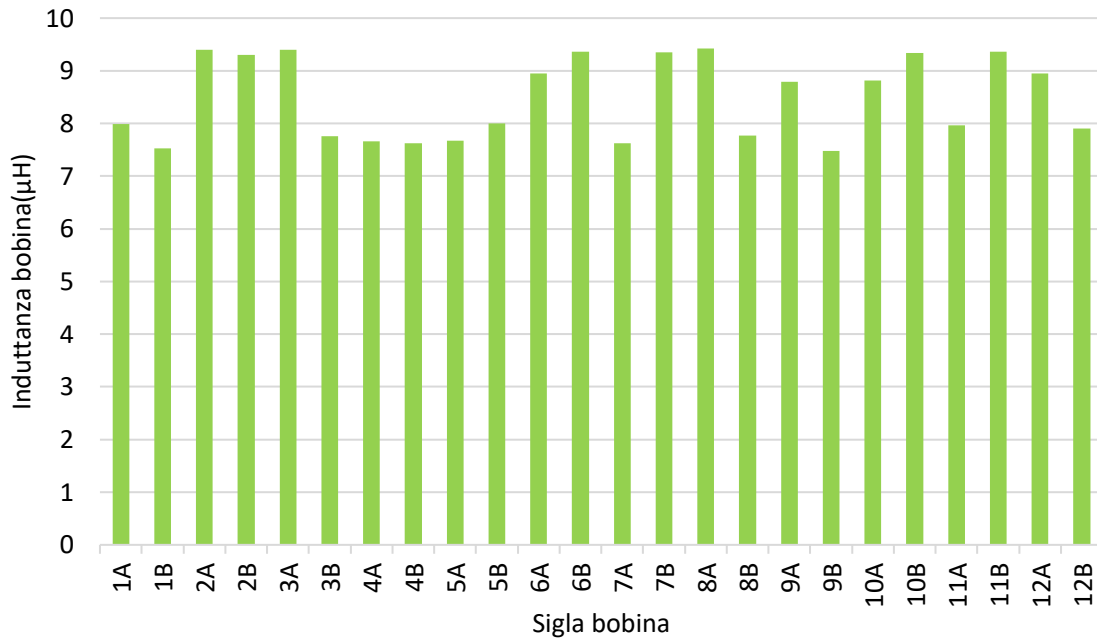


Fig.116 Induttanza di ogni bobina a 300Hz

Tutte le bobine hanno valori simili di induttanza alla frequenza di 300Hz. Il valor medio è:  $L_{300Hz} = 8,48 \mu H$ . La variazione massima dell'induttanza a 300Hz di una bobina rispetto al valor medio è di 11,8%. Lo scostamento rispetto al valor medio è accettabile ed è indice dell'assenza di cortocircuiti.

Il motore completamente assemblato viene messo in rotazione con velocità 1000rpm per misurare la tensione efficace prodotta da ogni bobina. Il risultato della misurazione, effettuata con multimetro digitale, è riportato nel grafico di Fig.117.

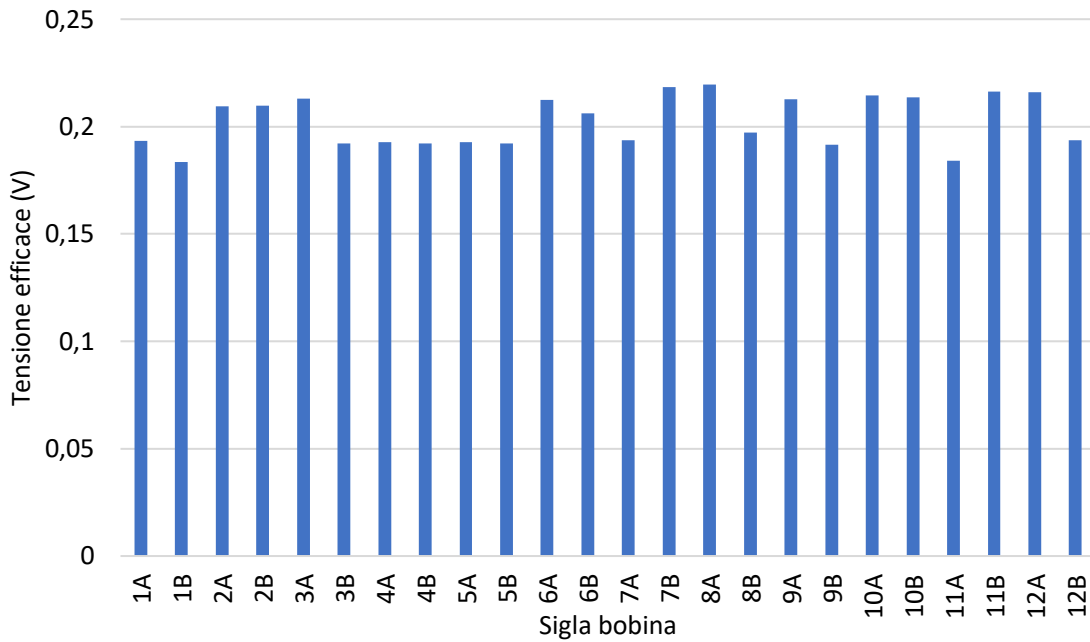


Fig.117 Tensione efficace su singola bobina

I valori di tensione efficace sono simili, il loro valor medio è:  $V_{1000rpm} = 0.203 \text{ V}$ .

La variazione massima della tensione di una bobina rispetto al valor medio è 9,4%.

Tutte le prove effettuate hanno evidenziato scostamenti accettabili rispetto ai valori medi, indici dell'assenza di cortocircuiti.

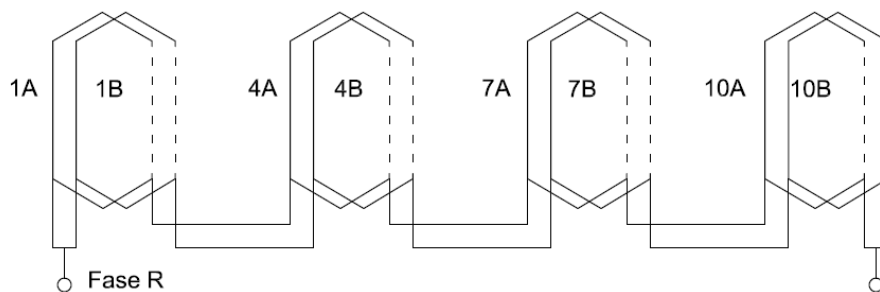


Fig.118 Schema collegamento fase R

Effettuate tali verifiche, è stato possibile procedere alla saldatura (Fig.119) delle singole bobine per completare l'avvolgimento secondo lo schema di Fig.118, le cui linee continue e tratteggiate indicano rispettivamente ingressi e uscite delle bobine.

Le resistenze di fase sono prima testate in corrente continua e poi alla frequenza di 300Hz, ad una temperatura di 20,2°C:

- Fase R:  $R_{R\_DC} = 38 \text{ m}\Omega$   $R_{R\_300Hz} = 38,5 \text{ m}\Omega$
- Fase S:  $R_{S\_DC} = 37,3 \text{ m}\Omega$   $R_{S\_300Hz} = 37,9 \text{ m}\Omega$
- Fase T:  $R_{T\_DC} = 38,2 \text{ m}\Omega$   $R_{T\_300Hz} = 38,7 \text{ m}\Omega$

L'induttanza di fase testate alla frequenza di 300Hz risultano:

- Fase R:  $L_{R_{300Hz}} = 34,6 \mu H$
- Fase S:  $L_{S_{300Hz}} = 34,3 \mu H$
- Fase T:  $L_{T_{300Hz}} = 34,7 \mu H$

L'ultima operazione prevede la connessione a stella delle fasi R,S,T.

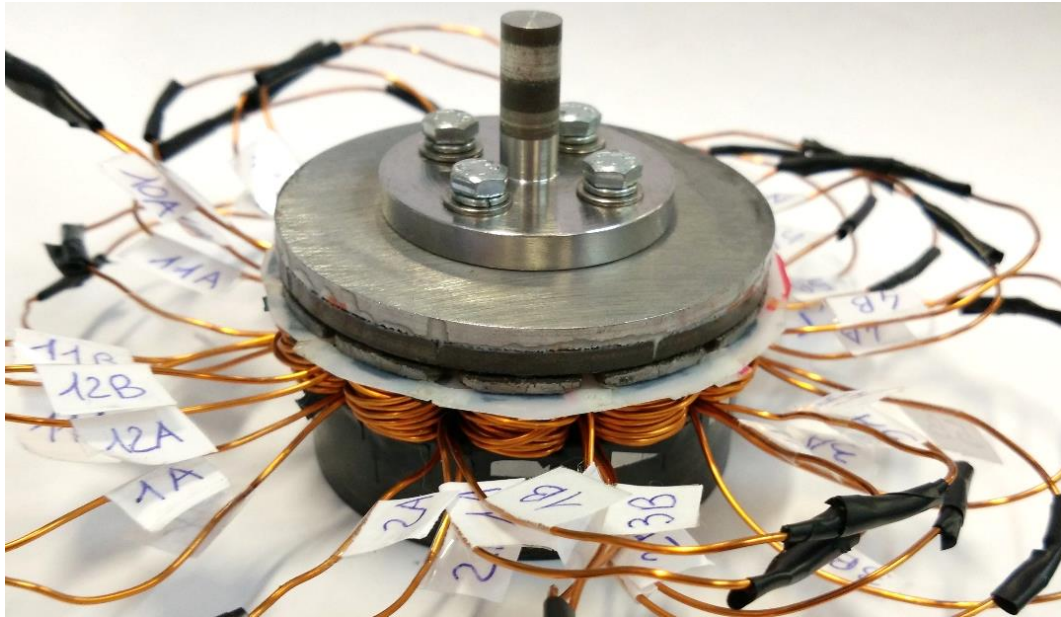


Fig.119 Saldature delle bobine su motore assemblato

# Capitolo 9

## RISULTATI SPERIMENTALI

### 9.1 Prova di cogging

La coppia di cogging è un fenomeno tipico dei motori a magneti permanenti, dovuto alla presenza delle cave che comporta diversa situazione magnetica locale in funzione della posizione del rotore, e produce ondulazione di coppia. La coppia di cogging si presenta sia a motore alimentato che non alimentato.

A causa della forza attrattiva, il rotore tende ad affacciarsi con il più alto numero di denti statorici minimizzando la riluttanza di una linea di flusso e massimizzando l'energia magnetica immagazzinata.

La minimizzazione della coppia di cogging è fondamentale per ridurre le ondulazioni di coppia, le vibrazioni, il rumore e ottenere un azionamento ad alte prestazioni.

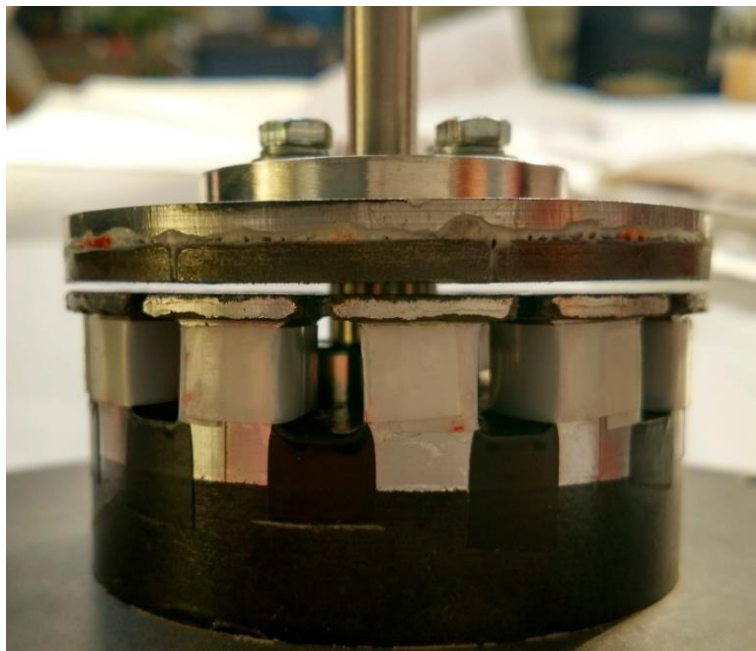


Fig.120 Prototipo del motore pronto per essere montato sul banco prova

La prova di cogging viene realizzata con un banco prova composto da:

- Motore passo-passo
- Albero in più parti, collegate fra loro da giunti elicoidali elastici
- Torsionmetro con valore fondo scala pari a 200 mNm
- Scheda di acquisizione dati
- Prototipo del motore in prova

Il motore passo-passo determina la rotazione del rotore secondo lo spostamento angolare di  $0,18^\circ$  meccanici ogni 250ms. Il tempo di attesa è necessario per evitare l'influenza delle oscillazioni dovute all'inerzia del rotore. Il torsionmetro misura la coppia generata dal rotore per un giro, che si completa in 2000 passi.

L'operazione di avvolgimento dei denti statorici risulta particolarmente difficoltosa e potrebbe danneggiare lo statore per cui il prototipo viene testato senza bobine, anche perché non necessarie per la prova.

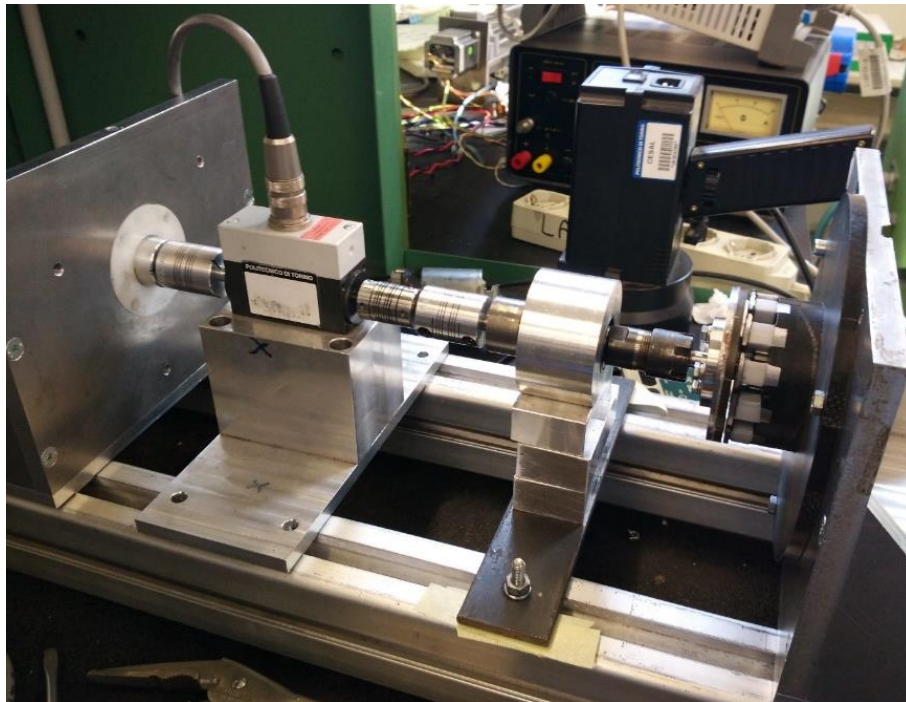


Fig.121 Banco prova di cogging

Nonostante l'accuratezza nell'assemblaggio del motore, il traferro non risulta costante e tale fatto influenza i risultati delle prove.

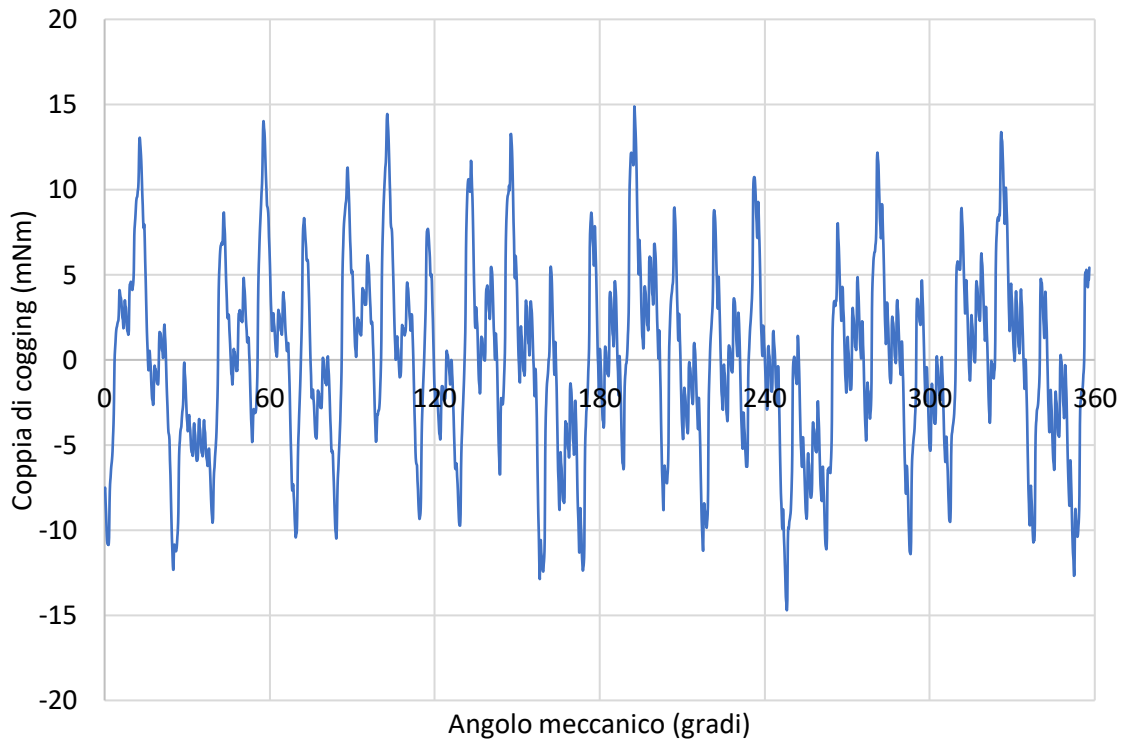


Fig.122 Coppia di cogging

Il valore massimo di coppia di cogging, registrato a 200° meccanici, è 15 mNm che rappresenta il 7,5% della coppia nominale. Il valore picco-picco è 25mNm. Nel complesso si nota una forma d'onda simmetrica con valori massimi più bassi di quelli registrati dai motori a flusso assiale usualmente in commercio, che di norma non possiedono le scarpe.

#### ANALISI ARMONICA

L'ordine armonico della coppia di cogging, in generale, dipende dal minimo comune multiplo tra il numero dei denti di statore e quello dei poli di rotore. Nel caso in questione i denti di statore sono 12 e i poli di rotore sono 8.

$$T_{cg} = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \cdot \text{sen}(kN_{cg}\theta + \varphi_k)$$

- $T_k$  : ampiezza della componente armonica k-esima
- $\varphi_k$  : fase della componente armonica k-esima
- $\theta$  : posizione angolare di rotore
- $N_{cg}$  : pulsazione della coppia di cogging data dal minimo comune multiplo tra numero di denti di statore e quello dei poli di rotore



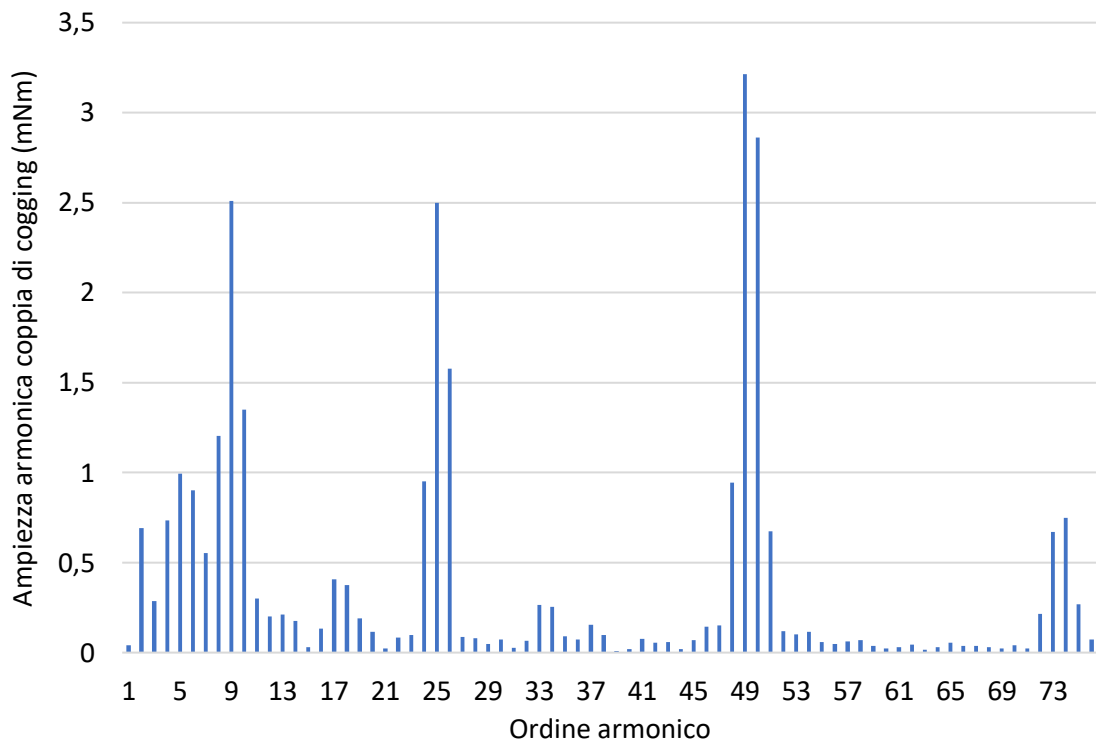


Fig.123 Spettro armonico coppia di cogging

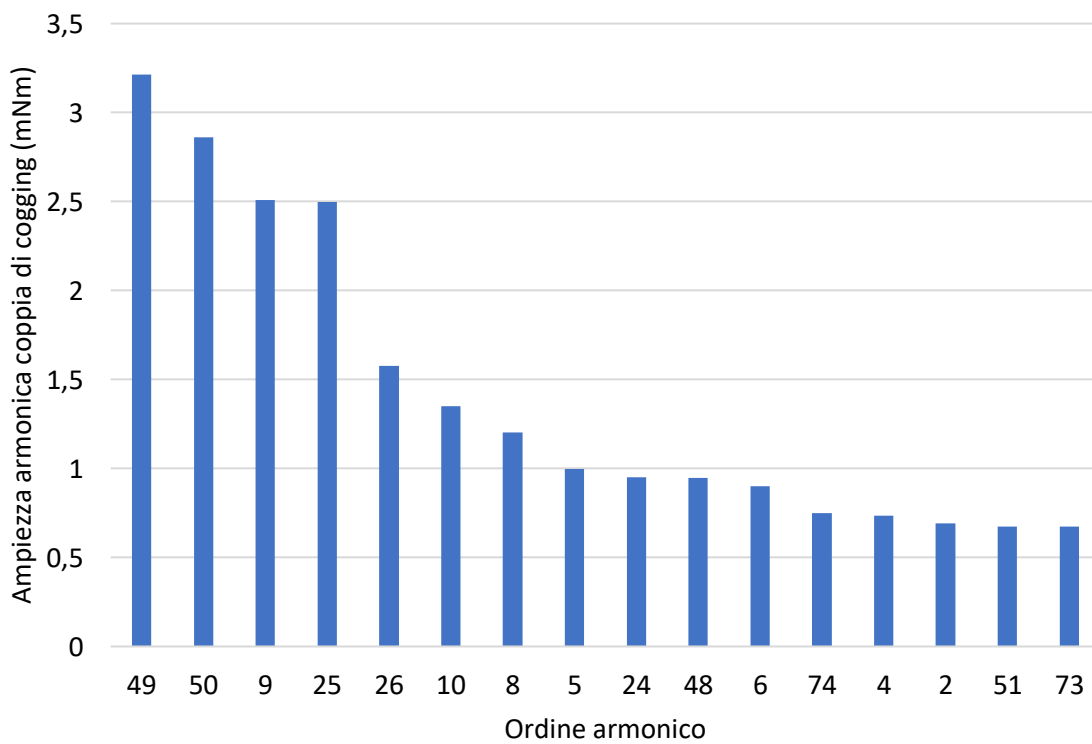


Fig.124 Analisi armonica coppia cogging

Lo spettro armonico della coppia di cogging evidenzia che l'ordine armonico principale non è il ventiquattresimo, che rappresenta il minimo comune multiplo tra il numero di denti di statore (12) e quello dei magneti di rotore (8), ma è il quarantanovesimo, a cui segue il cinquantesimo.

Le possibili cause di queste armoniche sono: presenza di cricche in un dente di statore, irregolarità costruttive, traferro non perfettamente costante.

Durante la fase di avvolgimento dello statore viene danneggiata la scarpa di un dente. Si decide di procedere ad una seconda prova di cogging con il motore danneggiato. Lo scopo è valutare le differenze con i risultati ottenuti con la prima prova, effettuata con lo statore integro e privo di avvolgimento.

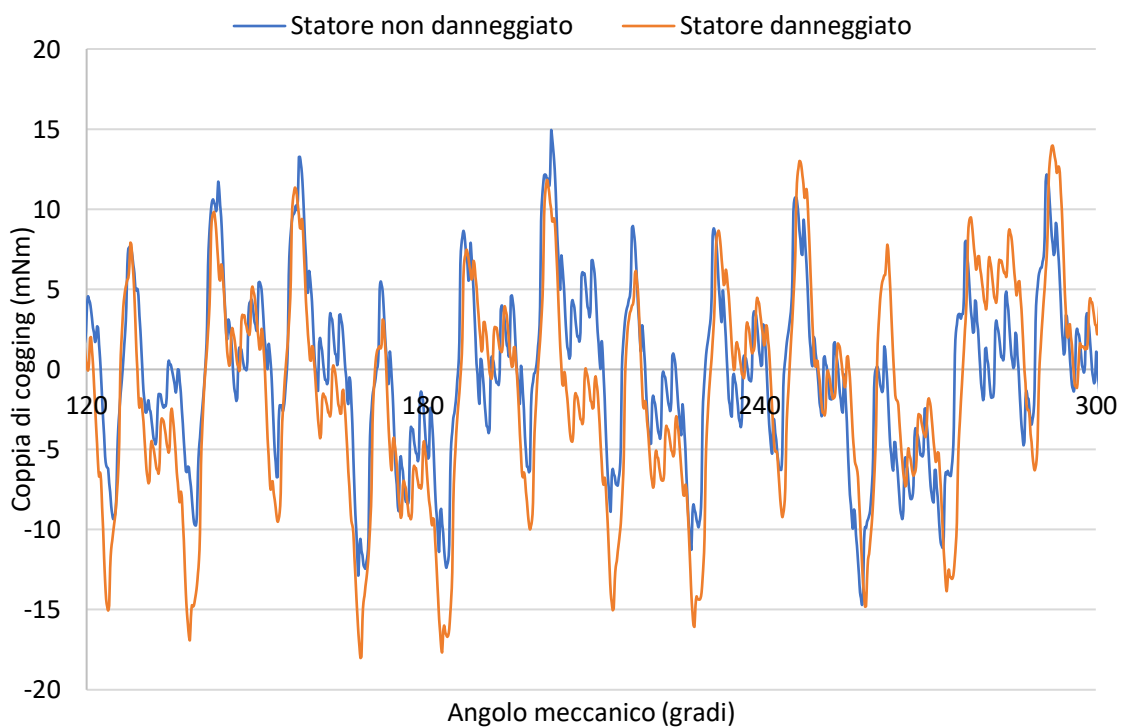


Fig.125 Dettaglio coppia di cogging prima e dopo il danno allo statore

La comparazione fra le due curve, blu per il motore integro e arancione per il motore danneggiato (Fig.125), evidenzia valori massimi arancioni più alti, corrispondenti a maggior ondulazione di coppia.

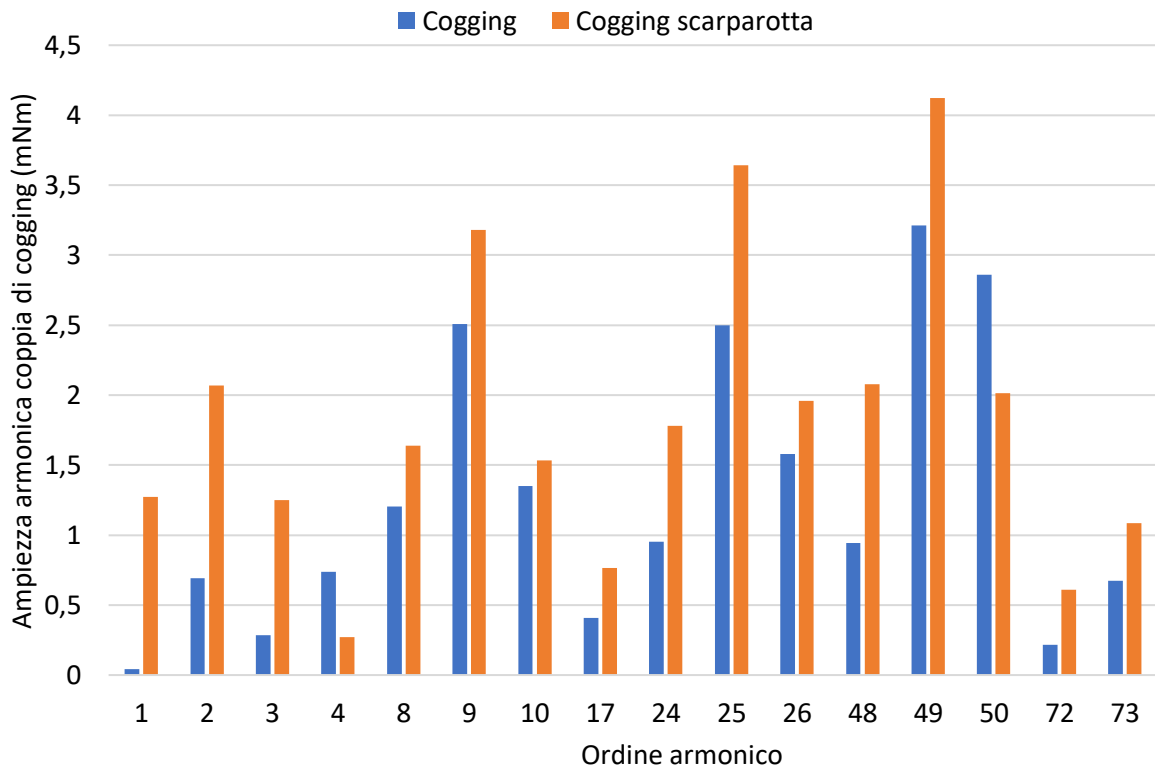


Fig.126 Comparazione analisi armonica della coppia di cogging prima e dopo il danno allo statore

L'analisi armonica della coppia di cogging evidenzia ampiezze delle armoniche generalmente più elevate nel motore con scarpa rotta (Fig.126). In particolare, le armoniche con ampiezza maggiore prima del danno, corrispondenti agli ordini 49, 9, 25, sono aumentate rispettivamente del 22,05%, 21,14%, 31,42%. L'armonica corrispondente all'ordine 50, invece, è diminuita del 42,15%.

## 9.2 Prova a vuoto

La prova a vuoto viene realizzata con un banco prova composto da:

- Motore primo in corrente continua
- Alimentatore DC
- Albero in più parti, collegate fra loro da giunti elicoidali elastici
- Torsiometro con valore fondo scala pari a 200 mNm
- Scheda di acquisizione dati

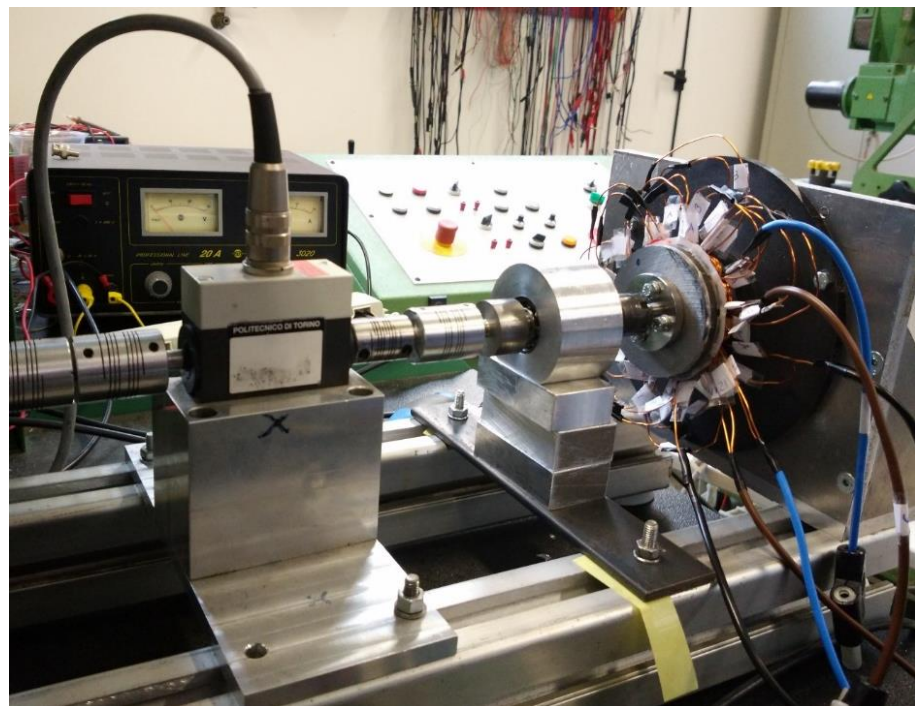


Fig.127 Banco prova a vuoto

Il prototipo è messo in rotazione a velocità comprese tra 250rpm e 4000rpm con il motore primo in corrente continua. Le grandezze misurate sono:

- Coppia e velocità di rotazione e conseguente potenza in ingresso
- Forma d'onda della tensione e valore efficace
- Forma d'onda del flusso e valore efficace

Le Fig.128 e Fig.129 mostrano rispettivamente l'andamento del flusso utile e quello della tensione di fase a vuoto ad una velocità di rotazione di 1000rpm e 4000rpm.

Il tratto lineare tra i due picchi del flusso, indice della contiguità dei magneti, influenza la forma d'onda della tensione, che diventa più trapezoidale anziché sinusoidale.

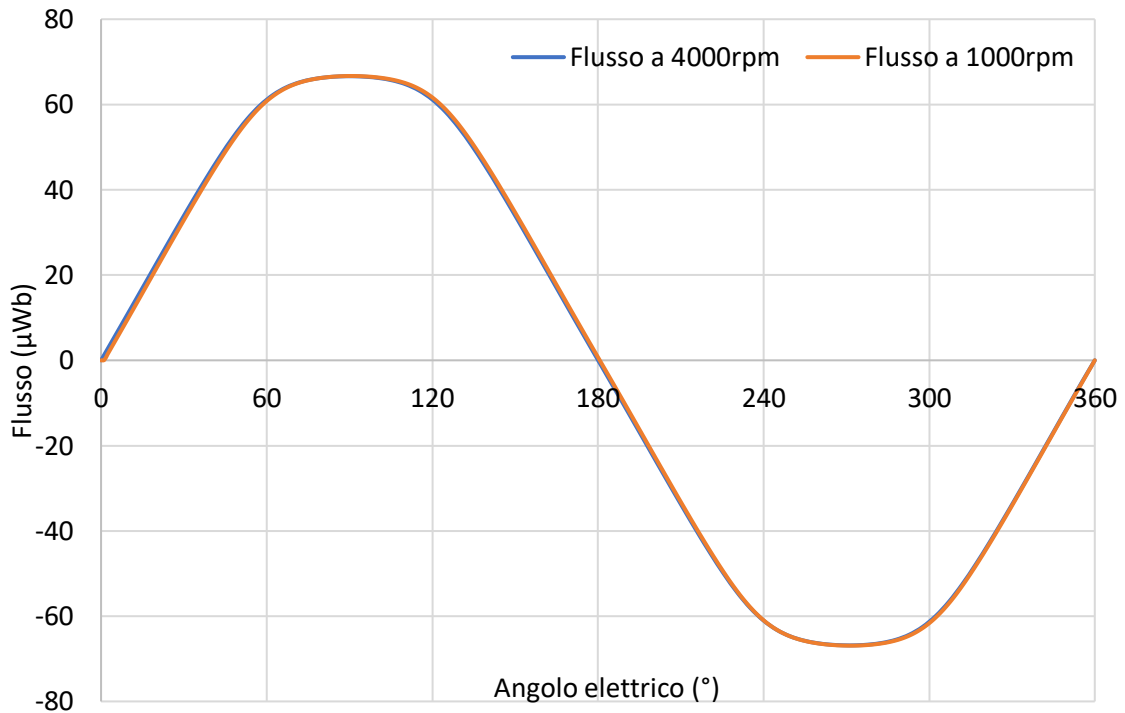


Fig.128 Flusso a 1000rpm e 4000rpm

Le forme d'onda di flusso alle due velocità sono sovrapposte, con valore di picco  $\phi_{picco} = 66,68 \mu Wb$  e il valore efficace  $\phi_{RMS} = 48,74 \mu Wb$ .

Alla velocità di 4000rpm il valore di picco della tensione di fase (Fig.129) è  $V_{picco} = 4,365 V$  e il valore efficace è  $V_{rms} = 3,282 V$ , mentre alla velocità di 1000rpm il valore di picco della tensione di fase è  $V_{picco} = 1,089 V$  e il valore efficace è  $V_{rms} = 0,812 V$ .

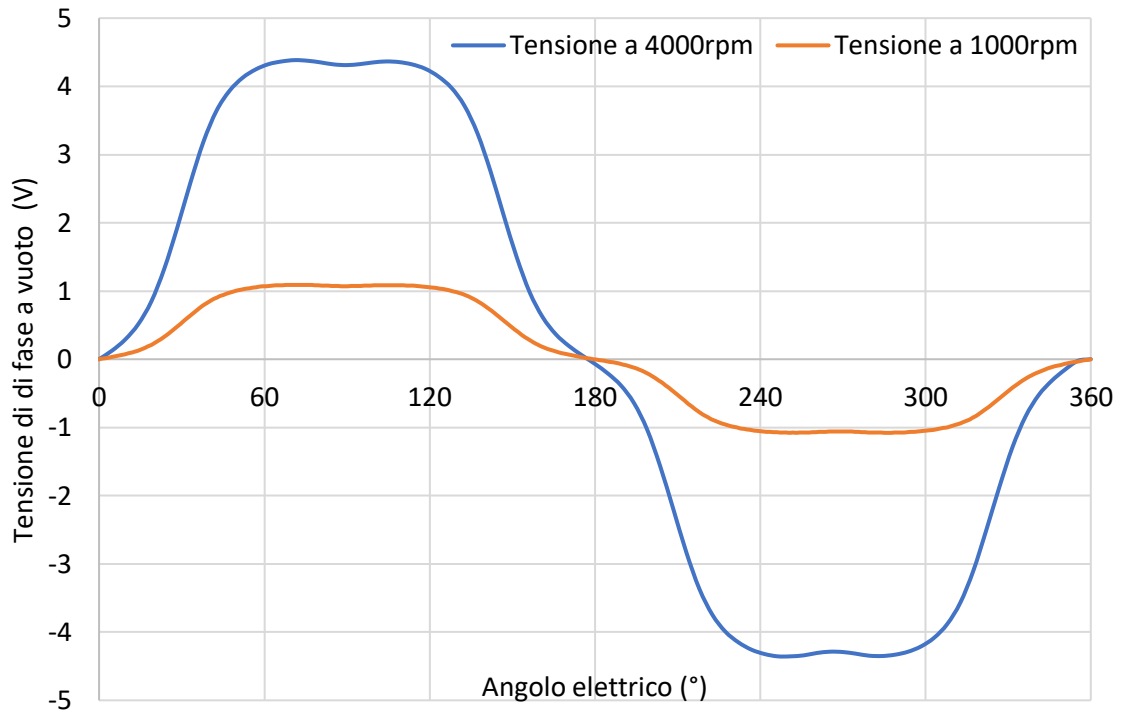


Fig.129 Tensione di fase a vuoto 1000rpm e 4000rpm

La forma d'onda della tensione a 4000rpm presenta una distorsione armonica di:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}}{V_1} = 14,55\%$$

Il contributo della 5° armonica alla distorsione armonica totale è di 5,24%.

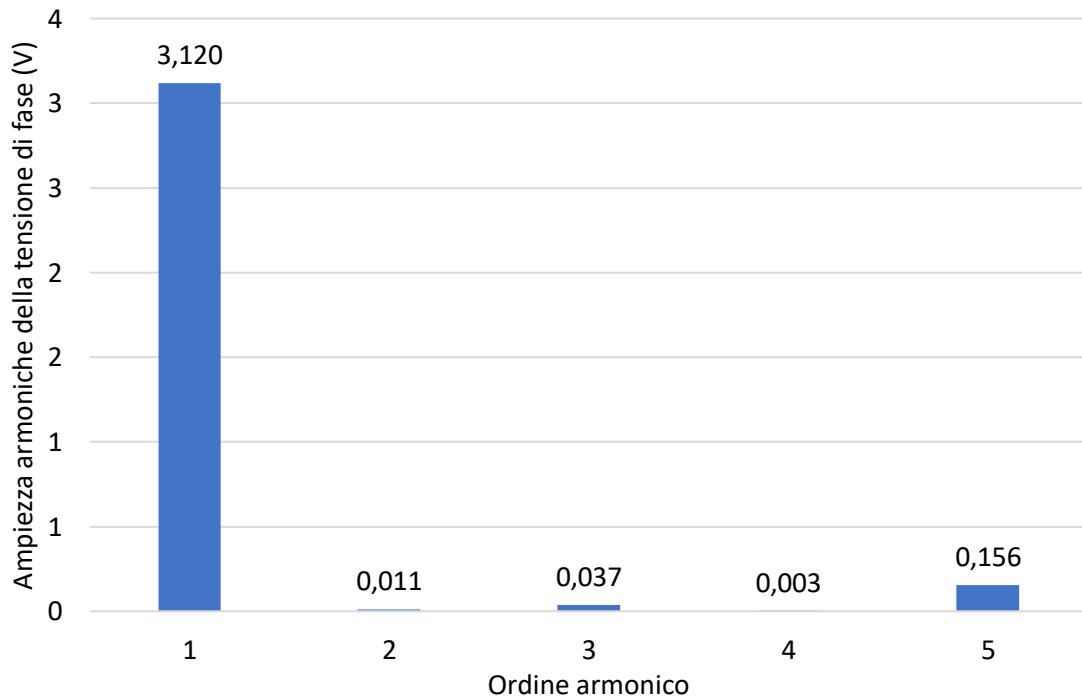


Fig.130 Contenuto armonico della tensione di fase a 4000rpm

Di seguito si confrontano i risultati ottenuti dal calcolo analitico con quelli delle misure.

Il grafico di Fig.131 mostra il confronto fra le tensioni di fase in funzione della velocità.

La costante di velocità  $K_e$  viene calcolata come rapporto tra tensione efficace di fase, misurata a vuoto, e velocità in giri al secondo.

$$K_{e\_misurato} = 0,0492 \text{ V/rps}$$

$$K_{e\_analitico} = 0,0539 \text{ V/rps}$$

La costante di velocità calcolata analiticamente è superiore del 7,43% rispetto a quella ottenuta dalla misura.

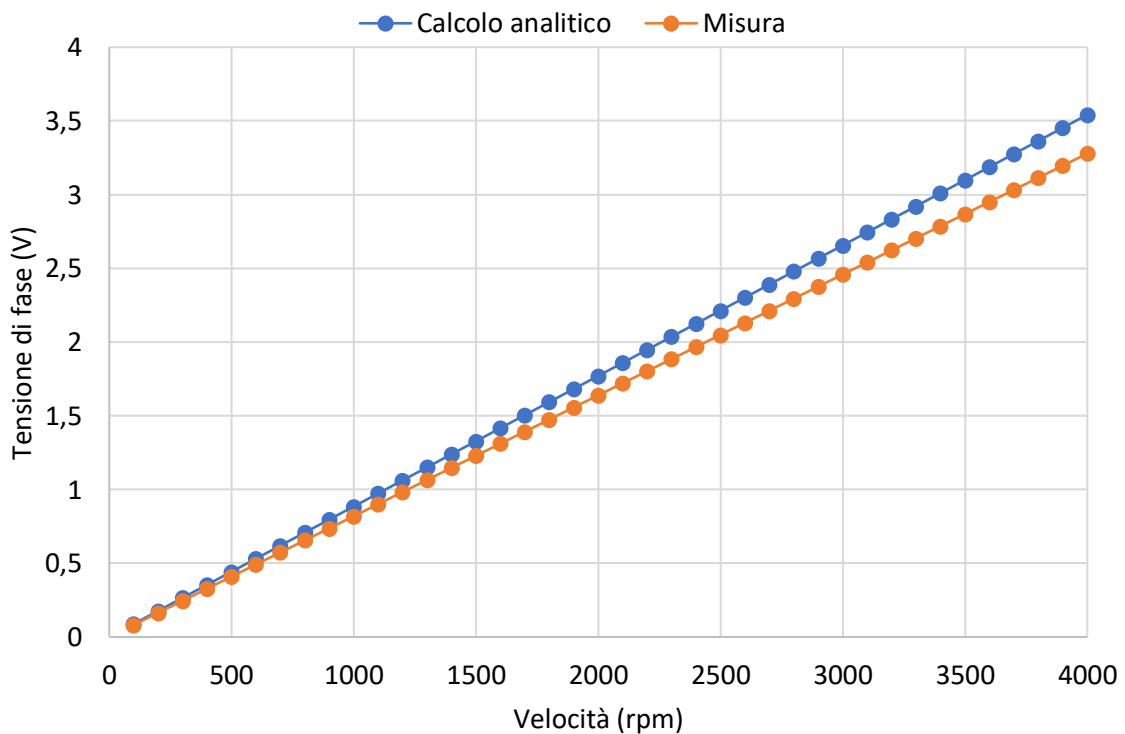


Fig.131 Tensione di fase calcolata analiticamente e misurata

La potenza misurata a vuoto dal torsionometro è esprimibile come una funzione polinomiale del secondo ordine e termine noto nullo. Nell'espressione il termine quadratico esprime la potenza persa per correnti parassite, il termine lineare dipende dalle perdite per isteresi e dagli attriti dei cuscinetti. Gli ultimi due contributi di perdita sono di complessa separazione. Le perdite per correnti parassite e per isteresi rappresentano le perdite nel ferro.

$$P_{vto} = P_{cp} + P_{ist} + P_{cuscinetti} = \alpha \cdot \omega^2 + (\beta_1 + \beta_2) \cdot \omega$$

Nella prova in questione l'espressione delle perdite a vuoto risulta:

$$P_{vto} = 0,000000206\omega^2 + 001738355\omega \text{ W}$$

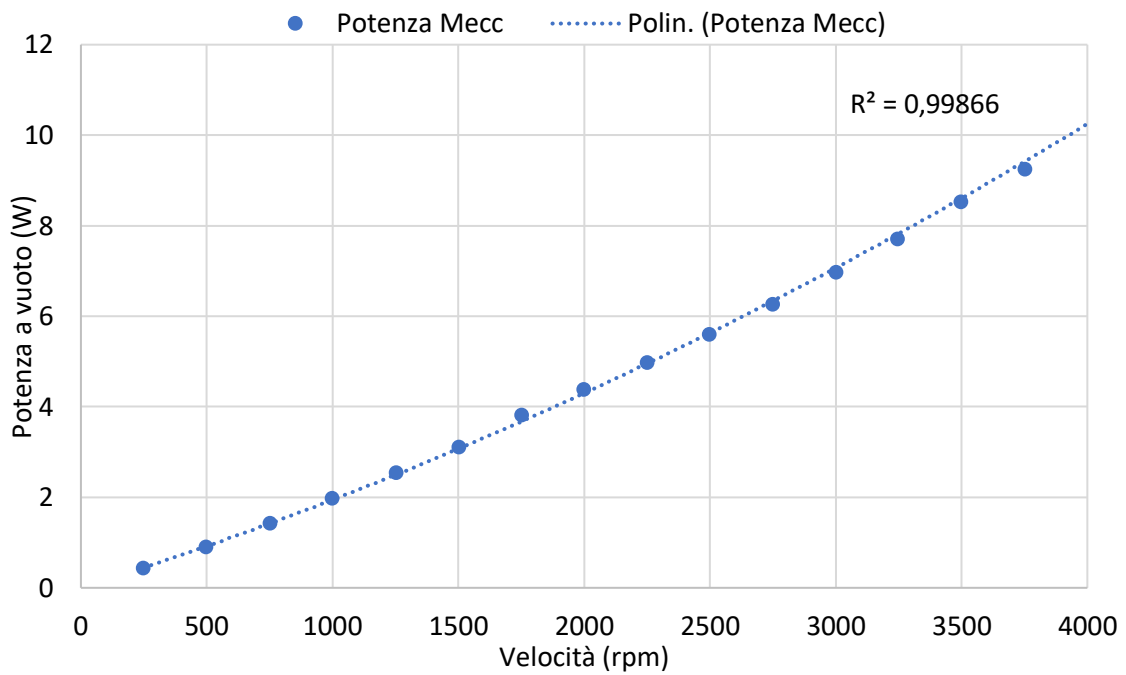


Fig.132 Potenza a vuoto

Le perdite per isteresi rappresentano il contributo maggiore, viceversa per le correnti parassite, che sono minimizzate dai layer isolanti ricoprenti i grani di ferro, tipici dei materiali SMC.

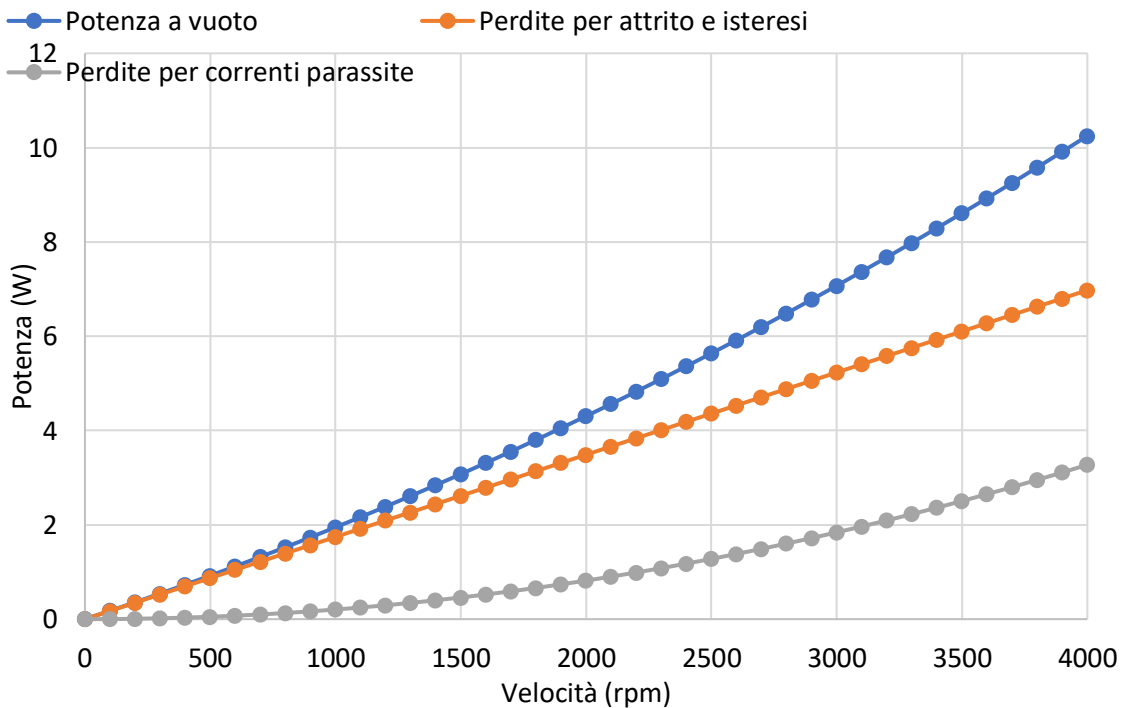


Fig.133 Contributi di perdita a vuoto



### 9.3 Prova a carico

La prova a carico viene realizzata con un banco prova composto da:

- Motore primo in corrente continua
- Alimentatore DC
- Albero in più parti, collegate fra loro da giunti elicoidali elastici
- Torsionmetro con valore fondo scala pari a 200 mNm
- Pinza amperometrica
- Carico composto da tre reostati connessi a stella, con resistenza  $0 \div 2 \Omega$  e corrente massima 16A
- Wattmetro con inserzione 3V3A
- Multimetro digitale
- Termocoppia
- Scheda di acquisizione dati

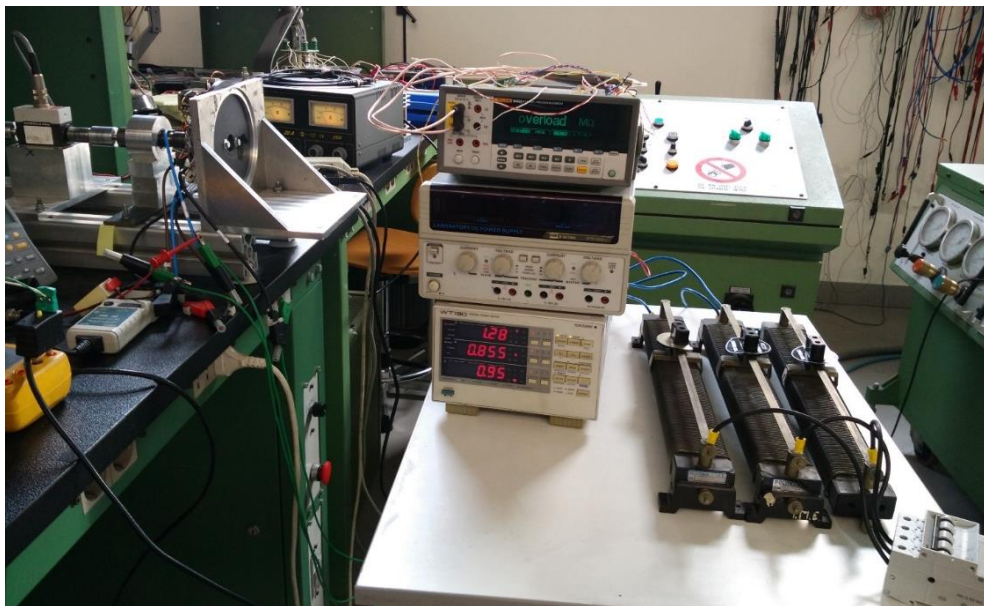


Fig.134 Ambiente di lavoro prova a carico

Il prototipo è messo in rotazione a velocità comprese tra 250rpm e 4000rpm dal motore primo in corrente continua. La prova a carico viene eseguita per cinque valori di resistenza di carico:  $0,1\Omega$  ,  $0,25\Omega$  ,  $0,5\Omega$  ,  $1\Omega$  ,  $2 \Omega$ .

Le grandezze misurate sono:

- Temperatura ambiente
- Temperatura avvolgimento prima e dopo la prova
- Resistenza dei cavi di collegamento motore-wattmetro
- Resistenza di fase prima e dopo la prova
- Valore efficace della tensione concatenata
- Valore efficace della corrente
- Coppia e velocità di rotazione e conseguente potenza in ingresso
- Potenza sul carico

Le prestazioni del prototipo sono valutate considerando il contributo di resistenza dei cavi di collegamento tra motore e wattmetro. La resistenza del singolo cavo è  $27,6 \text{ m}\Omega$  alla temperatura ambiente di  $19,8 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Le tabelle successive Tab.14, Tab.15, Tab.16, Tab.17, Tab.18, riportano, per ogni prova, la temperatura ambiente e di avvolgimento e la resistenza di fase, sia per la condizione iniziale che per quella finale.

Inizio prova con carico $0,1\Omega$		Fine prova con carico $0,1\Omega$	
Temperatura ambiente	$22 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura ambiente	$22,2 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura avvolgimento	$23 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura avvolgimento	$27,9 \text{ }^\circ\text{C}$
Resistenza di fase	$41,15 \text{ m}\Omega$	Resistenza di fase	$42,98 \text{ m}\Omega$

Tab.14 Temperature e resistenze prima e dopo la prova con carico  $0,1\Omega$

Inizio prova con carico $0,25\Omega$		Fine prova con carico $0,25\Omega$	
Temperatura ambiente	$21,1 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura ambiente	$22,2 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura avvolgimento	$22 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura avvolgimento	$31,3 \text{ }^\circ\text{C}$
Resistenza di fase	$40,91 \text{ m}\Omega$	Resistenza di fase	$42,4 \text{ m}\Omega$

Tab.15 Temperature e resistenze prima e dopo la prova con carico  $0,25\Omega$

Inizio prova con carico $0,5\Omega$		Fine prova con carico $0,5\Omega$	
Temperatura ambiente	$19,9 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura ambiente	$21,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura avvolgimento	$20,8 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura avvolgimento	$27 \text{ }^\circ\text{C}$
Resistenza di fase	$40,75 \text{ m}\Omega$	Resistenza di fase	$41,9 \text{ m}\Omega$

Tab.16 Temperature e resistenze prima e dopo la prova con carico  $0,5\Omega$

Inizio prova con carico 1Ω		Fine prova con carico 1Ω	
Temperatura ambiente	21,6 °C	Temperatura ambiente	21,7 °C
Temperatura avvolgimento	22,2 °C	Temperatura avvolgimento	29,8 °C
Resistenza di fase	40,9 mΩ	Resistenza di fase	42,1 mΩ

Tab.17 Temperature e resistenze prima e dopo la prova con carico 1Ω

Inizio prova con carico 2Ω		Fine prova con carico 2Ω	
Temperatura ambiente	21,5 °C	Temperatura ambiente	21,7 °C
Temperatura avvolgimento	21,8 °C	Temperatura avvolgimento	30,3 °C
Resistenza di fase	40,95 mΩ	Resistenza di fase	42,3 mΩ

Tab.18 Temperature e resistenze prima e dopo la prova con carico 2Ω

I grafici successivi di Fig.135, Fig.136, Fig.137 mostrano, in funzione della velocità, rispettivamente: tensione concatenata in uscita, corrente in uscita, coppia in ingresso.

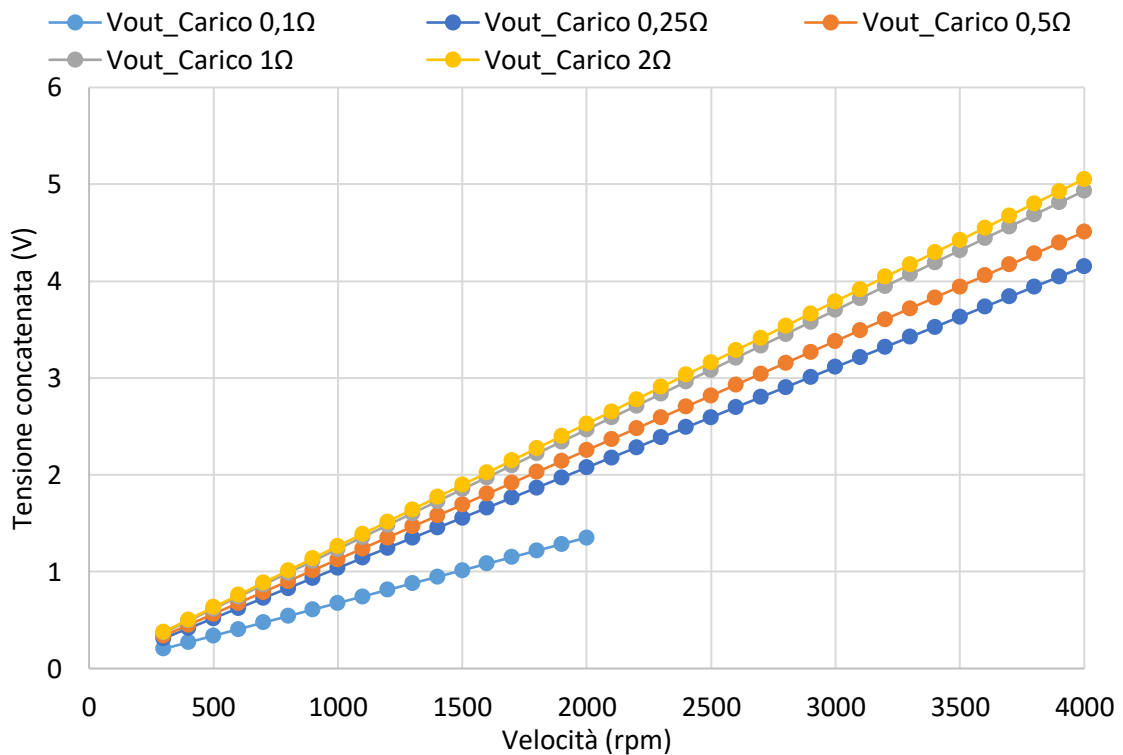


Fig.135 Tensioni concatenate misurate in uscita a diversi carichi

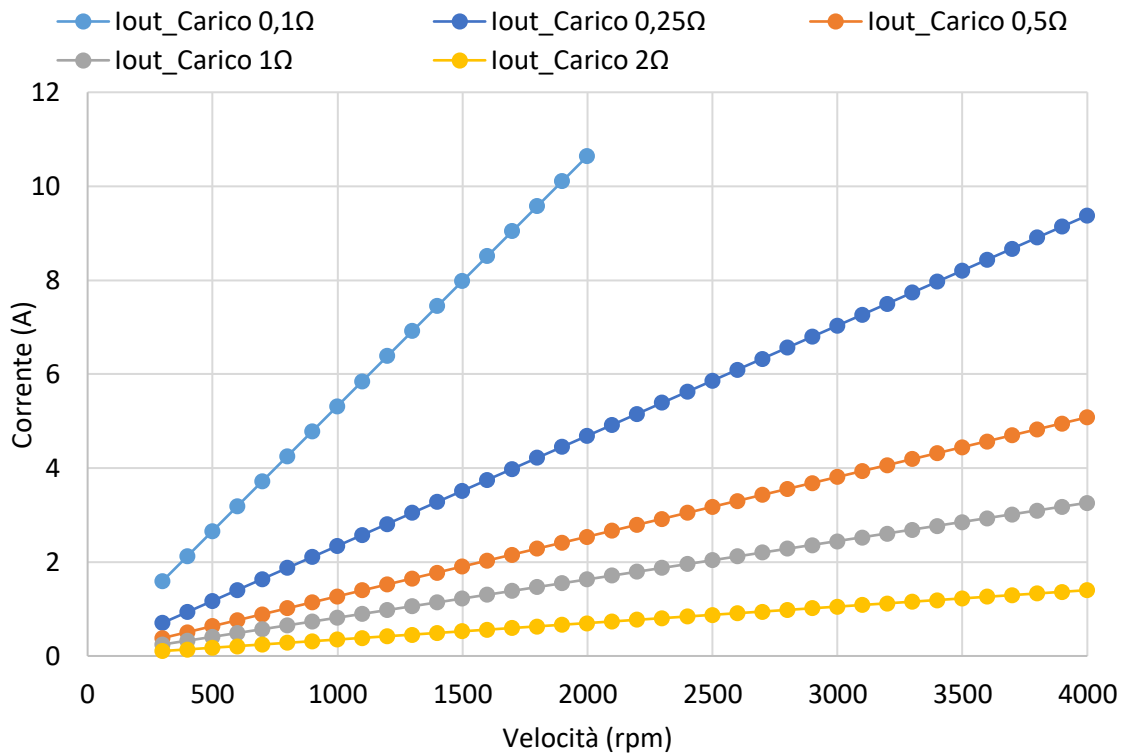


Fig.136 Correnti misurate in uscita a diversi carichi

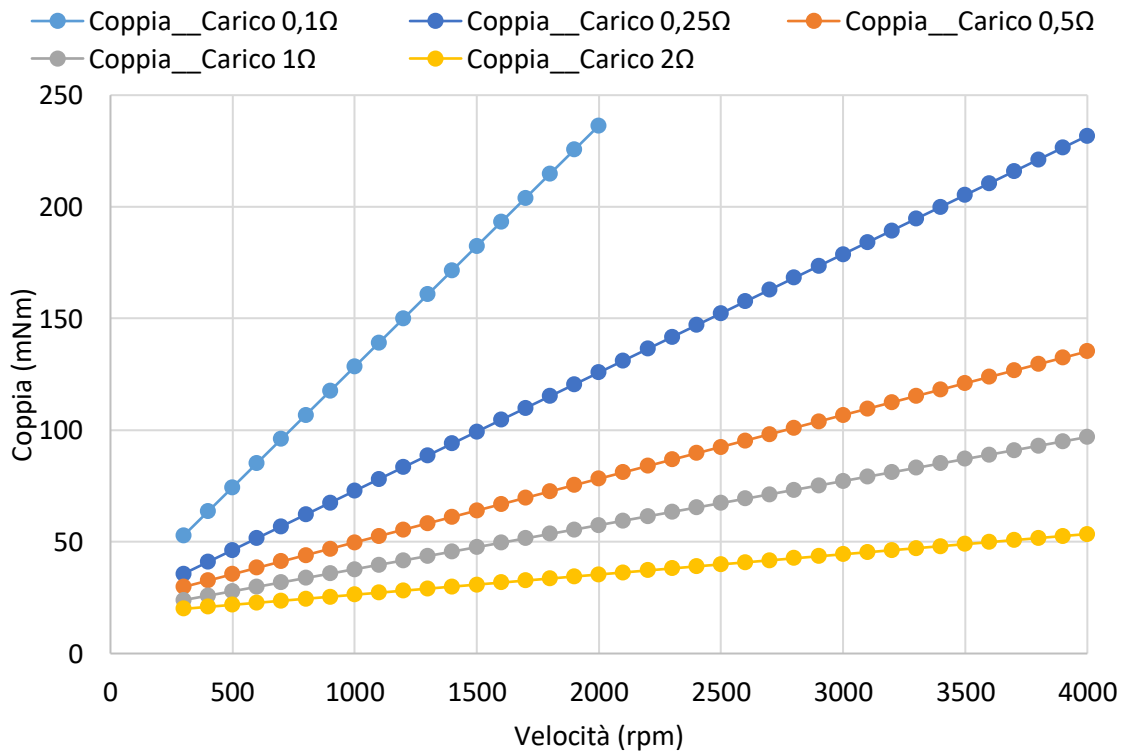
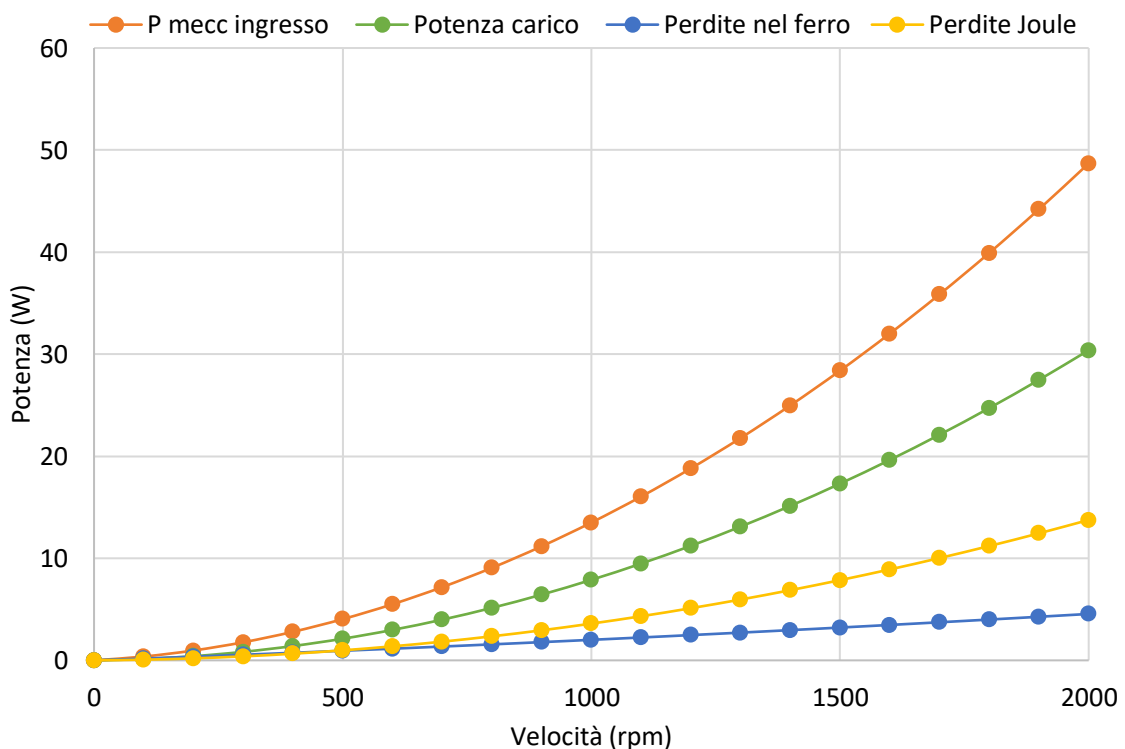


Fig.137 Coppie meccaniche misurate in ingresso a diversi carichi

Tutte le prove prevedono il raggiungimento della velocità di 4000rpm, tranne quella con carico  $0,1\Omega$ , per la quale la velocità massima raggiunta è 2000rpm. Una prima limitazione è dovuta al motore primo in corrente continua che può assorbire al massimo 10A. Una seconda limitazione è rappresentata dal torsionometro con fondoscala 200mNm che, pur sopportando il sovraccarico del 100% senza danni, può registrare una misura in un campo estendibile del 20% rispetto al fondoscala.

I grafici successivi di Fig.138, Fig.139, Fig.140, Fig.141, Fig.142, mostrano le potenze in funzione della velocità, rispettivamente per i carichi  $0,1\Omega$ ,  $0,25\Omega$ ,  $0,5\Omega$ ,  $1\Omega$ ,  $2\Omega$ , che, a loro volta, corrispondono rispettivamente alle seguenti potenze:

- potenza meccanica in ingresso (P mecc)
- potenza di carico
- potenza persa per perdite nel ferro
- potenza persa per effetto Joule

Fig.138 Potenze per carico  $0,1\Omega$

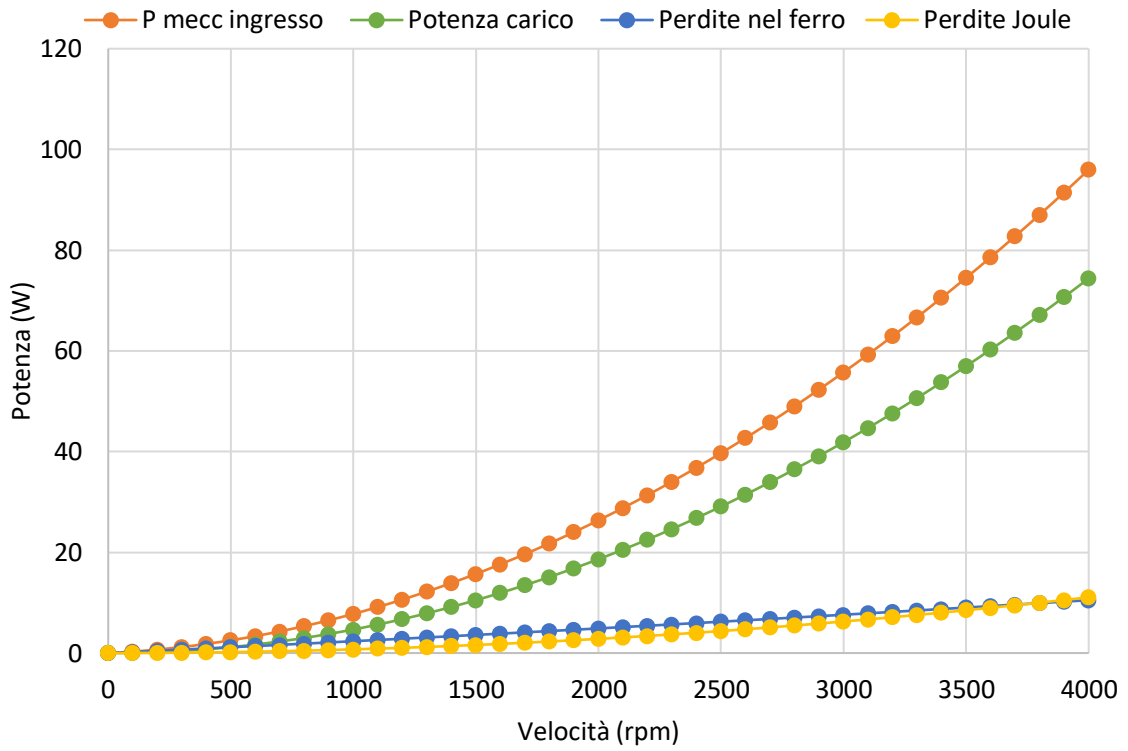


Fig.139 Potenze per carico 0,25Ω

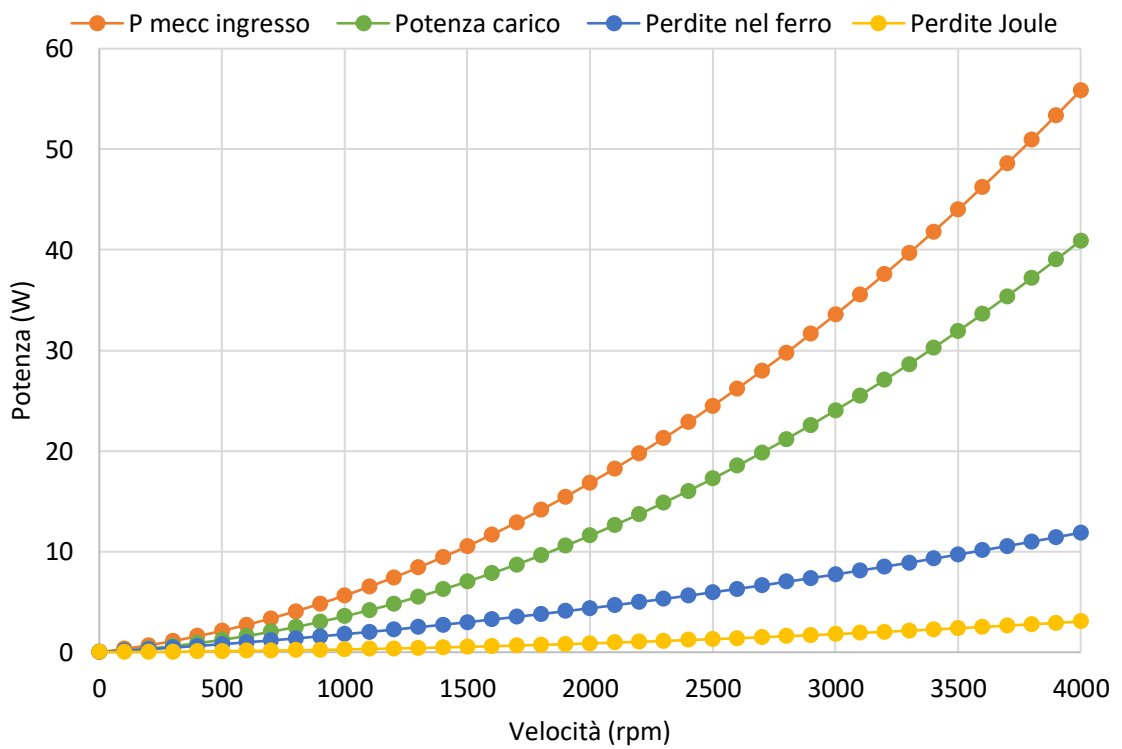


Fig.140 Potenze per carico 0,5Ω

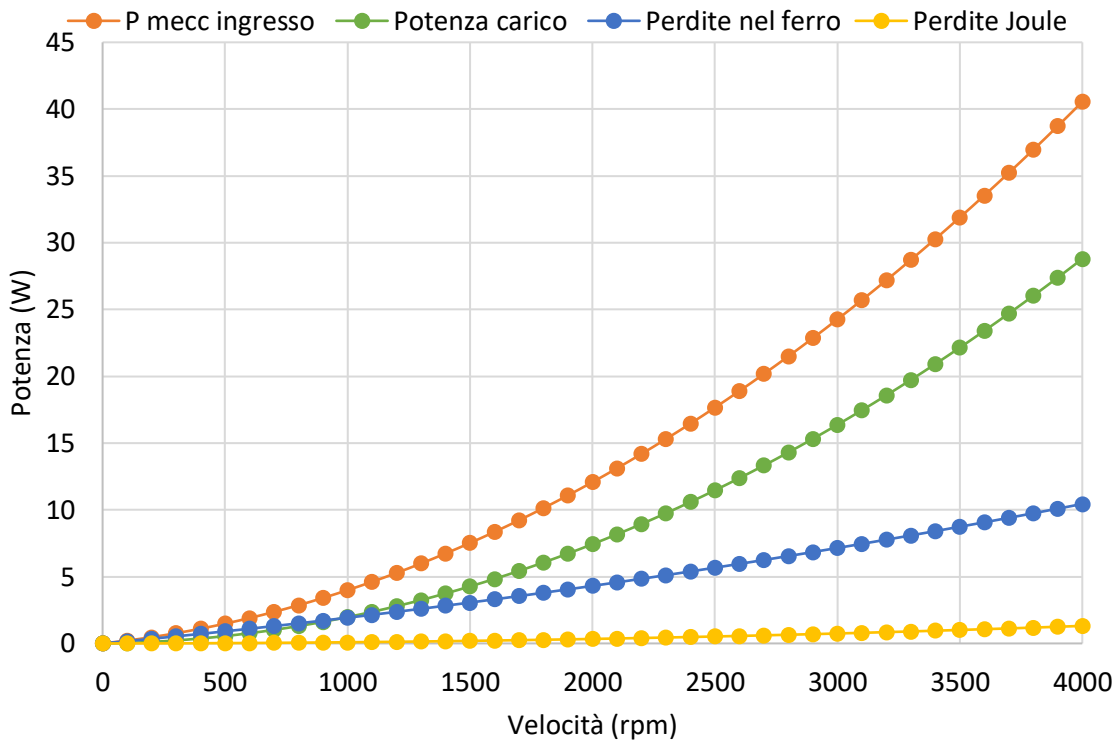


Fig.141 Potenze per carico 1Ω

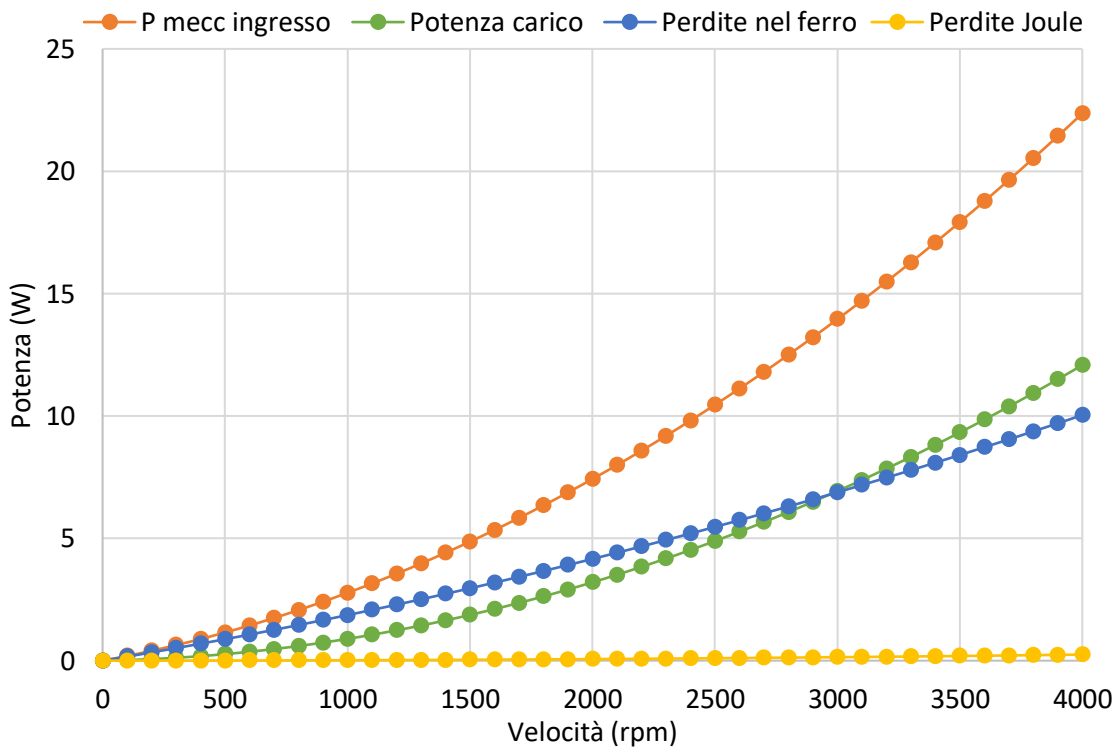


Fig.142 Potenze per carico 2Ω

Il grafico di Fig.143 mostra l'andamento del rendimento del prototipo nel funzionamento da generatore, per i diversi carichi, in funzione della velocità.

Il rendimento massimo di 77,5% si ottiene per un carico resistivo di 0,25Ω alla velocità di 4000rpm.

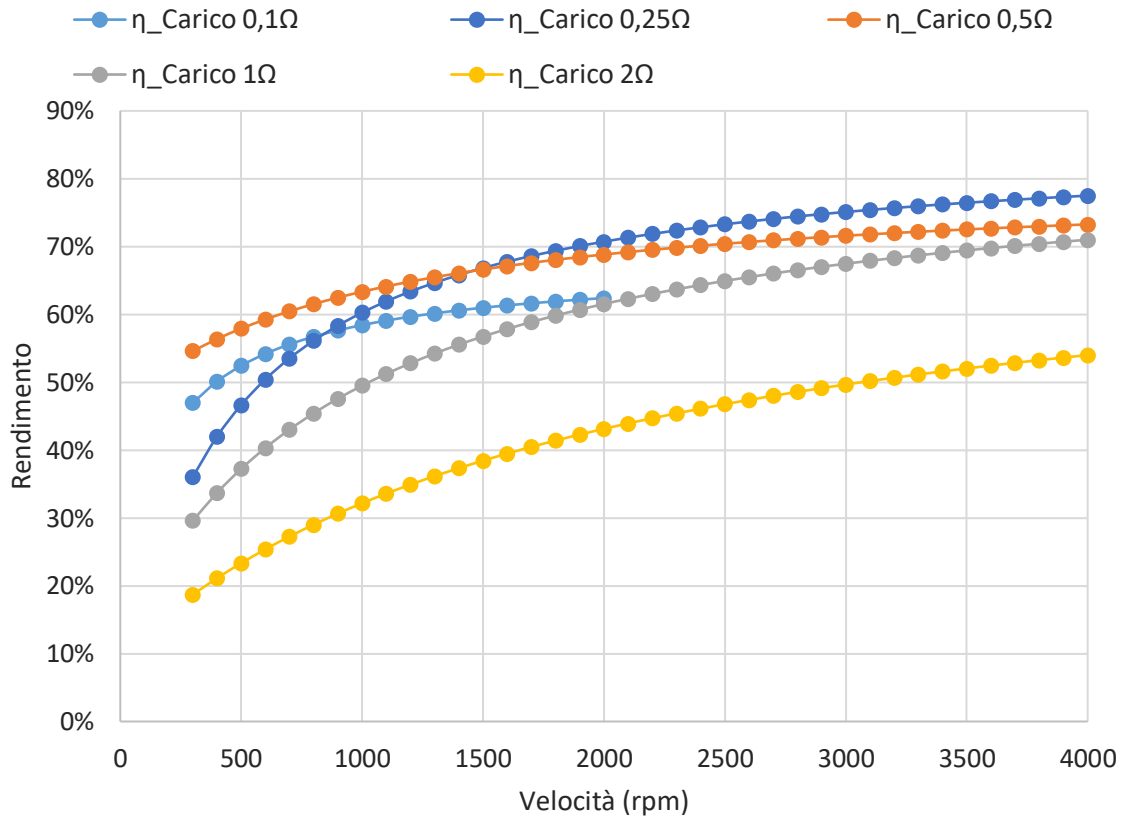


Fig.143 Rendimenti per diversi carichi



Il grafico di Fig.144 mostra, alla velocità di 4000rpm, le potenze in funzione dei carichi resistivi 0,25 $\Omega$ , 0,5 $\Omega$ , 1 $\Omega$ , 2 $\Omega$ , a cui corrispondono, rispettivamente, le correnti di carico 9,38A, 5,05A, 3,26A, 1,4A.

Le perdite nel ferro, che alla velocità di 4000rpm sono 10,25W, incidono in modo sostanziale sul rendimento ai carichi più elevati.

Le perdite Joule sono comparabili alle perdite nel ferro per carico 0,25 $\Omega$  e diminuiscono all'aumentare del carico resistivo, fino a diventare minori di 1W per carico 2 $\Omega$ .

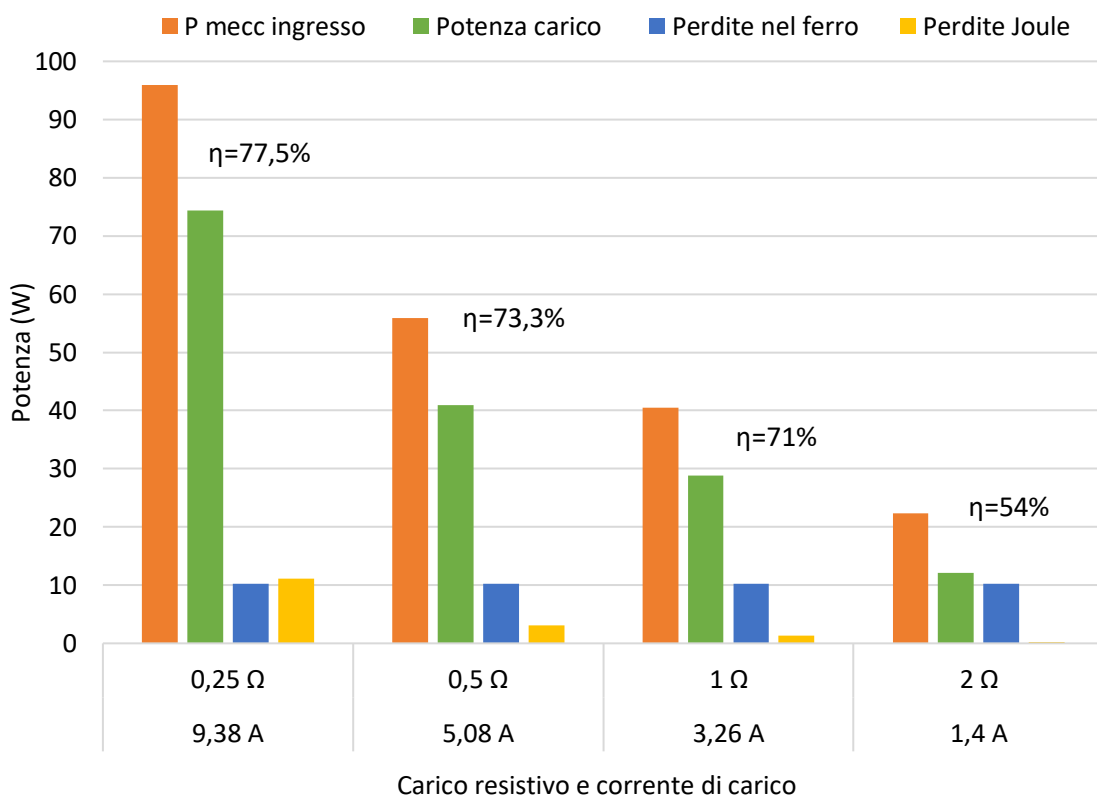


Fig.144 Potenze alla velocità 4000rpm

## 9.4 Misura della coppia in DC

La misura della coppia in DC viene realizzata con un banco prova composto da:

- Motore passo-passo
- Albero in più parti, collegate fra loro da giunti elicoidali elastici
- Torsiometro
- Alimentatore DC
- Scheda di acquisizione dati

La misura della coppia in DC consiste nell'alimentare il motore in corrente continua, simulando uno dei sei stati di funzionamento dell'inverter trifase per ottenere la caratteristica coppia-corrente. Due fasi del motore, collegate in parallelo, sono percorse dalla corrente  $-I_{DC}/2$ . La terza fase, collegata in serie al parallelo delle due precedenti, è percorsa dalla corrente  $I_{DC}$  (Fig.145).

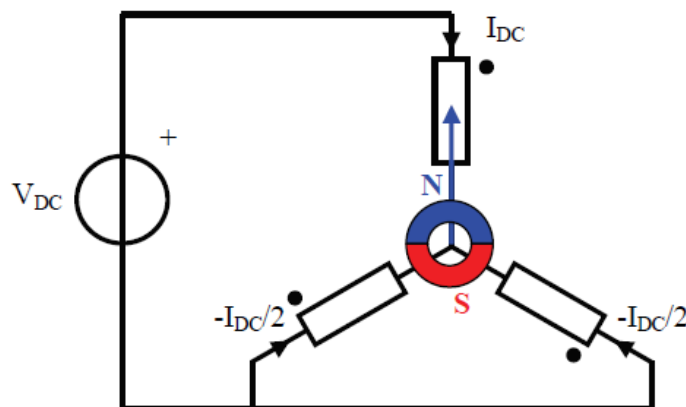


Fig.145 Schema di collegamento fasi del motore

Con l'alimentatore DC vengono impostati valori di corrente continua  $I_{DC}$  compresi fra 2A e 12A. Operando con un passo di 0,5A vengono eseguite più misure. Il grafico di Fig.146 riporta l'andamento di coppia misurata a 10A sull'angolo giro.

Il motore passo-passo determina la rotazione del rotore secondo lo spostamento angolare di  $0,18^\circ$  meccanici ogni 250ms. Il tempo di attesa è necessario per evitare l'influenza delle oscillazioni dovute all'inerzia del rotore. Il torsiometro misura la coppia generata per ogni spostamento del rotore.

Il valore massimo della coppia corrisponde alla condizione per la quale il vettore flusso dei magneti e il vettore corrente sono in quadratura. Noti il massimo positivo e negativo di coppia, viene eliminato l'offset di misura e si correlano con la corrente continua imposta.

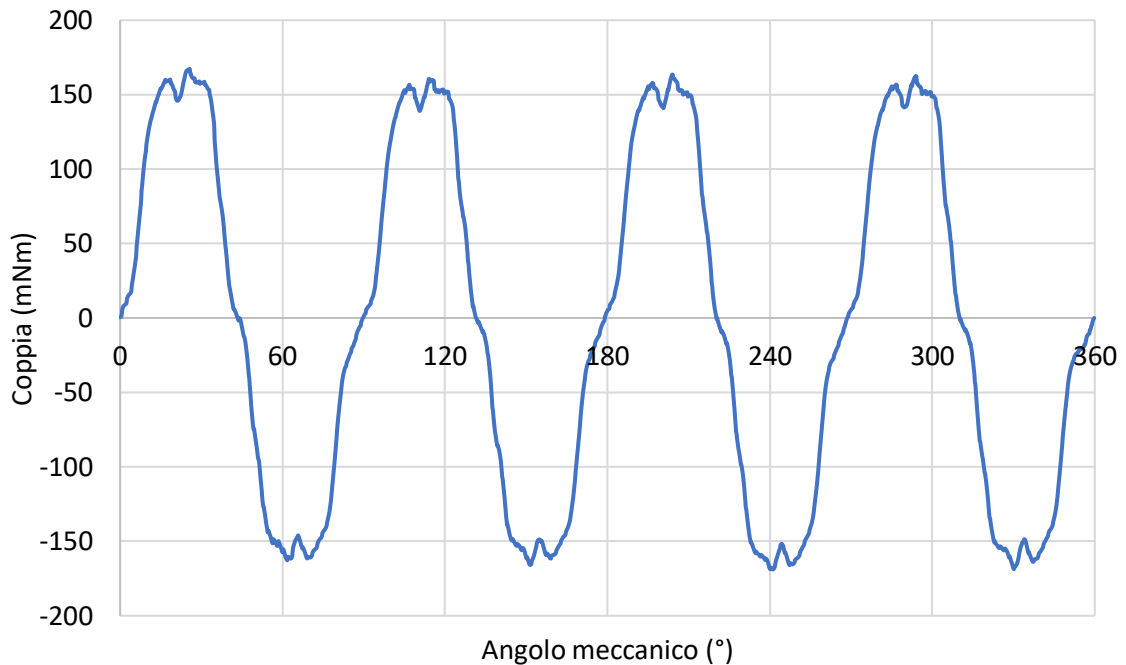


Fig.146 Coppia misurata per corrente continua di 10A

Il grafico di Fig.147 mostra la caratteristica coppia-corrente la cui pendenza rappresenta la costante di coppia  $K_t$  cioè il rapporto tra coppia e corrente.

$$K_{t\_misura\_DC} = 0,0175 \text{ Nm/A}$$

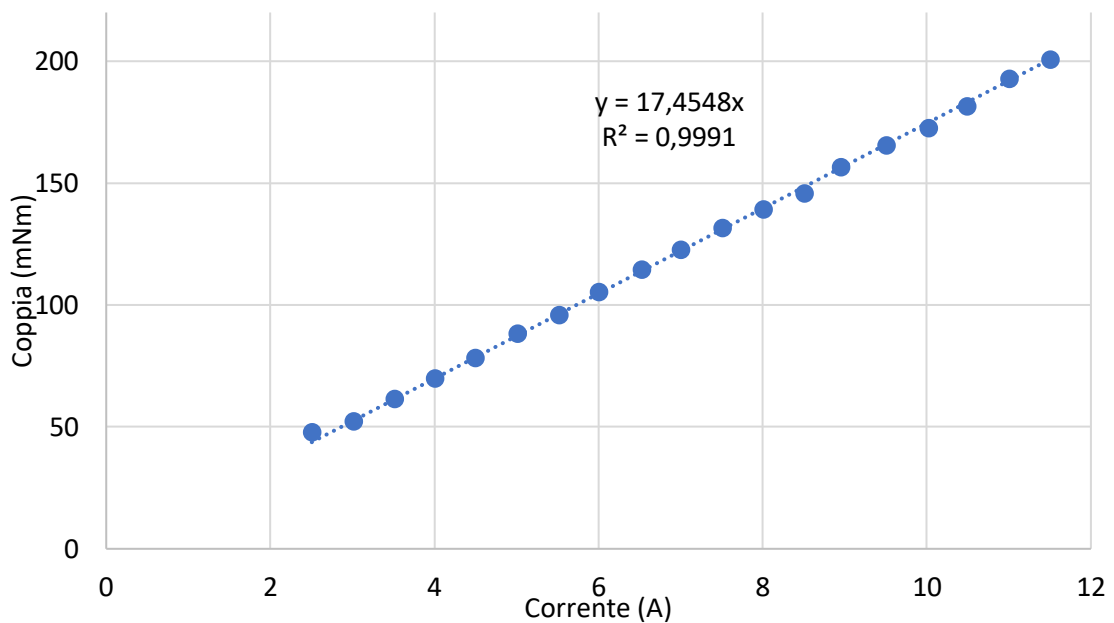


Fig.147 Caratteristica coppia-corrente misurata nella prova in DC

## 9.5 Prova motore

La prova motore viene realizzata con un banco prova composto da:

- Motore asincrono alimentato in corrente continua con funzione di freno meccanico
- Albero in più parti, collegate fra loro da giunti elicoidali elastici
- Torsiometro con valore fondo scala pari a 200 mNm
- Termocoppia
- Wattmetro con inserzione 3V3A
- Scheda di acquisizione dati
- Due alimentatori in corrente continua, uno per alimentare il DC-link dell'inverter, l'altro per alimentare il motore asincrono con funzione di freno meccanico
- Inverter

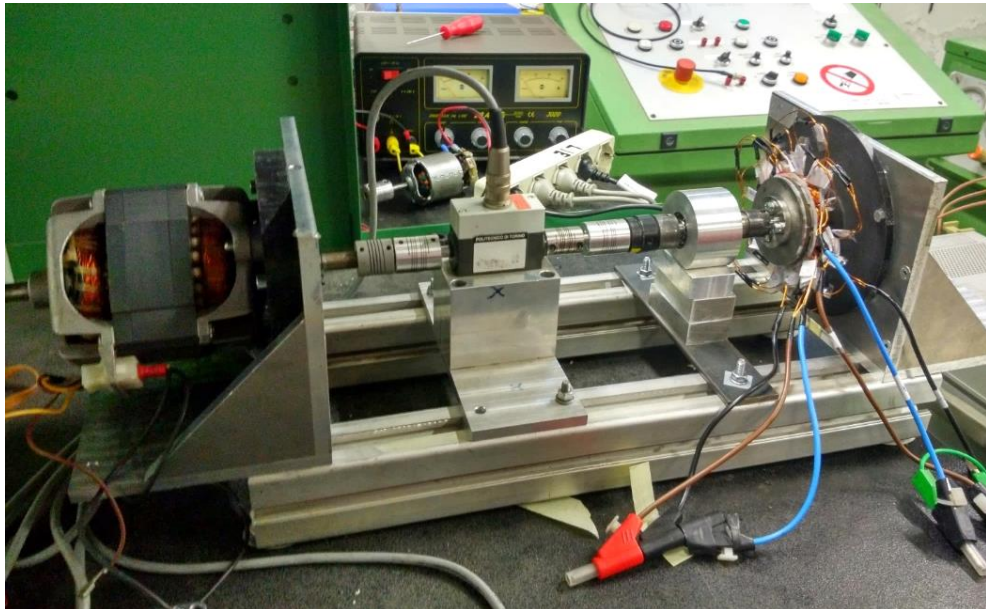


Fig.148 Banco prova motore

L'inverter a 12V utilizzato nella prova motore è strutturato per alimentare una ventola. In questa tipologia di applicazione è sufficiente portare il motore ad una velocità simile a quella impostata tramite comando sotto forma di duty cycle da 20% a 100%. L'inverter fornisce tensione e corrente al motore in base al carico.

Il prototipo è messo in rotazione con velocità comprese tra 1000rpm e 4000rpm e coppie di carico comprese tra 25mNm e 200mNm.

In realtà la velocità minima di 1000rpm non è costante per tutti i valori di coppia di carico perché non è possibile scendere sotto il comando del 20%.

Il controllo non comprende un anello di velocità, per cui cambiando il carico cambia anche la velocità di rotazione del motore.

La coppia di carico è variata modificando la tensione continua fornita al motore asincrono, che ha la funzione di freno meccanico. L'azione frenante comporta la dissipazione per effetto Joule, negli avvolgimenti di rotore, dell'energia cinetica del sistema.

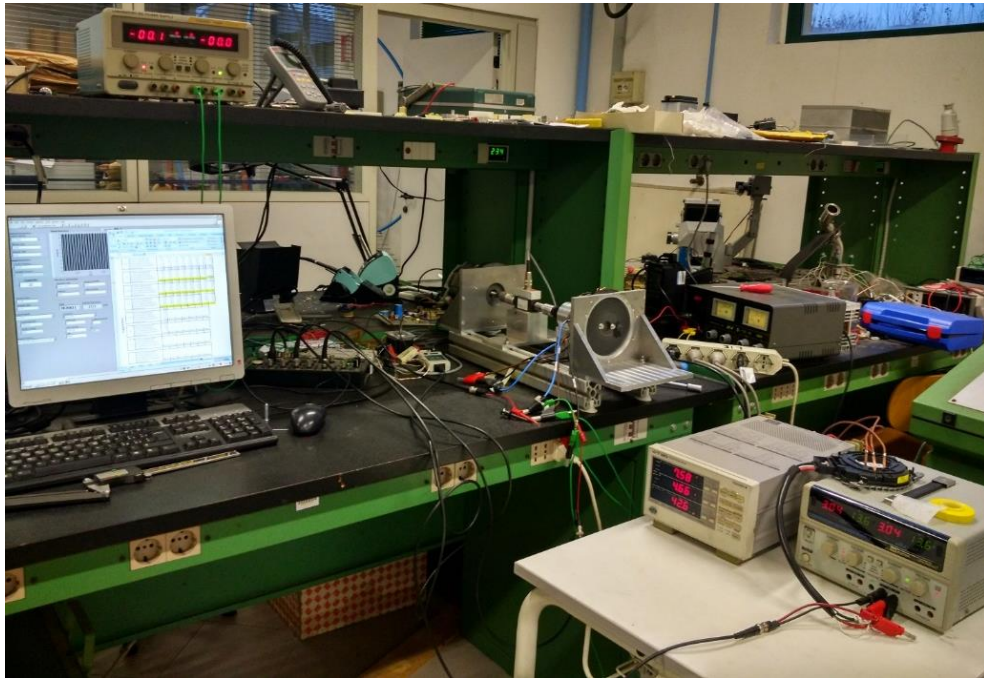


Fig.149 Ambiente di lavoro prova motore

Le grandezze misurate sono:

- Coppia e velocità di rotazione e conseguente potenza meccanica
- Valore efficace della tensione concatenata
- Valore efficace della corrente
- Potenza elettrica in ingresso al motore

Le prestazioni del prototipo sono valutate considerando il contributo di resistenza dei cavi di collegamento tra motore e wattmetro. La resistenza del singolo cavo è  $27,6 \text{ m}\Omega$  alla temperatura ambiente di  $19,8 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Di seguito si confrontano i risultati ottenuti dal calcolo analitico con quelli delle misure.

Il grafico di Fig.150 mostra il confronto fra le caratteristiche coppia-corrente; la costante di coppia  $K_t$  viene calcolata come rapporto tra coppia e corrente.

$$K_{t\_analitico} = 18,63 \text{ mNm/A}$$

$$K_{t\_misura\_DC} = 17,5 \text{ mNm/A}$$

$$K_{t\_misura\_carico} = 17,61 \text{ mNm/A}$$

La costante di coppia calcolata analiticamente si discosta del 5,49% rispetto a quella ottenuta dalla prova motore, mentre lo scostamento tra misura in DC e la prova motore è del 0,65%.

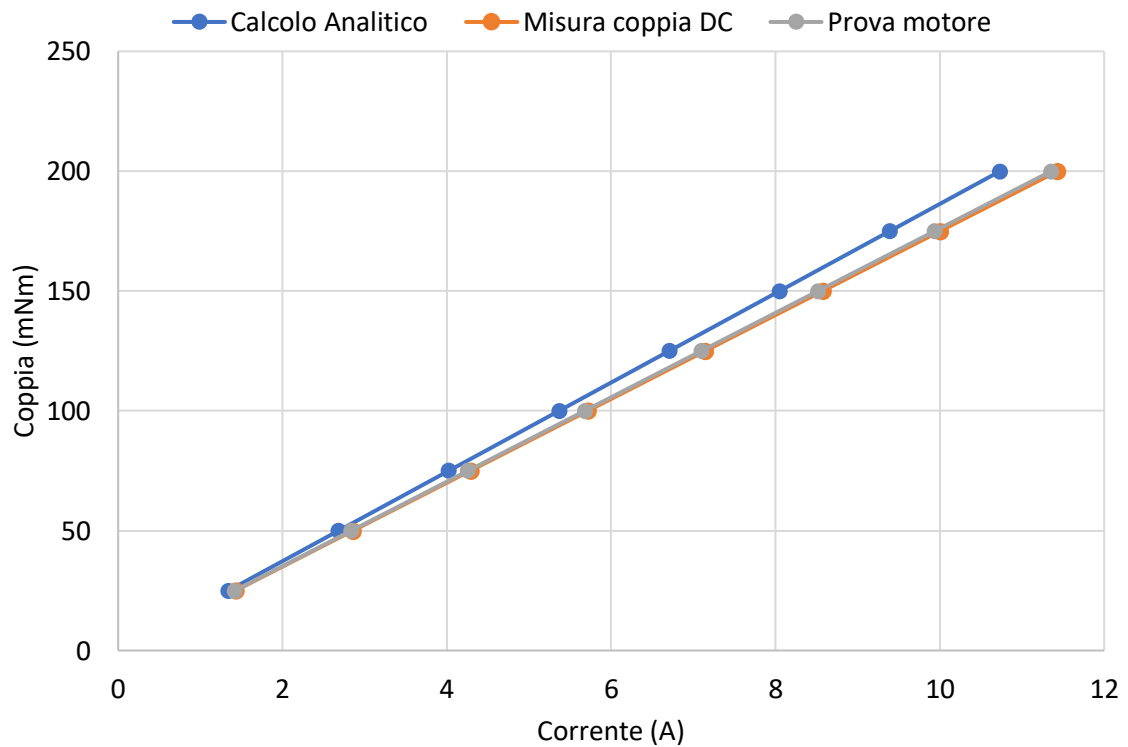


Fig.150 Confronto caratteristiche coppia-corrente

I grafici successivi di Fig.151, Fig.152, Fig.153 mostrano, in funzione della velocità, rispettivamente: tensione concatenata, potenza elettrica entrante, potenza meccanica uscente.

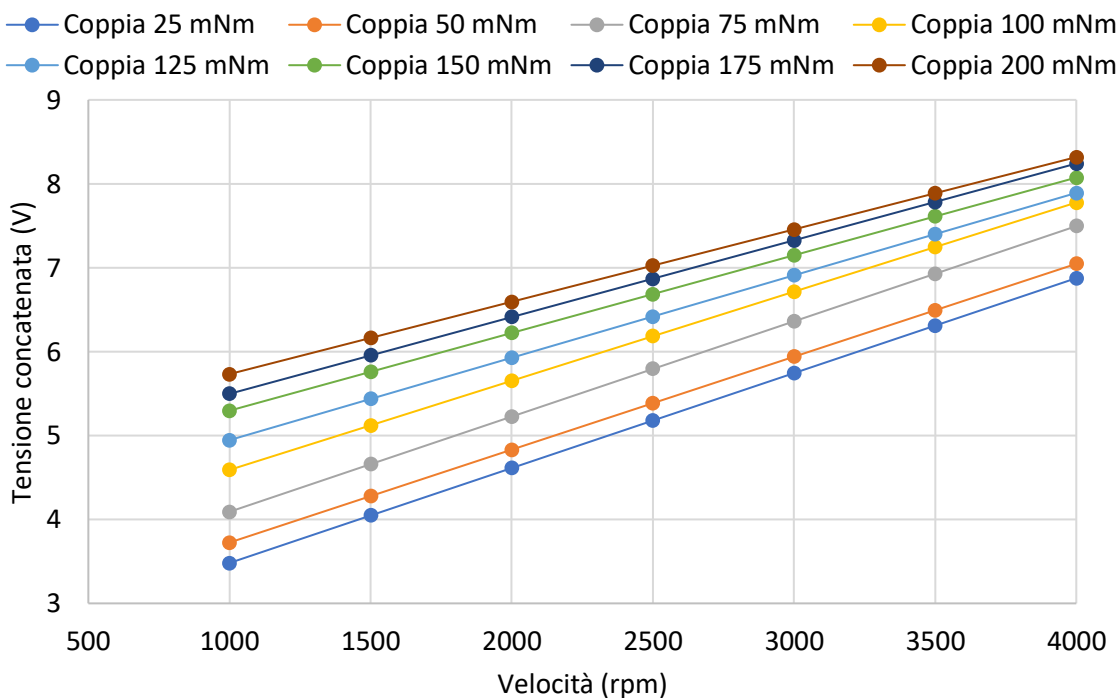


Fig.151 Tensioni concatenate misurate per diverse coppie di carico

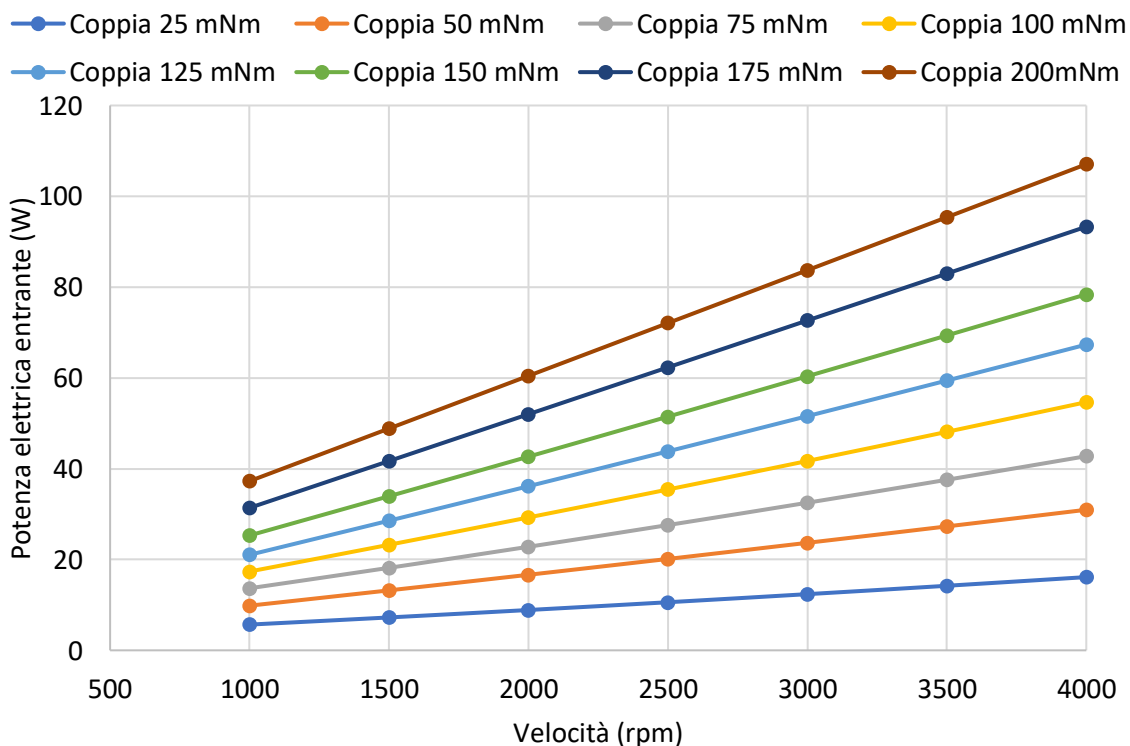


Fig.152 Potenza elettrica in ingresso per diverse coppie di carico

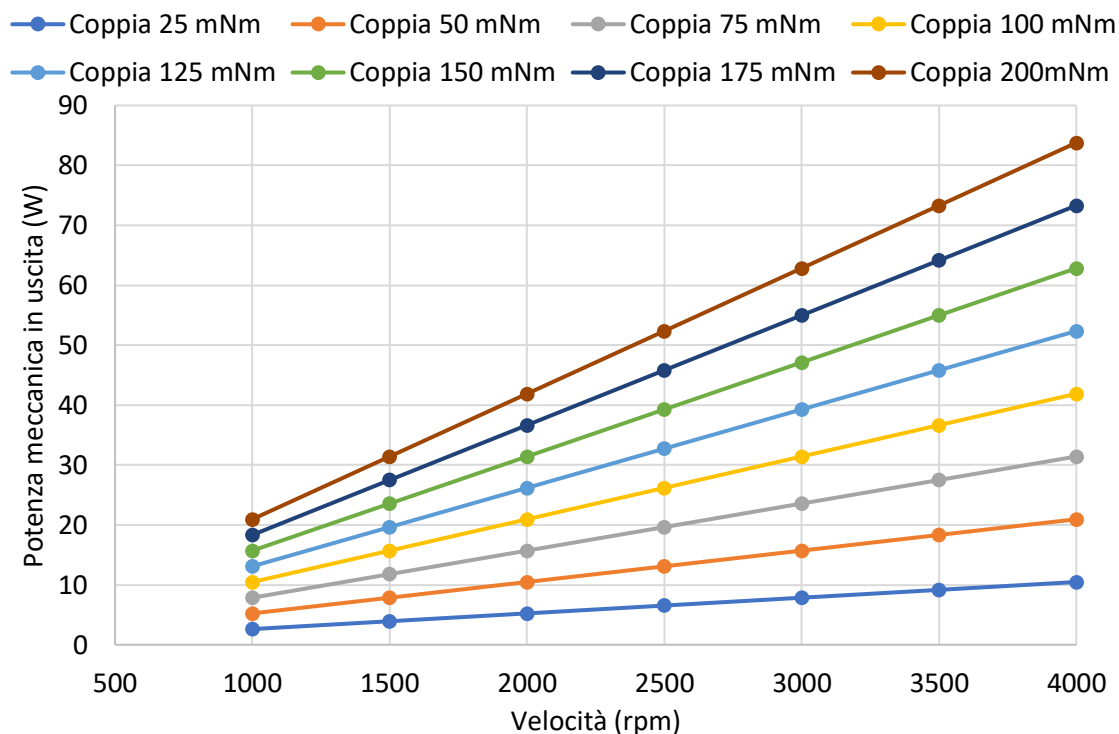


Fig.153 Potenza meccanica in uscita per diverse coppie di carico

Il grafico di Fig.154 mostra l'andamento del rendimento del prototipo nel funzionamento da motore, per le coppie di carico 25mNm, 50mNm, 75mNm, 100mNm, in funzione della velocità. Il grafico di Fig.155 per le coppie 125mNm, 150mNm, 175mNm, 200mNm.

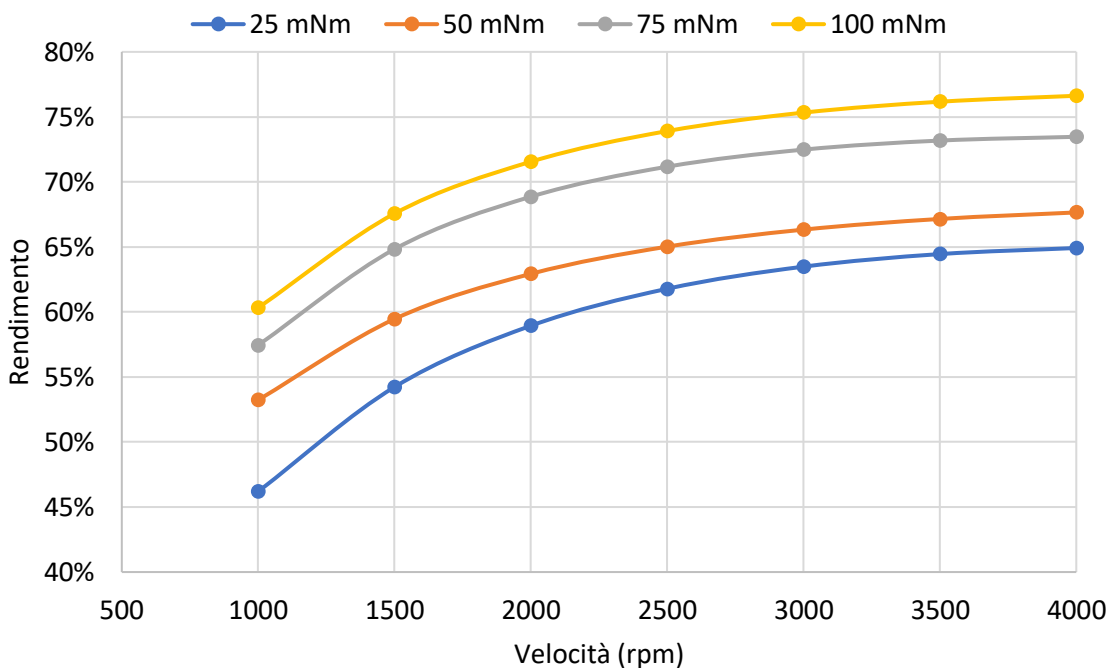


Fig.154 Rendimento per coppie di carico 25mNm, 50mNm, 75mNm, 100mNm



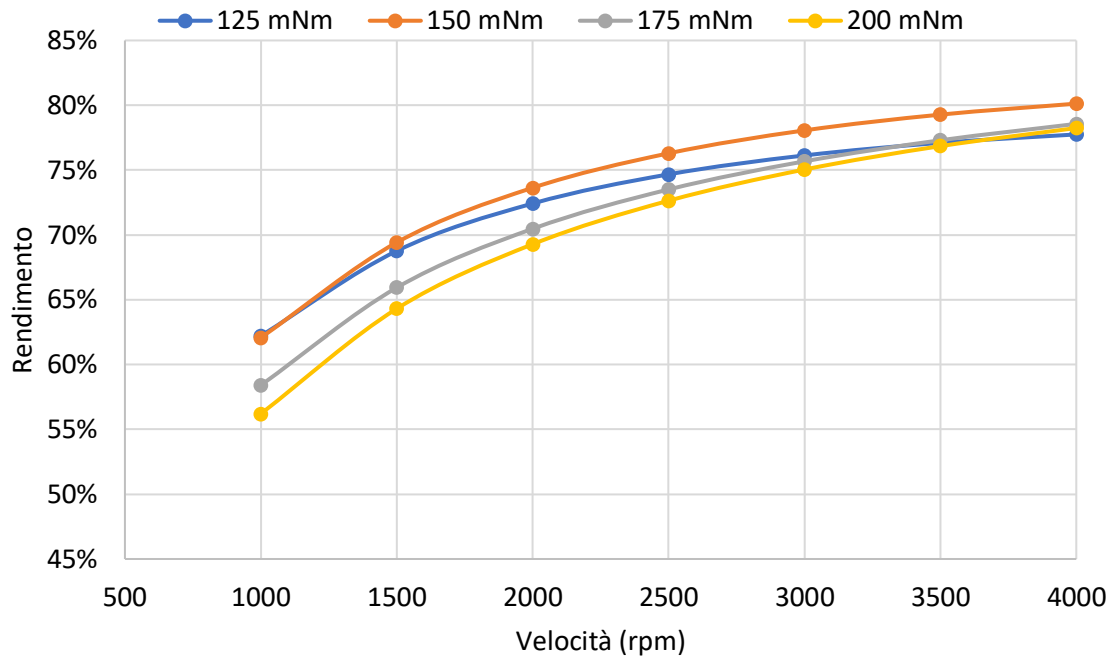


Fig.155 Rendimento per coppie di carico 125mNm,150mNm, 175mNm, 200mNm

Il grafico di Fig.156 mostra la mappa di efficienza del prototipo, misurata nel funzionamento da motore, per le coppie di carico da 25mNm a 200mNm e velocità da 1000rpm a 4000rpm. Il rendimento alla velocità di 4000rpm e coppia di 200mNm è 78,25%. La massima efficienza si ottiene per velocità di 4000rpm e coppia di carico di 150mNm, condizione di funzionamento alla quale corrisponde un rendimento di 80,13%.

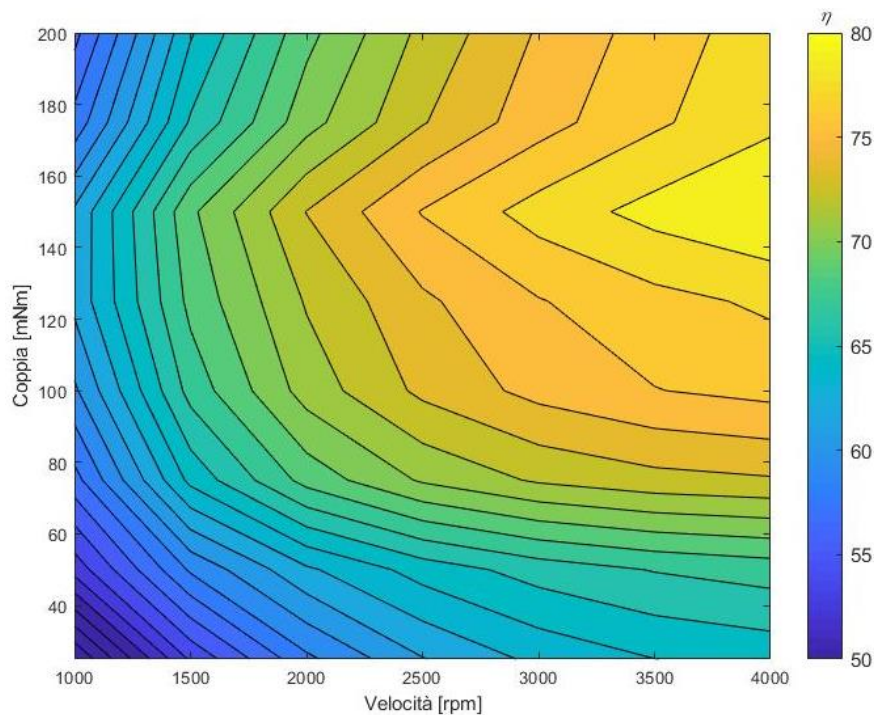


Fig.156 Mappa efficienza

## 9.6 Prova termica

La prova termica viene realizzata con un banco prova composto da:

- Motore asincrono alimentato in corrente continua con funzione di freno meccanico
- Albero in più parti, collegate fra loro da giunti elicoidali elastici
- Torsiometro con valore fondo scala pari a 200 mNm
- Cuscinetto a sfera per alte velocità
- Wattmetro con inserzione 3V3A
- Scheda di acquisizione dati
- Due alimentatori in corrente continua
- Inverter
- Multimetro digitale
- Termocoppia

Lo scopo della misura è di valutare la temperatura massima raggiunta dagli avvolgimenti di statore, in servizio continuo e a regime.

Il multimetro digitale viene utilizzato per effettuare la misura della resistenza concatenata del prototipo con metodo volt-amperometrica a quattro morsetti. Tale metodo di misura permette di prelevare la tensione in modo indipendente dall'adduzione di corrente.

La variazione di resistenza degli avvolgimenti permette di ricavarne la variazione di temperatura.

Le grandezze misurate sono:

- Temperatura ambiente di inizio e fine prova
- Resistenza concatenata degli avvolgimenti a temperatura ambiente
- Resistenza concatenata degli avvolgimenti, misurata ad intervalli di tempo regolari a prova iniziata.

Il prototipo, alimentato da inverter, è messo in rotazione alle velocità 2000rpm e 4000rpm con coppie di carico 100mNm e 200mNm. Raggiunto il punto di lavoro impostato, viene misurata la resistenza a intervalli di tempo regolari. Un sistema di inserzione a due interruttori permette di scollegare rapidamente il prototipo dall'inverter e alimentarlo con la corrente continua di misura (0,3 A), imposta da un alimentatore DC. Vengono misurate correnti e tensioni con multimetro digitale e di conseguenza calcolata la resistenza in DC.

Le tabelle successive: Tab.19, Tab.20, Tab.21, Tab.22, riportano, per ogni prova, le temperature ambiente e di avvolgimento e la resistenza di fase, sia per le condizioni iniziali che per quelle finali.

Inizio prova		Fine prova	
Temperatura ambiente	19,9 °C	Temperatura ambiente	20,0 °C
Temperatura avvolgimento	19,9 °C	Temperatura avvolgimento	32,6 °C
Resistenza di fase	40,7 mΩ	Resistenza di fase	42,75 mΩ

Tab.19 Temperature e resistenze di fase prima e dopo la prova con carico 100mNm e velocità 2000rpm

Inizio prova		Fine prova	
Temperatura ambiente	20,5 °C	Temperatura ambiente	20,2 °C
Temperatura avvolgimento	20,5 °C	Temperatura avvolgimento	34 °C
Resistenza di fase	40,78 mΩ	Resistenza di fase	42,95 mΩ

Tab.20 Temperature e resistenze di fase prima e dopo la prova con carico 100mNm e velocità 4000rpm

Inizio prova		Fine prova	
Temperatura ambiente	19,8 °C	Temperatura ambiente	19,9 °C
Temperatura avvolgimento	19,8 °C	Temperatura avvolgimento	52 °C
Resistenza di fase	40,68 mΩ	Resistenza di fase	45,83 mΩ

Tab.21 Temperature e resistenze di fase prima e dopo la prova con carico 200mNm e velocità 4000rpm

Inizio prova		Fine prova	
Temperatura ambiente	20 °C	Temperatura ambiente	20,1 °C
Temperatura avvolgimento	20 °C	Temperatura avvolgimento	53,6 °C
Resistenza di fase	40,75 mΩ	Resistenza di fase	46,16 mΩ

Tab.22 Temperature e resistenze di fase prima e dopo la prova con carico 200mNm e velocità 2000rpm

L'andamento di temperatura presenta, nelle prove effettuate alle velocità di 2000rpm e 4000rpm con coppie di carico 100mNm e 200mNm, una costante di tempo di circa 285s.

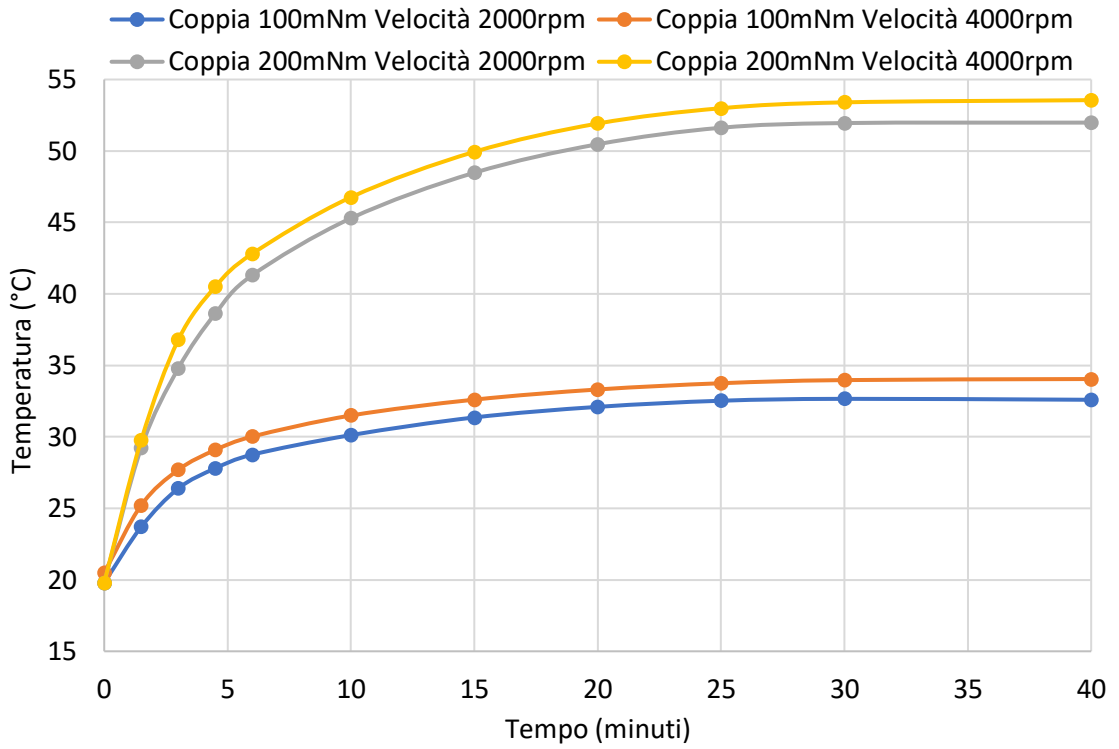


Fig.157 Andamento temperatura avvolgimento

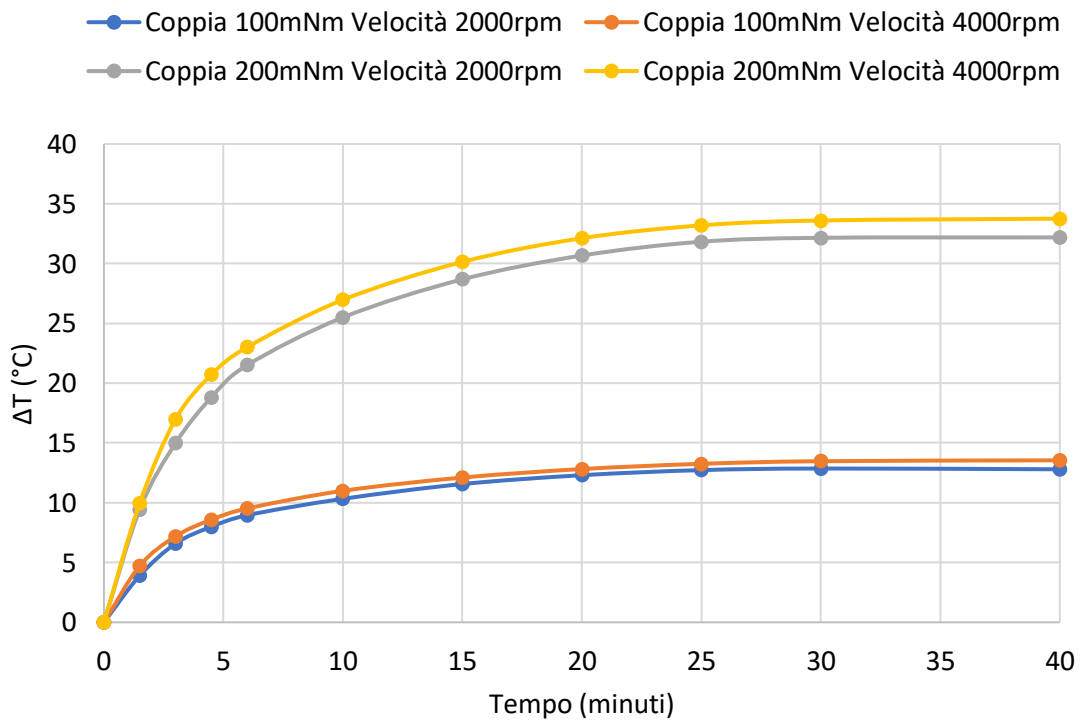


Fig.158 Andamento sovratemperatura avvolgimento

## 9.7 Misura forza assiale

Una misura meccanica molto importante nel determinare una caratteristica fra le più critiche dei motori a flusso assiale è quella della forza di attrazione tra statore e rotore. È necessaria per consentire un appropriato dimensionamento meccanico dei cuscinetti e del supporto di statore.

La prova viene realizzata per mezzo del macchinario ZWICK Z/10 con cella di carico da 5000N e specifico software dell'azienda tedesca ZWICK ROELL. Viene realizzata per ultima perché le condizioni di misura possono ripercuotersi negativamente sul motore.

Nella cella di carico sono fissati lo statore nella parte inferiore e il rotore nella parte superiore.

Operazione fondamentale è la calibratura della macchina, ottenuta posizionando un blocchetto Johnson di ceramica tra statore e rotore per avere il riferimento di distanza massima tra le due parti.

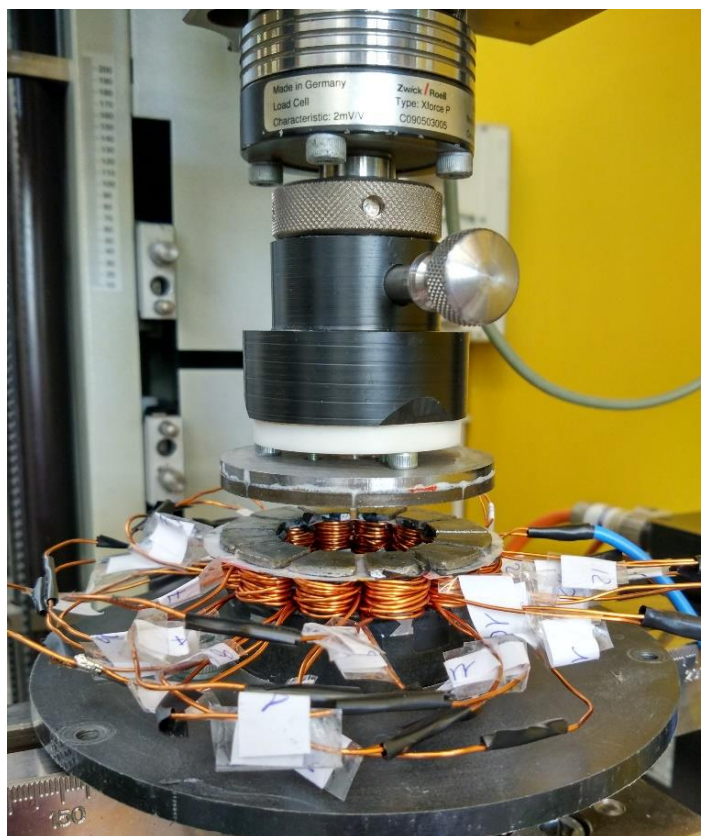


Fig.159 Misura della forza assiale

La forza assiale viene misurata iniziando con la distanza massima di 6mm, cui seguono altre misurazioni che vedono ridurre progressivamente il traferro fino a 1mm, valore di progetto. Al traferro di progetto corrisponde una forza assiale di 91,8 N (Fig.160).

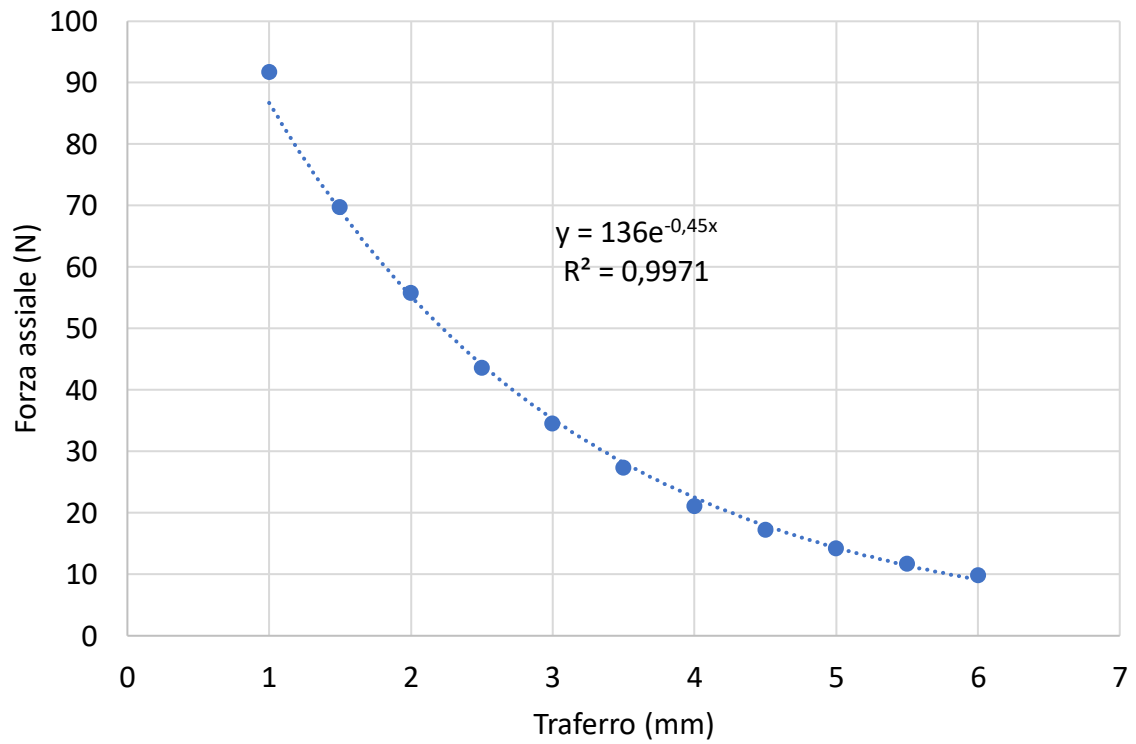


Fig.160 Forza assiale al variare del traferro

# Capitolo 10

## CONCLUSIONI

### Valutazione dell'effetto del campo magnetico applicato durante la pressatura degli SMC

Le sperimentazioni effettuate sui campioni di materiale S.M.C. pressati con campo magnetico applicato in differenti direzioni hanno evidenziato risultati diversi rispetto ai campioni pressati normalmente.

La caratterizzazione magnetica del campione pressato con campo magnetico applicato in direzione parallela presenta, rispetto a quello pressato senza campo applicato, induzione massima superiore del 3,51%, permeabilità massima superiore del 4,4%, perdite specifiche inferiori del 5,23%. Tali valori corrispondono a migliori proprietà magnetiche.

La misurazione del campo coercitivo dei campioni interessati dal campo magnetico prodotto dalla bobina del coercimetro, in direzione concorde a quella del campo applicato in pressatura, mostra valori di coercività inferiori. Un minor campo coercitivo è indice di un materiale più dolce.

La prova di flessione a tre punti mostra che, all'aumentare della pressione di compattazione, aumentano le prestazioni meccaniche e il Modulo di elasticità (E), dopo l'iniziale aumento comune ai campioni, tende a stabilizzarsi.

L'analisi metallografica permette di visionare la microstruttura dei campioni in SMC.

In particolare, il campione pressato con campo magnetico parallelo alla pressatura mostra grani con più strati, perché compenetrati all'interno di grani più grandi.

La polvere di ferro utilizzata è prevalentemente isotropa, per cui il campo magnetico applicato non è in grado di orientare i grani in una direzione preferenziale.

Un'ipotesi che spiega la microstruttura è l'azione delle forze di attrazione magnetica che portano alla minima riluttanza, determinando una migliore disposizione dei singoli grani, disposizione che rende più efficace la compattazione e di conseguenza migliora le proprietà magnetiche.

### Misura termografica

La misurazione termografica permette di evidenziare la distribuzione delle perdite nel ferro e di mostrare eventuali difetti. La tecnica prevede i metodi con eccitazione di breve durata e con eccitazione di lunga durata, cui segue il confronto reciproco e con la tradizionale caratterizzazione magnetica. I risultati evidenziano uno scostamento inferiore all' 8,5% tra i valori ottenuti con eccitazione di breve durata e caratterizzazione magnetica. Scostamento di circa 20% tra i valori ottenuti con eccitazione di breve durata e caratterizzazione magnetica. Dunque, risulta più attendibile la misurazione con eccitazione di breve durata. Per rendere più accurate le misurazioni, in eventuali sviluppi futuri, è possibile aggiungere un avvolgimento secondario per stimare l'induzione effettiva nel materiale in prova. In questo modo il coefficiente  $k$  di proporzionalità diventa più simile al calore specifico reale del materiale. Un altro miglioramento consiste nel poter realizzare il vuoto nell'ambiente di misura per escludere l'influenza della trasmissione di calore per convezione.

### Realizzazione macchina assiale

Il progetto ha consentito la realizzazione e la caratterizzazione di un prototipo di motore a flusso assiale di potenza frazionaria con statore in SMC e plasto-magneti di rotore. Le diverse prove sperimentali ne hanno valutato le prestazioni, che dimostrano una buona corrispondenza con i valori ricavati da calcolo analitico. La massima efficienza si ottiene per velocità di 4000rpm e coppia di carico di 150mNm, condizioni di funzionamento alla quale corrisponde un rendimento di 80,13%. La coppia prodotta è circa il 30% più elevata di una macchina radiale di dimensioni e rendimento simili.

La realizzazione del prototipo ha presentato alcune difficoltà.

La pressa idraulica in uso non consente la compattazione di un unico cilindro del diametro esterno del prototipo, dunque si realizza una macchina modulare composta da sei parti, che implica la necessità di numerosi passaggi di fresatura con relativi piani di riferimento per la lavorazione.

Il campo magnetico applicato in pressatura non ha avuto lo stesso effetto osservato sui campioni visionati al microscopio. Le possibili cause sono: campo magnetico di intensità insufficiente perché le linee di campo passano in gran parte nelle colonne della pressa che hanno permeabilità maggiore rispetto alle polveri; campo magnetico applicato per un tempo troppo breve perché abbia effetto su cilindri con massa maggiore rispetto ai campioni toroidi.



La carta kepton e il nastro isolante sono spesso risultati inadeguati per proteggere il sottile strato di isolante PUR dell'avvolgimento dai bordi taglienti di statore. Infatti, durante la caratterizzazione del prototipo gli sforzi elettrodinamici su bobine hanno causato cortocircuiti e la conseguente necessità di sostituire più volte l'avvolgimento danneggiato.

I materiali SMC adottati evidenziano migliore resistenza meccanica rispetto ai materiali SMC in commercio che non avrebbero permesso la costruzione del prototipo con tali dimensioni. Infatti la costruzione del prototipo ha subito solo la rottura di una scarpa di un dente e ha evidenziato cricche durante l'assemblaggio.

Il traferro non risulta perfettamente costante a causa della diversa altezza dei denti (nell'ordine del decimo di millimetro) e della forza di attrazione assiale tra statore e rotore.

In un'ottica futura è sicuramente possibile applicare soluzioni migliori. Tra quelle attuabili ci sono: uso di materiali con diversi tipi e percentuali di resine per avere prestazioni meccaniche e magnetiche superiori; realizzazione di una macchina assiale multistadio di potenza maggiore, più vantaggiosa di una monostadio di potenza frazionaria.

## RIFERIMENTI

- [1] F. Ervas; “Realizzazione di un motore brushless a flusso assiale per applicazioni automotive a 48V”; Tesi di laurea in Ingegneria Elettrica, Politecnico di Torino; a.a. 2016/17.
- [2] F. Conti; “Design, Finite Element Analysis and Prototyping of an Axial Flux PM Brushless Motor for Automotive Applications”; Master of Science Thesis Politecnico di Torino April 2015.
- [3] Sonaglio, “Proprietà di SMC innovativi: Studio dell’effetto della Composizione e della granulometria”; Tesi di laurea in Ingegneria Elettrica, Politecnico di Torino; a.a. 2014/15.
- [4] D. Damiani; “Studio e ottimizzazione di materiali magnetici soft per la realizzazione di dispositivi per applicazioni elettromagnetiche”; Tesi di laurea in Ingegneria Elettrica, Politecnico di Torino; a.a. 2016/17.
- [5] N. Abrescia; “Valutazione delle perdite nel ferro di materiali ferromagnetici tramite analisi termica”; Tesi di laurea in Ingegneria Elettrica, Politecnico di Torino; a.a. 2015/16.
- [6] A.Cavagnino, M.Lazzari, F.Profumo and A.Tenconi; “A comparison Between the Axial Flux and the Radial Flux Structures for PM Synchronous Motors”; IEEE Transactions on industry applications , Vol.38, No. 6, Novembre /Dicembre 2002.
- [7] H. Shokrollahi, K. Janghorban; “Soft magnetic composite materials (SMCs)”; Department of Materials Science and Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran; 20 February 2007.
- [8] L. Ferraris, F. Franchini, E. Pošković; “A thermographic method for the evaluation of the iron losses distribution in electromagnetic devices”; Politecnico di Torino-sede Alessandria.
- [9] L. Ferraris, F. Franchini, E. Pošković, A. Cavagnino, G. Bramerdorfer; “Application of new magnetic materials for axial flux machine prototypes”; Politecnico di Torino-sede Alessandria, Università degli studi di Padova, Johannes Kepler University of Linz; 2017.

- [10] L. Ferraris, F. Franchini, E. Pošković, A. Tenconi; “Impact of a Bonded-Magnet Adoption on a Specific Fractional Motor Power and Efficiency”; IEE transactions on industry applications, vol. 50, no. 5, september/october 2014
- [11] M. Aydin, Z. Q. Zhu, T. A. Lipo, D. Howe, “Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent Magnet Machines: Design Concepts; IEEE Transactions On Magnetics, September 2007.
- [12] M. Lazzari, “ Dispense del corso di macchine elettriche”; Ingegneria elettrica, Politecnico di Torino.
- [13] A. Vagati “ Slide del corso di azionamenti elettrici”; Ingegneria elettrica, Politecnico di Torino.
- [14] R. Borchiellini “ Slide del corso di termodinamica applicata e trasmissione del calore ”; Dipartimento Energia, Politecnico di Torino.
- [15] F. Giorgis “Slide del corso di fisica II ”; Dipartimento scienza applicata e tecnologia, Politecnico di Torino.
- [16] L. Frosini, “Corso di Costruzioni Elettromeccaniche”; Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell’Informazione, Università di Pavia.
- [17] M. Chiampi, L. Zilberti, O. Bottauscio, D. Giordano, A. Mazin, P.E. Roccatò, “ Elettrotecnica dai campi ai circuiti” ; Politeko, 2012.
- [18] W. D. Callister Jr, "Scienza e ingegneria dei materiali - Una introduzione", Edises, 2007.
- [19] W.F.Smith, J. Hashemi, “Scienza e Tecnologia dei materiali” ; McGraw-Hill, Terza Edizione.
- [20] J.F.Gieras, R.Wang and M. Kamper; “Axial flux permanent Magnet Brushless Machines”; Second edition, Springer.
- [21] B. Zhang; “Soft Magnetic Composites In Novel Designs of Electrical Traction Machines” ; KIT Scientific Publishing, November 2016.

---

## RINGRAZIAMENTI

Questo progetto è stato realizzato grazie alla guida puntuale, ai suggerimenti preziosi, alla disponibilità e al costante impegno di molte persone che desidero ringraziare:

Relatore: Prof. Luca Ferraris;

Correlatori: Prof. Andrea Cavagnino, Ing. Emir Poskovic, Ing. Fausto Franchini;

Personale del Laboratorio di Ingegneria Elettrica della sede di Alessandria del Politecnico di Torino;

Personale del Laboratorio Tecnologico della sede di Alessandria del Politecnico di Torino nella figura dell'Ing. Enrico Pallavicini;

Personale del Laboratorio di Ingegneria dei Materiali della sede di Alessandria del Politecnico di Torino;

Un ringraziamento particolare è rivolto alla mia famiglia e al mio caro amico Luca che in questi anni di studio non hanno mai fatto mancare la loro presenza e il loro supporto.