

POLITECNICO DI TORINO

I FACOLTA DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA

REALIZZAZIONE DI UN MOTORE A FLUSSO ASSIALE ADOTTANDO MATERIALI MAGNETICI INNOVATIVI



Relatori:

Prof. Luca FERRARIS

Prof. Andrea CAVAGNINO

Dott. Ing. EMIR POSKOVIC

Ing. Fausto FRANCHINI

Candidato:

Saverio Stefano FURIO



SOMMARIO

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1	3
MAGNETISMO E MACCHINE ELETTRICHE	3
1.1. Applicazioni del magnetismo alle macchine elettriche.....	3
1.2. Campo magnetico in presenza di mezzi materiali.....	4
2.3. Materiali magnetici dolci e duri	6
2.4. Tipologie di macchine elettriche.....	8
CAPITOLO 2.....	12
MACCHINE ELETTRICHE A FLUSSO ASSIALE.....	12
2.1. Descrizione e funzionamento.....	12
2.2. Vantaggi e svantaggi.....	13
2.3. Tipologie di motori a flusso assiale	14
CAPITOLO 3.....	16
MATERIALI MAGNETICI PER MACCHINE A FLUSSO ASSIALE	16
3.1. Materiali magnetici SMC	16
3.2. Magneti permanenti (Plasto-magneti).....	18
CAPITOLO 4.....	20
SVILUPPO E TEST SU MATERIALI SMC	20
4.1. Materiale SMC proposto	20
4.2. Parametri di processo: “Effetto del lubrificante”	23
4.3. Caratterizzazione magnetica provini Somaloy + Kenolube.....	27
4.3.1. Descrizione del banco prova e preparazione dei provini.....	27
4.3.2. Misure effettuate sui provini Somaloy e risultati di interesse	35
4.3.3. Grafici ottenuti con le prove di caratterizzazione magnetica	41
CAPITOLO 5.....	61
REALIZZAZIONE PROTOTIPO	61
5.1. Progetto e dimensionamento del motore.....	61
5.1.1. Dati di ingresso del motore	61
5.1.2. Caratterizzazione magnetica del materiale scelto e relativi dati di ingresso	63
5.1.3. Dati di ingresso per i materiali del rotore e degli avvolgimenti	67
5.1.4. Risultati del calcolo analitico.....	69
5.1.5. Preparazione delle miscele e stampaggio dello statore.....	71



SOMMARIO

5.2. Stampaggio modulare dello statore	81
5.3. Avvolgimenti.....	103
5.4. Avvolgimento e misure	109
CAPITOLO 6.....	113
RISULTATI SPERIMENTALI.....	113
6.1. MISURE DI COGGING TORQUE.....	113
6.2. PROVE A VUOTO	116
6.3. PROVE A CARICO.....	120
6.4. PROVA CORRENTE – COPPIA.....	125
6.5. MISURA FORZE ASSIALI	128
CAPITOLO 7.....	130
CONSIDERAZIONI FINALI.....	130
7.1. Problematiche riscontrate.....	130
7.2. Sviluppi futuri	130
Bibliografia	132



INTRODUZIONE

INTRODUZIONE

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è la realizzazione di un prototipo di motore elettrico, di tipo brushless a flusso assiale (AFM) per applicazioni automotive, adottando materiali magnetici innovativi di tipo Soft Magnetic Composites (SMC). I motori AFM soffrono in modo particolare gli sforzi meccanici assiali, dovuti agli urti tra statore e rotore affacciati, e gli SMC, per la loro elevata resistenza meccanica, risultano un'ottima risposta a questo problema. Verrà quindi realizzato un prototipo, partendo da un motore già esistente e realizzato in un precedente lavoro di tesi [1] con materiali commerciali meno resistenti meccanicamente.

Dopo una descrizione delle possibilità realizzative e dei notevoli vantaggi offerti dalla tecnologia della metallurgia delle polveri, nel campo delle macchine elettriche, ma non solo, verranno descritte tutte le fasi realizzative, con relative problematiche, che hanno portato alla realizzazione della macchina: dalla caratterizzazione magnetica dei materiali utilizzati, fino alle prove elettriche e meccaniche, ponendo particolare attenzione ai vantaggi e svantaggi di ciascuna fase realizzativa.

I capitoli 2, 3 e 4 sono di carattere introduttivo al lavoro svolto, utili per comprendere le modellistiche dei sistemi fisici studiati, senza però mai scendere eccessivamente nei dettagli. Si darà una breve descrizione dei fenomeni magnetici principali di interesse e si descriveranno le varie tipologie di materiali magnetici utilizzati nella costruzione delle macchine elettriche, con una descrizione delle diverse tipologie di macchine. Si entrerà maggiormente nel dettaglio della tipologia della macchina studiata e realizzata, dandone una descrizione generale del funzionamento, con relativi vantaggi e svantaggi, presentando le diverse tipologie costruttive di questo tipo di macchina. Verranno quindi presentati i materiali magnetici innovativi, utilizzati per la costruzione del motore, e si parlerà in modo dettagliato dei Soft Magnetic Composites e dei Plastomagnet, utilizzati per realizzare rispettivamente lo statore e il rotore della macchina elettrica.

Nei capitoli 5, 6 e 7 si presenterà l'effettivo lavoro svolto in laboratorio: dalla preparazione delle miscele di polveri, ai test condotti sui materiali. Verranno descritte le singole fasi di realizzazione dello statore della macchina e si discuterà delle problematiche riscontrate e delle strade alternative adottate. Verranno infine presentati i risultati delle prove elettriche e



INTRODUZIONE

meccaniche, descrivendo anche i diversi di banchi prova utilizzati, con tutti i relativi limiti elettrici, ma soprattutto meccanici.



CAPITOLO 1

MAGNETISMO E MACCHINE ELETTRICHE

1.1. Applicazioni del magnetismo alle macchine elettriche

I materiali magnetici sono industrialmente importanti per molte applicazioni, e in particolare modo nel settore della tecnologia elettrica ed elettronica. I materiali magnetici possono essere divisi in due grandi categorie: materiali magnetici dolci e duri. I primi vengono utilizzati per applicazioni nelle quali il materiale deve subire dei frequenti processi di magnetizzazione e smagnetizzazione, e quindi deve essere facilmente magnetizzato e smagnetizzato. Tipiche applicazioni sono i nuclei dei trasformatori di potenza, i piccoli trasformatori per applicazioni Switch Mode Power Supply e per gli statori e i rotori delle macchine elettriche. I materiali magnetici duri (chiamati anche permanenti), invece sono utilizzati per applicazioni nelle quali sono richiesti magneti permanenti che, quindi, non si smagnetizzino facilmente, come ad esempio i magneti permanenti utilizzati nei motori sincroni, nei pick-up delle chitarre elettriche o nelle memorie di massa dei computer. Nella Figura 1 possiamo vedere lo statore e il rotore di un motore sincrono brushless a flusso radiale di piccola taglia, realizzati rispettivamente con materiale magnetico dolce e duro.



Figura 1- Statore (sinistra) e rotore di un motore Brushless radiale



1.2. Campo magnetico in presenza di mezzi materiali

Il comportamento magnetico di un materiale è descritto, a livello macroscopico, da una relazione costitutiva generale tra il vettore campo magnetico, indicato con \mathbf{H} , e il vettore induzione magnetica, indicato con \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

Dove la μ , in generale rappresentata da una relazione non lineare, è chiamata permeabilità magnetica del materiale e la si misura in henry/metro (H/m). Viene fornito tipicamente il valore della permeabilità magnetica relativa μ_r rispetto a quella del vuoto μ_0 ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m), e si ha la seguente relazione:

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

La relazione costitutiva può quindi essere scritta come la somma di un contributo in assenza di mezzi materiali, e un contributo dovuto al materiale che, in quanto magnetizzato, produce un campo magnetico quantificabile mediante il vettore magnetizzazione \mathbf{M} :

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

Tra il vettore campo magnetico e il vettore magnetizzazione esiste una proporzionalità data dalla suscettività magnetica:

$$\chi_M = \frac{M}{H} = \mu_r - 1$$

Da queste relazioni, con semplici passaggi, si riottiene la relazione costitutiva generale.

La magnetizzazione viene definita come la densità volumica di momento magnetico \mathbf{m} , del materiale. Quindi introdurre il vettore magnetizzazione significa dare una rappresentazione della materia come costituita da momenti magnetici elementari, e ognuno di questi è associato a spire elementari di corrente [2]. In assenza di campi magnetici esterni, se il materiale presenta un vettore magnetizzazione medio nullo ($\langle \mathbf{M}_0 \rangle = 0$) e una permeabilità relativa di poco inferiore all'unità, cioè i singoli vettori, disordinati, danno un contributo mediamente nullo, allora si parla di materiali *diamagnetici*. Se invece il materiale, in assenza di campi magnetici esterni, presenta un vettore magnetizzazione medio diverso da zero ($\langle \mathbf{M}_0 \rangle \neq 0$) e una permeabilità relativa di poco superiore all'unità, allora si parla di materiali *paramagnetici*, nei quali i singoli vettori magnetizzazione, già parzialmente ordinati,



tendono ad allinearsi in presenza di campi magnetici. Entrambi i materiali, diamagnetici e paramagnetici, si magnetizzano solo in presenza di un campo magnetico esterno.

Un caso particolare di materiali paramagnetici sono i materiali *ferromagnetici*, che sono i materiali di interesse nelle macchine elettriche, i quali restano magnetizzati anche in assenza di campi magnetici esterni e presentano una permeabilità relativa molto elevata. Questo diverso comportamento è dovuto all'interazione, più forte, tra gli stessi momenti magnetici, cioè le “molecole” magnetiche stesse interagiscono tra di loro magnetizzandosi. È molto importante osservare che questa interazione viene meno all'aumentare della temperatura, dove prevale l'agitazione termica e il materiale diventa paramagnetico. Ogni materiale presenta una determinata temperatura, chiamata *temperatura di Curie* o *punto di Curie* (T_c), dove avviene questo cambio di comportamento. Tipicamente si utilizzano delle curve che riportano la magnetizzazione di saturazione (valore di densità volumica massima della magnetizzazione, quando non è più possibile magnetizzare ulteriormente il materiale) in funzione della temperatura di Curie (Figura 2):

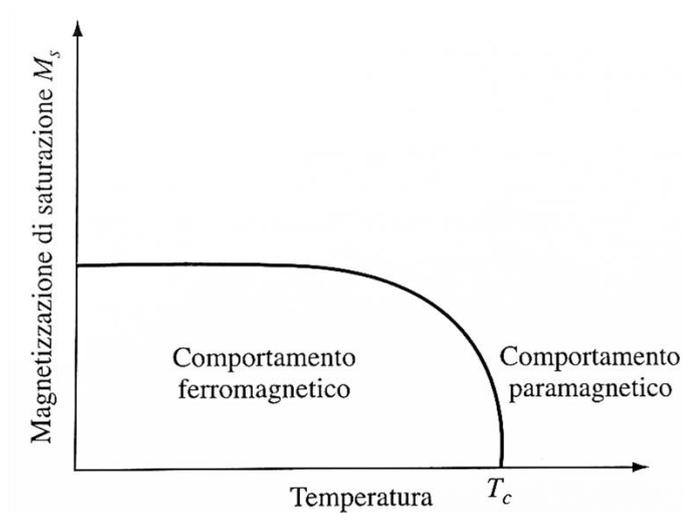


Figura 2- Effetto della temperatura sulla magnetizzazione di saturazione per un materiale ferromagnetico [3]

Quindi, riassumendo i diversi comportamenti magnetici della materia, si hanno i materiali:

- DIAMAGNETICI: $\langle \mathbf{M}_0 \rangle = 0$, $\mu_r \leq 1$
- PARAMAGNETICI: $\langle \mathbf{M}_0 \rangle \neq 0$, $\mu_r \geq 1$
- FERROMAGNETICI: $\langle \mathbf{M}_0 \rangle \neq 0$, $\mu_r \gg 1$



Per completezza si hanno anche, tra i diversi tipi di magnetismo, i comportamenti *antiferromagnetici*, come nel caso del manganese e del cromo, dove i momenti magnetici si allineano in direzioni opposte, e *ferrimagnetici*, come nel caso di alcuni materiali ceramici, dove i momenti magnetici di diverse dimensioni si allineano in modo antiparallelo. Quest'ultimo caso presenta un momento magnetico risultante lungo una direzione, e il gruppo di materiali ferrimagnetici viene identificato come *ferriti*. Nella seguente Figura 3 è possibile vedere il comportamento dei tre materiali elencati:

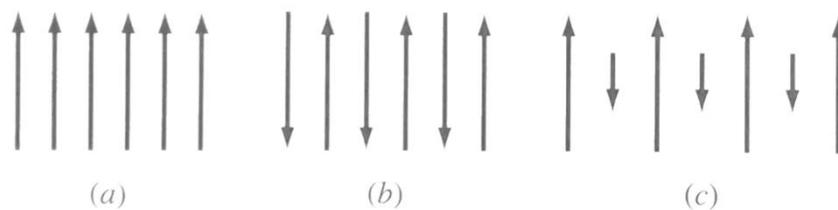


Figura 3- Allineamento dei momenti magnetici nei casi (a) ferromagnetismo (b) antiferromagnetismo (c) ferrimagnetismo [3]

2.3. Materiali magnetici dolci e duri

I materiali ferromagnetici a parità di campo magnetico \mathbf{H} presentano dei valori di induzione \mathbf{B} molto più elevati dei valori ottenuti con i materiali diamagnetici e paramagnetici e sono caratterizzati da una relazione fortemente non lineare tra campo magnetico e induzione magnetica: $\mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{H})$. I punti della caratteristica definiscono una curva chiamata *ciclo di isteresi*, del tipo rappresentato in Figura 4:

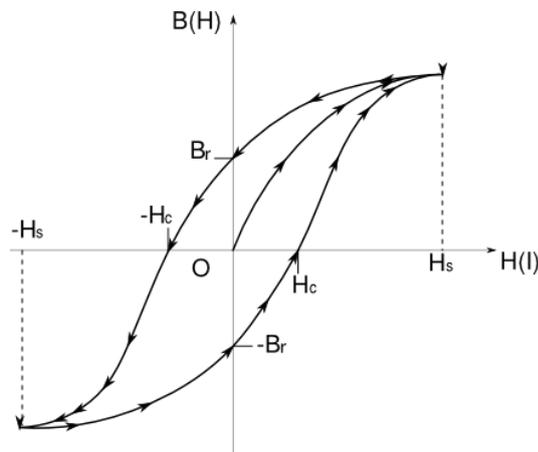


Figura 4- Ciclo di isteresi di un materiale ferromagnetico



Dove la curva, che parte dall'origine del piano, è chiamata curva di prima magnetizzazione e il valore dell'induzione magnetica B_r , corrispondente ad un campo magnetico nullo, si chiama *induzione residua*, mentre il valore del campo magnetico H_c corrispondente ad un valore di induzione nullo, si chiama *campo coercitivo*. L'area della curva rappresenta una perdita volumica di energia dissipata nell'unità di tempo (W/m^3) e questa quota di perdite è chiamata *perdite per isteresi*, dovute al lavoro alternativo di magnetizzazione e smagnetizzazione del materiale, quindi intrinsecamente legato alla memoria magnetica del materiale. Nei materiali ferromagnetici questa non è l'unica quota di potenza persa, bisogna anche considerare le *perdite per correnti parassite* (o correnti Foucault), dovute alla circolazione di correnti a causa di forze elettromotrici indotte da flussi magnetici variabili nel tempo, e *perdite addizionali*, che tengono in considerazione gli effetti legati ai processi di modifica della forma e distribuzione dei domini magnetici, nei quali i momenti magnetici presentano una stessa direzione.

L'insieme delle perdite per isteresi, correnti parassite e addizionali, sono indicate con il nome di *perdite nel ferro*, e una loro indicazione viene data da un valore definito *cifra di perdita*, il quale rappresenta la potenza globale dissipata nell'unità di massa (W/kg) alla frequenza di 50 Hz, con un valore di induzione sinusoidale pari a 1 T.

Diciamo ancora che dal ciclo di isteresi è quindi possibile distinguere i materiali magnetici dolci da quelli duri. I materiali magnetici dolci presentano:

- Elevata induzione di saturazione
- Elevata permeabilità
- Cicli di isteresi ristretti
- Bassi valori di campo coercitivo
- Meccanicamente teneri

Sono materiali facilmente magnetizzabili e smagnetizzabili, fisicamente sono più teneri dei materiali magnetici duri. Invece i materiali magnetici duri presentano:

- Elevate induzioni residue (fino a circa 1.3 T)
- Cicli di isteresi larghi
- Elevati campi coercitivi
- Meccanicamente duri



Sono quindi materiali difficili da smagnetizzare, una volta che sono stati magnetizzati, e per queste caratteristiche sono utilizzati nella costruzione dei magneti permanenti delle macchine elettriche.

2.4. Tipologie di macchine elettriche

Prima di entrare nel dettaglio della tipologia di motore elettrico realizzato, ovvero un motore brushless a flusso assiale, in questo paragrafo viene data una classificazione, non esaustiva, delle diverse tipologie di macchine elettriche utilizzate nell'ambito automotive, e quindi per la trazione di veicoli elettrici e ibridi, e verranno elencate le principali caratteristiche non di tutti i motori, ma di quelli più significativi dal punto di vista industriale e commerciale, in quanto i rimanenti, appartenenti alla stessa categoria, presentano simili caratteristiche o comunque piccole variazioni.

Le macchine elettriche possono essere classificate secondo il sincronismo o meno tra la velocità di rotazione del rotore e la frequenza del campo magnetico rotante. Quindi possiamo parlare di macchine *sincrone* e *asincrone*. Tra le diverse macchine o motori di tipo asincrono abbiamo:

- asincrono a induzione a gabbia di scoiattolo
- asincrono a induzione a rotore avvolto
- asincrono a induzione con doppio avvolgimento

Questi motori rientrano nella categoria indicata con l'acronimo IM (Induction Motor) e nella Figura 5 è possibile vedere un esempio di motore asincrono con rotore a gabbia di scoiattolo:

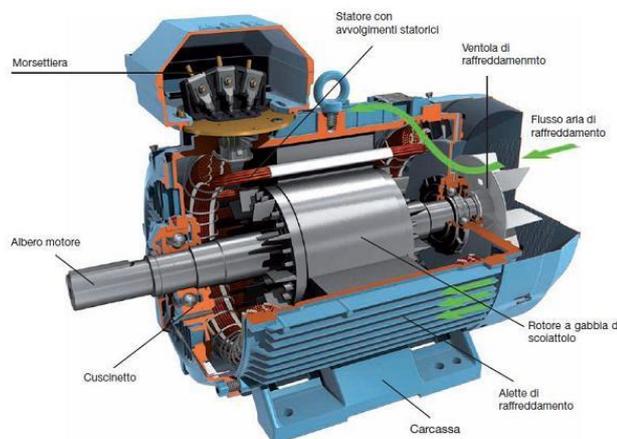


Figura 5- Motore a induzione con rotore a gabbia di scoiattolo



I principali vantaggi e svantaggi dei motori asincroni sono:

- assenza di spazzole
- minore densità di coppia
- possibilità di ottenere bassi traferri geometrici
- elevata sovraccaricabilità
- ondulazione di coppia bassa (skewing semplice da ottenere)
- rumori contenuti

Per quanto riguarda la categoria dei motori di tipo sincrono, è invece possibile fare una ulteriore classificazione tra:

- motori a magneti permanenti
 - brushless isotropo radiale con magneti superficiali (SPM)
 - brushless isotropo o anisotropo a flusso assiale (AFM)
 - brushless radiale anisotropo con magneti sepolti (IPM)
 - motore brushed DC
- motori a riluttanza variabile
 - switched reluctance
 - synchronous reluctance (synchrel - SyR)

Nella Figura 6 è possibile vedere un confronto tra il motore SPM con magneti superficiali e il motore con magneti sepolti (o interni):

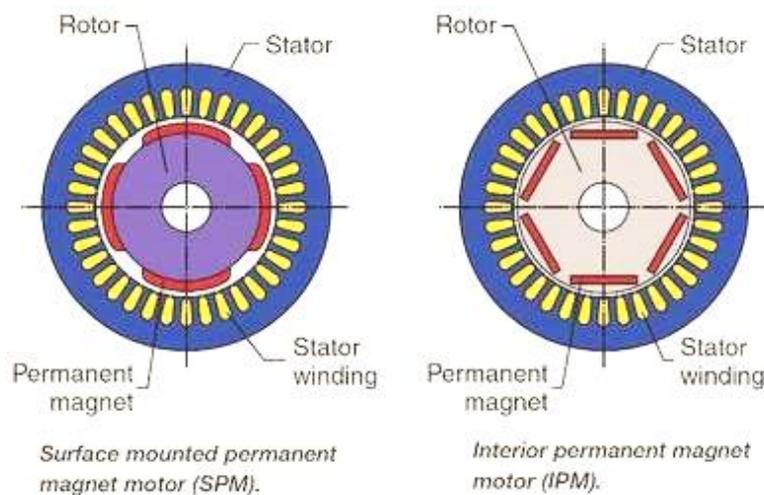


Figura 6 - Motori sincroni brushless SPM e IPM

Il motore IPM in Figura 6 presenta una delle possibili disposizioni dei magneti interni. Infatti esistono varie possibilità di disposizione dei magneti, le quali modificano in modo significativo il contributo di coppia anisotropa.

Le caratteristiche principali di questi due motori sono:

Brushless SPM

- alta densità di coppia
- elevati trasferri geometrici
- sovraccaricabili
- alte efficienze con materiali pregiati
- ripple di coppia contenibile
- rumori molto contenuti

Brushless IPM

- alta densità di coppia
- bassi trasferri geometrici
- sovraccaricabili
- alte efficienze con materiali pregiati
- ripple di coppia più difficili da contenere
- rumori molto contenuti

Nella Figura 7 è possibile vedere un motore della tipologia a riluttanza variabile:

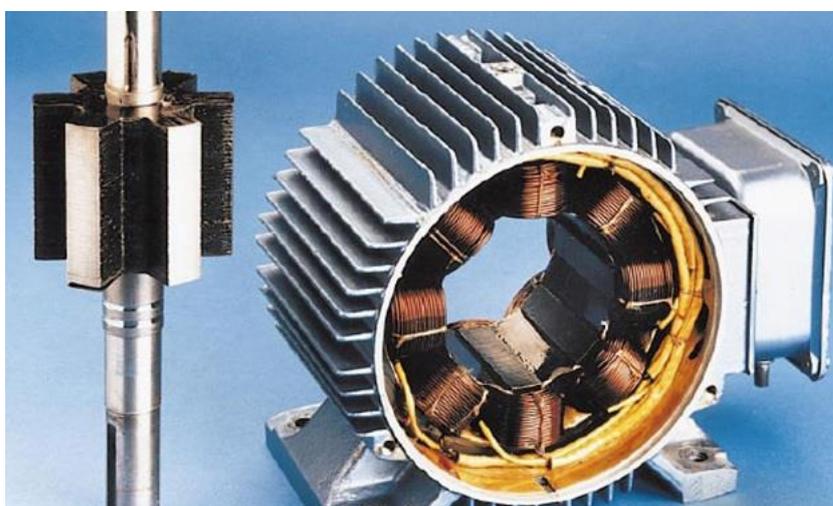


Figura 7- Motore Switched reluctance, rotore (sinistra) e statore



Le caratteristiche di questa tipologia di motori sono:

- buona densità di coppia, ma più bassa dei brushless SMP e IPM
- alta efficienza con materiali pregiati
- alta ondulazione di coppia
- rumori molto alti

Infine si riporta in Figura 8 un esempio di motore brushless a flusso assiale, che verrà descritto in modo più dettagliato nel prossimo capitolo:

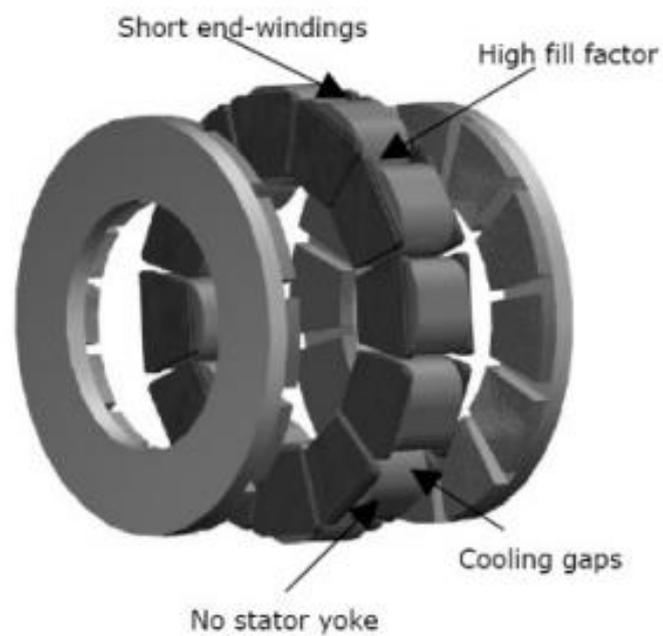


Figura 8- Motore brushless a flusso assiale

CAPITOLO 2

MACCHINE ELETTRICHE A FLUSSO ASSIALE

2.1. Descrizione e funzionamento

Le macchine elettriche a flusso assiale, o macchine a disco, sono particolari macchine che, come suggerisce il nome, presentano delle linee di flusso che si richiudono assialmente anziché radialmente, come invece accade nelle più famose macchine a flusso radiale:

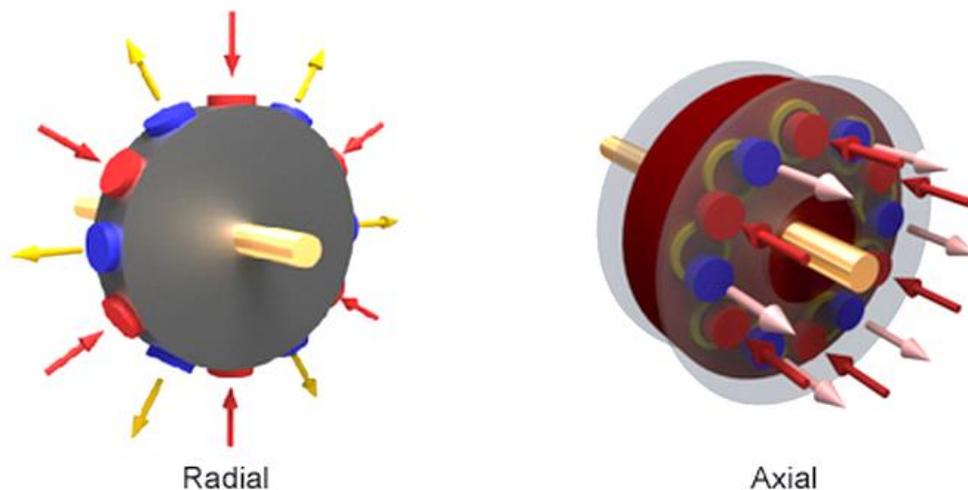


Figura 9- Motore brushless a flusso radiale e assiale

Questa tipologia di motori, come descritto nel paragrafo “Tipologie di macchine elettriche”, rientra nella categoria dei motori sincroni di tipo brushless a magneti permanenti e, come struttura, può essere ricavato dallo stesso motore brushless a flusso radiale, ma immaginando di richiudere la struttura su sé stessa. Nella Figura 9- Motore brushless a flusso radiale e assiale è possibile vedere come la direzione del flusso sia diretta nel senso radiale della macchina, nel caso di motore radiale, mentre nel motore assiale la direzione del flusso sia diretta lungo l’asse di rotazione del motore. Questa tipologia di macchine trova quindi una naturale applicazione nell’ambito automotive, dove l’alta densità di coppia è una delle caratteristiche privilegiate. Infatti è possibile sviluppare delle strutture chiamate *multistadio*, cioè delle macchine aventi una molteplicità di statori e rotor, che portano ad un considerevole aumento delle superfici utili per la produzione di coppia e cioè ad una maggiore densità di coppia. Questa tipologia di motore non ebbe una notevole diffusione, e le cause furono dovute essenzialmente alle difficoltà tecniche, nonché



economiche, legate alla produzione e progettazione dei pacchi di lamiera, oltre che alle notevoli difficoltà di riduzione e omogeneità del traferro, a causa della forte attrazione tra statore e rotore, e quindi l'utilizzo fu limitato a particolari applicazioni in cui erano richiesti ridotti ingombri assiali [4]. Con lo sviluppo delle tecniche della metallurgia delle polveri e la comparsa di nuovi materiali, più resistenti meccanicamente, la creazione di strutture complesse, impossibili da realizzare con i pacchi di lamierini, diventa una possibilità relativamente semplice, facilitata anche dalla diminuzione del costo degli azionamenti elettrici. Come tutti i motori brushless, anche questa tipologia di motori richiede, per un corretto funzionamento, un controllo della posizione del rotore, in quanto è necessario generare nel modo corretto il vettore campo magnetico rotante [1]. Il controllo, fatto con sensori a effetto Hall o con encoder, per azionamenti ad alte prestazioni, può essere fatto in due modi differenti e si hanno controlli di tipo *trapezio* e *sinusoidale* e lo scopo di entrambe le tecniche è di ottenere una coppia che sia indipendente dalla posizione angolare del motore. Inoltre le tecniche di controllo, trapezoidale e sinusoidale, e quindi la modellistica elettromeccanica di questi motori è del tutto identica ai più comuni motori brushless a flusso radiale.

2.2. Vantaggi e svantaggi

Come già visto al paragrafo “Tipologie di macchine elettriche”, gli svantaggi di questo tipo di motore sono essenzialmente gli stessi che ne hanno impedito una rapida diffusione, e nel seguito se ne elencano i principali:

Svantaggi

- elevati costi di fabbricazione
- difficoltà nella realizzazione dei pacchi di lamiera statorici
- difficoltà nell'ottenere piccoli traferri
- difficoltà di omogeneità del traferro
- sforzi meccanici statici e a fatica che provocano la distruzione del materiale

Invece tra i vantaggi legati proprio a questo tipo di macchina, se ne aggiungono altri legati a nuovi materiali utilizzati e soprattutto alle tecniche della metallurgia delle polveri:



Vantaggi

- ottima densità di coppia, ancora più alta nelle strutture multistadio
- trasferri geometrici facilmente regolabili durante l'assemblaggio
- sovraccaricabili
- possibilità di realizzare strutture multistadio
- elevate efficienze con materiali pregiati
- facilità nella dissipazione del calore
- bassa ondulazione di coppia (<5%) [5]
- scarso rumore

2.3. Tipologie di motori a flusso assiale

I motori brushless a flusso assiale presentano innumerevoli tipologie costruttive, differenti sulla base del numero di statori e rotorii utilizzati, che possono essere sostanzialmente distinti in:

- struttura monostadio
- struttura multistadio con doppio statore e singolo rotore
- struttura multistadio con doppio rotore e singolo statore

In questa tesi verrà seguita la filosofia delle strutture monostadio, ovvero composte da un solo statore, che verrà realizzato con materiali SMC, e un solo rotore, realizzato con plasto-magneti. Queste strutture presentano un solo traferro e lo statore può essere costruito in modi diversi, a seconda della taglia della macchina, con cave, senza cave o a poli salienti. Le strutture multistadio presentano invece un doppio rotore e un singolo statore, o un doppio statore e un singolo rotore, e per lo statore ci sono le stesse possibilità costruttive delle strutture monostadio. Nella Figura 10 e Figura 11 sono riportate alcune immagini di motori a flusso assiale di tipo monostadio e multistadio: nella struttura monostadio è possibile vedere i magneti permanenti disposti sulla superficie del rotore e affacciati alle polarità create dalle bobine, avvolte attorno ai denti di statore.

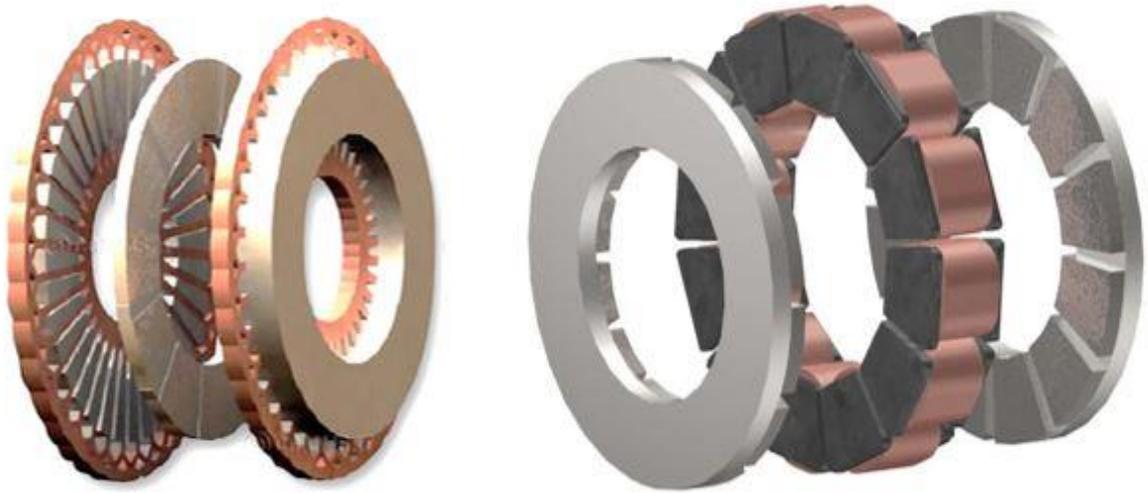


Figura 10- Struttura con doppio statore (a sinistra) e con doppio rotore

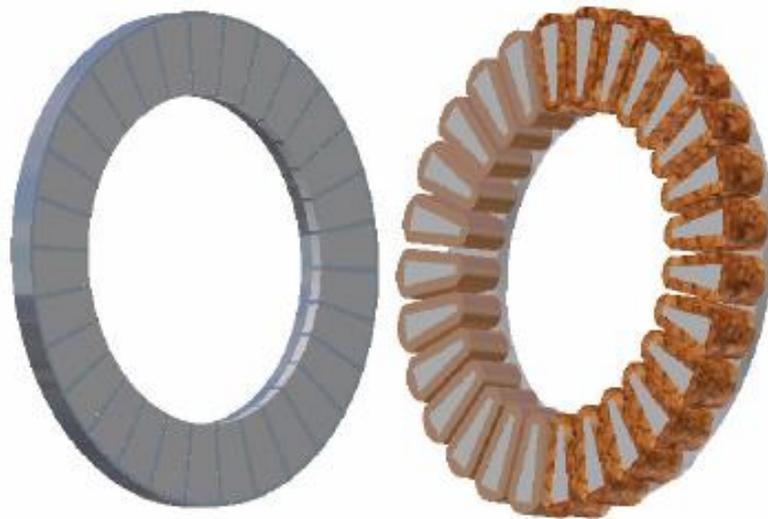


Figura 11- Struttura monostadio con rotore (a sinistra) e statore



CAPITOLO 3

MATERIALI MAGNETICI PER MACCHINE A FLUSSO ASSIALE

3.1. Materiali magnetici SMC

Con il termine metallurgia delle polveri (PM – Powder Metallurgy) si intendono tutti quei processi industriali che portano alla creazione di elementi metallici compatti, a partire da materiali metallici in forma pulvirulenta. Le fasi della metallurgia delle polveri sono principalmente le seguenti:

- creazione delle polveri di metallo a partire da materiali metallici (riciclaggio di materiali)
- creazione della miscela di polvere metallica e additivi leganti
- miscelazione meccanica delle polveri
- compattazione della miscela mediante pressatura a freddo o a caldo
- ciclo termico necessario per la reticolazione degli additivi leganti, presenti nella miscela, con la struttura metallica o sinterizzazione ad elevata temperatura

La tecnica di sinterizzazione non è stata mai effettuata in questo lavoro di tesi, in quanto le elevate temperature, utilizzate tipicamente per materiali come le ferriti, che infatti vengono pressate e sinterizzate ad alta temperatura, possono distruggere o far degradare il materiale utilizzato per l'isolamento. I cicli termici utilizzati in laboratorio presentano tutti temperature massime di 150° in quanto sono state utilizzate come resine termoindurenti la resina fenolica e l'epossidica. Con resine di tipo inorganico, come gli ossidi di ferro, possono essere raggiunte temperature anche di 500°. Bisogna comunque osservare che temperature ancora superiori, cioè le tipiche temperature che vengono utilizzate nei processi di sinterizzazione, modificano il comportamento del materiale ferromagnetico. Cioè andando oltre i limiti termici del materiale imposti dalla temperatura di Curie avviene il cambio di comportamento da materiale ferromagnetico a materiale paramagnetico e quindi, nel caso di magneti permanenti, si effettuano nuovamente i cicli di magnetizzazione.

I materiali Soft Magnetic Composites (SMC) vengono realizzati utilizzando la tecnica della metallurgia delle polveri e consistono in polveri ferromagnetiche rivestite mediante uno strato di isolante. Le dimensioni delle polveri di ferro possono variare da 100 µm a 200 µm

e sono rivestite singolarmente da una resina termoindurente, la quale viene aggiunta in piccole dosi, opportunamente calcolate, per ottenere determinate proprietà meccaniche ed elettriche. Nella Figura 12 possiamo notare un ingrandimento al microscopio delle polveri di ferro compattate e rivestite dalla resina isolante organica o inorganica:

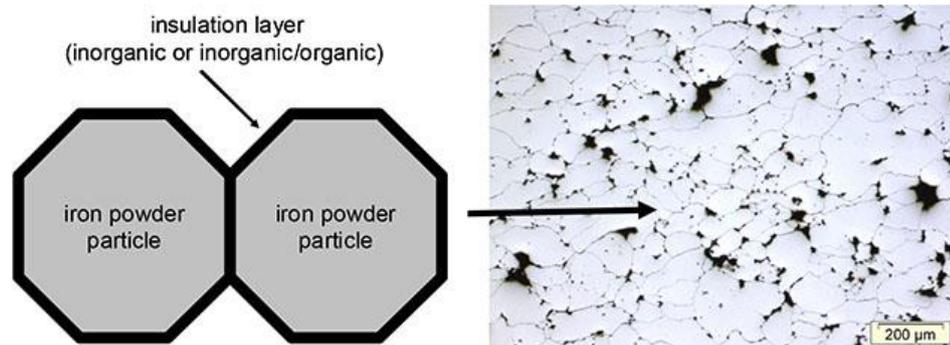


Figura 12- Polveri di ferro compattate e rivestite di resina isolante

Con la miscelazione, compattazione e ciclo termico, si ottengono delle strutture metalliche isotrope (caratterizzate quindi dalle stesse proprietà fisiche e magnetiche lungo le tre dimensioni) e questo offre dei vantaggi notevoli rispetto ai classici lamierini utilizzati nelle macchine elettriche. Questi materiali, oltre a offrire riduzione di peso e volume, permettono di limitare fortemente le correnti parassite alle medie frequenze nelle quali lavorano le macchine elettriche, e risulta evidente il vantaggio derivante dalla possibilità di creare strutture con geometrie assolutamente impensabili con i classici pacchi di lamierini compattati. Questo significa anche risolvere in modo più semplice i problemi legati alle disomogeneità delle macchine elettriche, come ad esempio la cogging torque, la quale, con uno studio opportuno della geometria della macchina, può essere ridotta in modi relativamente più semplici.

Da lavori precedenti, svolti nella sede di Alessandria del Politecnico di Torino si è potuto constatare che la pressatura delle polveri è una fase molto delicata e importante nella quale la pressione di esercizio della pressa gioca un ruolo molto importante. Infatti è stato verificato che all'aumentare della pressione di lavoro aumentano la permeabilità magnetica,



la massima densità di flusso, la conducibilità termica e la resistenza meccanica del materiale. Invece un ruolo importantissimo è dato dalle percentuali di resina termoindurente utilizzate nella miscela, le quali migliorano fortemente la resistenza meccanica, ma non è possibile andare oltre certe piccole percentuali in quanto peggiorano la massima densità di flusso, la permeabilità magnetica e la conducibilità termica. Come si vedrà nei prossimi capitoli, le percentuali di resina utilizzate sono un ottimo compromesso tra proprietà magnetiche e meccaniche, dove si è riusciti a ottenere dei valori di resistenza meccanica non esistenti in commercio, anche se con valori più alti delle cifre di perdita del materiale. Quindi per concludere questa breve descrizione, si riportano le principali caratteristiche desiderate dai materiali SMC:

- elevata resistenza meccanica
- basse cifre di perdita
 - basse perdite per isteresi
 - basse perdite per correnti parassite
 - basse perdite addizionali
- elevata permeabilità
- resistenza all'invecchiamento chimico
- elevata induzione di saturazione
- isotropia meccanica ed elettrica del materiale

Dalla proprietà magnetiche desiderate è possibile notare che corrispondono proprio alle caratteristiche desiderate per un materiale ferromagnetico dolce, e infatti, come si vedrà nei prossimi capitoli, i materiali SMC verranno adottati per la creazione della struttura dello statore del motore a flusso assiale.

3.2. Magneti permanenti (Plasto-magneti)

Con il termine plasto-magneti (bonded magnets) si intendono i materiali ferromagnetici duri realizzati mediante la tecnica della metallurgia delle polveri. I plasto-magneti sono quindi realizzati miscelando polveri ferromagnetiche dure, come il NdFeB, con resine di tipo termoindurente, come la resina fenolica, o resine di tipo termoplastico. Dopo la preparazione della miscela, avviene la fase di miscelazione automatica in apposito macchinario e quindi



la fase di compressione delle polveri a freddo. In alternativa alla compressione a freddo è possibile utilizzare stampaggi a iniezione.

In Figura 13 è possibile vedere esempi di plasto-magneti realizzati con la tecnica della pressatura a freddo:



Figura 13- Plasto-magneti realizzati con pressa a freddo

I plasto-magneti presentano le seguenti caratteristiche [1]:

- sono meno fragili dei magneti realizzati in ferrite sinterizzata
- presentano un'ottima resistenza agli sforzi centrifughi
- ottima resistenza alla corrosione, se rivestiti con resine epossidiche

Mediante processi di sinterizzazione, cioè non utilizzando leganti costituiti da resine organiche o plastiche, si riescono ad ottenere, con gli stessi materiali, delle proprietà magnetiche superiori, ma la preparazione dei plasto-magneti risulta comunque più semplice ed economica della sinterizzazione. Questo tipo di materiali trova naturale applicazione nella realizzazione dei magneti sulla struttura rotorica dei motori brushless a flusso assiale, dove sono richieste semplicità di montaggio e vantaggi economici sui processi di produzione.

CAPITOLO 4

SVILUPPO E TEST SU MATERIALI SMC

4.1. Materiale SMC proposto

Nei capitoli precedenti sono state date delle informazioni e descrizioni di carattere generale e introduttivo all'attività di tesi svolta in laboratorio. In questo capitolo vengono quindi descritte le prime fasi e scelte per la realizzazione del prototipo di motore. Come descritto nell'introduzione, l'obiettivo è la realizzazione di un prototipo di motore brushless a flusso assiale adottando materiali magnetici innovativi di tipo SMC. Si verificherà, nel corso di questo lavoro, se effettivamente questi materiali risultano più resistenti meccanicamente rispetto ai materiali presenti in commercio e se presentano caratteristiche magnetiche migliori. Il confronto di queste caratteristiche meccaniche e magnetiche verrà effettuato costruendo un prototipo con la stessa geometria di un motore già esistente, realizzato in un precedente lavoro di tesi [1]. Nella Figura 14 è possibile vedere il prototipo di partenza e i danni del materiale, subiti a causa dei forti urti dovuti all'elevata attrazione tra statore e rotore:



Figura 14 - Prototipo di partenza: statore realizzato con polveri commerciali

La forte attrazione tra statore e rotore è quindi un forte problema che limita le possibilità di ridurre il traferro di macchina. Risulta quindi necessario adottare materiali migliori che risolvano i problemi meccanici senza incidere troppo sulle qualità magnetiche del materiale.

I materiali SMC che verranno testati e confrontati con le polveri ferromagnetiche commerciali sono ricette, con determinate percentuali di resine organiche, già studiate presso

la sede di Alessandria del Politecnico di Torino, e verranno preparate, caratterizzate magneticamente e confrontate con le polveri commerciali.

La polvere commerciale è chiamata “Somaloy” e presenta come legante la resina termoindurente “Kenolube”. Come visto nei capitoli precedenti, l’obiettivo per queste miscele è cercare di ridurre alle minime percentuali le quantità di legante. E per questo verranno caratterizzati diversi campioni di polvere commerciale, con valori di resina kenolube decrescente. Si osservi che il prototipo di motore è preparato con polvere Somaloy senza l’aggiunta di ulteriore lubrificante e questa polvere presenta già una piccola percentuale di lubrificante kenolube.

Le polveri sperimentali preparate in laboratorio sono invece una miscela a base di polveri di ferro e due tipi di lubrificanti:

- Ferro + resina fenolica 0,2%
- Ferro + resina epossidica 0,2 %

La preparazione della miscela è avvenuta in laboratorio sotto cappa chimica, e i valori di lubrificante utilizzati sono pari allo 0,2% in peso. Nella Figura 15 è possibile vedere la preparazione della miscela:

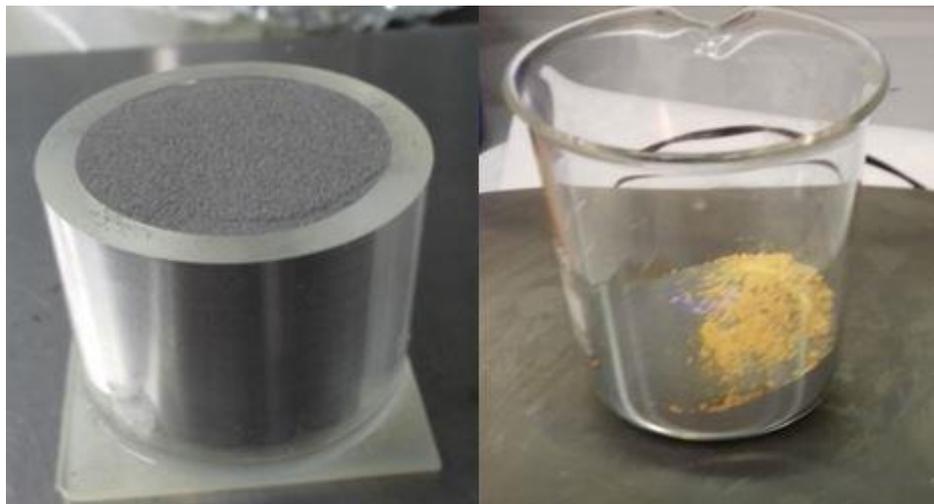


Figura 15- Polvere di ferro Feabc (a sinistra) e miscela di ferro e resina fenolica

Dopo aver pesato le polveri di ferro e la resina fenolica, presente allo 0,2% in peso, sono state prima miscelate manualmente in un becher e poi disposte nel miscelatore automatico

per un tempo pari a 30 minuti, come si può vedere nella Figura 16. La fase di miscelazione, manuale e poi automatica, risulta necessaria al fine di rendere la miscela più omogenea, evitando la formazione di grumi di resina. Questo problema riguarda tipicamente la resina di tipo fenolica, la quale si presenta in forma di polvere biancastra e inoltre richiede necessariamente una lavorazione sotto cappa chimica a ventilazione forzata, in quanto tossica. Invece la resina epossidica risulta pastosa e meno tossica, ma di più difficile lavorazione, in quanto pesarne pochi decimi di grammo, manualmente, risulta decisamente scomodo per l'operatore.

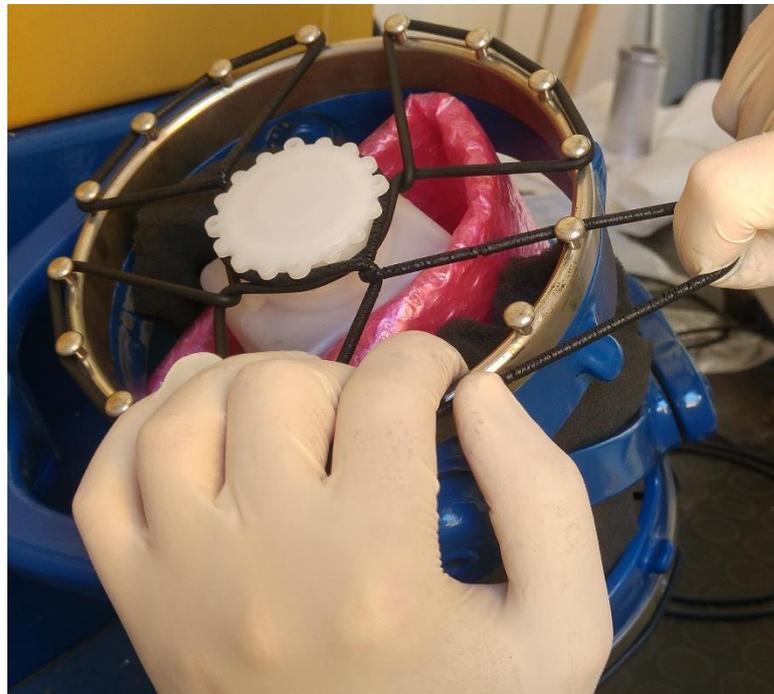


Figura 16- Miscelatore automatico

Terminata la fase di miscelatura automatica, si è proceduto con il calcolo delle densità apparenti delle due miscele in forma pulvirulenta. Il calcolo è stato effettuato facendo una media aritmetica tra dieci misure di peso, effettuate all'interno di un recipiente campione. Vengono riportati nella Tabella 1 i risultati delle densità apparenti:

TIPO DI MISCELA	Densità apparente polvere (g/cm ³)
Ferro + fenolica	3,12
Ferro + epossidica	2,92

Tabella 1- Densità apparenti delle miscele

La fase seguente è stata la preparazione di miscele di polvere commerciale Somaloy con diverse percentuali di legante kenolube. Le miscele preparate sono le seguenti:

Miscele di polveri commerciali Somaloy con percentuali di kenolube decrescenti:

- Somaloy SK0.8
- Somaloy SK0.5
- Somaloy SK0.3
- Somaloy SK0.0
- Somaloy SSK

Le diverse miscele presentano percentuali di legante kenolube decrescenti: si parte dallo 0,8% fino al valore 0,0%. Si osservi che l'ultima miscela (Somaloy SSK) è l'unica a non contenere davvero il kenolube, in quanto la miscela SK0.0, ovvero la polvere commerciale, contiene già una piccola percentuale. L'eliminazione completa della resina viene effettuata mediante un opportuno ciclo termico che verrà descritto nei prossimi capitoli.

Terminata la fase di preparazione delle miscele si può procedere con la fase di pressatura a freddo delle polveri.

4.2. Parametri di processo: "Effetto del lubrificante"

La fase di pressatura a freddo è stata effettuata con una pressione sulle polveri di 800 MPa. Le polveri, dopo essere state disposte all'interno della camera, come si può vedere in Figura 17, vengono compresse in modo da ottenere dei dischi compatti.



Figura 17- Pressa a freddo delle polveri Somaloy(sinistra) e campioni cilindrici



Per ogni campione ottenuto sono state prese le seguenti misure:

- Diametro campione (mm)
- Altezza campione (mm)
- Pressione massima raggiunta (bar)

Il valore di pressione massima raggiunta è un dato molto importante, in quanto fornisce indicazione sulla bontà del processo di pressatura. Valori eccessivamente bassi portano ad una cattiva compattazione delle polveri con pessimi risultati meccanici. Invece valori eccessivamente alti comportano la formazione di cricche sul materiale o problemi di natura sia meccanica che magnetica. Il problema delle pressioni eccessivamente alte è legato a problemi della pressa stessa: infatti il punzone, una volta pressate le polveri alla massima pressione, rischia di rimanere bloccato a causa degli eccessivi attriti con le pareti dello stampo, e questo evidentemente comporta delle notevoli variazioni di pressione sulle polveri. Per evitare questo problema, e quindi ridurre gli attriti, si utilizza del lubrificante che viene applicato direttamente sulle pareti dello stampo e sulla superficie del punzone. In tal modo oltre a ridurre gli attriti tra le pareti si riescono a raggiungere delle pressioni di lavoro più elevate rispetto agli standard industriali, e questo comporta chiaramente dei notevoli miglioramenti delle caratteristiche non solo meccaniche ma anche magnetiche, come descritto al paragrafo “Materiali magnetici SMC”.

I campioni una volta pressati vengono sottoposti ad un trattamento termico, in un forno controllato, chiamato: “*trattamento di Curing*”: i campioni vengono sottoposti ad una rampa di temperatura che parte dalla temperatura ambiente fino alla temperatura di 150°C per 30 minuti, a cui segue una isoterma a 150°C per 30 minuti e infine il raffreddamento avviene in modo naturale fino al raggiungimento della temperatura ambiente. Il trattamento di Curing risulta molto importante, in quanto permette la reticolazione della resina nella matrice metallica degli atomi di ferro. Un buon trattamento termico porta quindi ad un materiale più resistente meccanicamente, e se si utilizzano rampe eccessivamente ripide può non avvenire una corretta reticolazione. Inoltre la temperatura di 150°C Figura 18 è un valore di temperatura opportunamente valutato affinché la resina non degradi. Nella seguente Figura 18 si riporta il ciclo termico utilizzato.

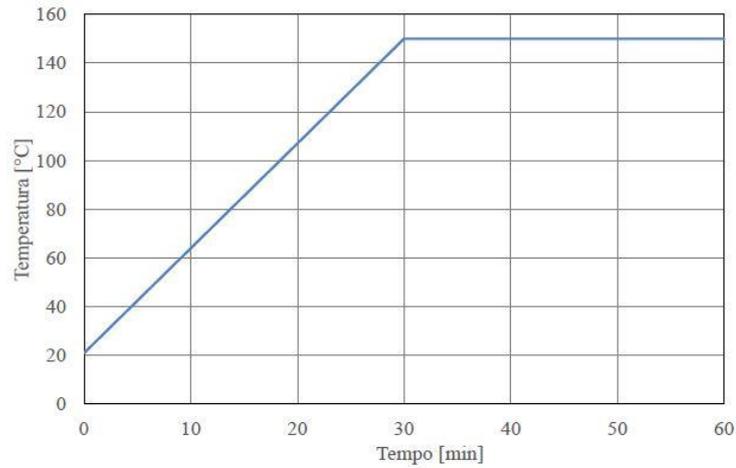


Figura 18- Ciclo termico di Curing

Nella Figura 19 è possibile vedere i campioni inseriti nel forno:



Figura 19- Campioni inseriti nel forno controllato

Dopo il trattamento termico, i campioni, a forma di disco, presentano dei depositi di materiale rossastro dovuti a reazioni chimiche della resina. Bisogna fare particolare attenzione a non respirare i prodotti di reazione, tossici, all'apertura del forno. Per queste operazioni è stato necessario utilizzare gli appositi dispositivi di protezione individuale.



Figura 20- Campioni Somaloy K03 dopo il trattamento termico



Figura 21- Campioni Somaloy K0.5 dopo il trattamento termico

Nei seguenti tabelle si riportano i dati relativi ai campioni pressati e sottoposti a ciclo termico. Si osservi che per ogni miscela sono stati fatti due campioni, e quindi un totale di 10 campioni.

CAMPIONI SOMALOY + kenolube	Peso (g)	Altezza (mm)	Pressioni massime (bar)	Densità (g/cm ³)
SK0.8 (I)	44,73	4,98	152,11	7,15
SK0.8 (II)	41,16	4,64	152,12	7,06
SK0.5 (I)	45,08	4,97	152,12	7,22
SK0.5 (II)	42,66	4,98	152,26	6,82
SK0.3 (I)	42,15	4,62	152,19	7,26
SK0.3 (II)	43,42	4,76	152,21	7,26
SK0 (I)	46,52	5,06	152,28	7,32
SK0 (II)	42,79	4,63	151,95	7,35
SSK (I)	42,52	4,85	152,33	6,98
SSK (II)	44,50	5,07	152,93	6,99

Tabella 2- Dati campioni Somaloy-Kenolube

E si riporta anche il GRAFICO 1 relativo alle densità dei dieci campioni Somaloy con kenolube:

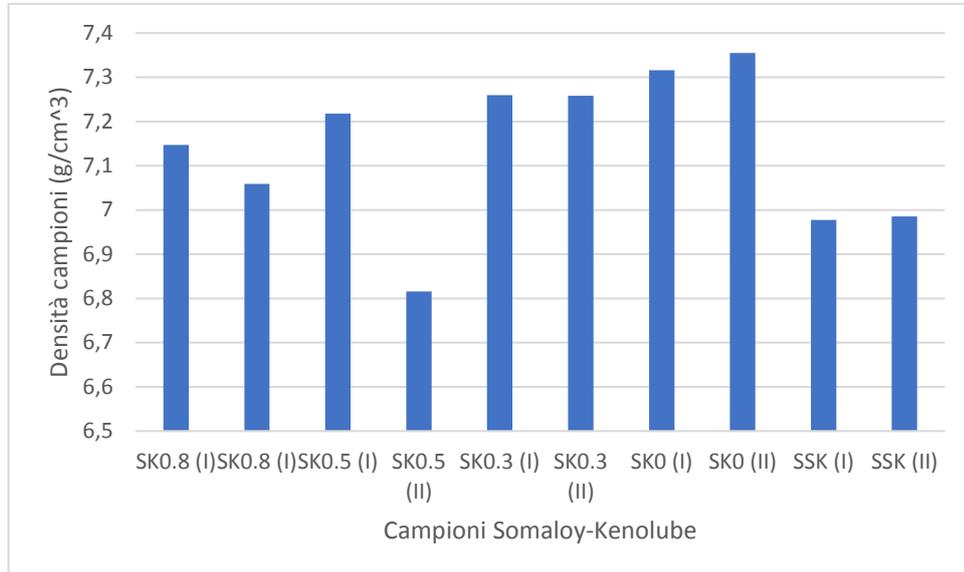


GRAFICO 1- Densità campioni Somaloy-Kenolube

4.3. Caratterizzazione magnetica provini Somaloy + Kenolube

4.3.1. Descrizione del banco prova e preparazione dei provini

Dopo la fase di pressatura è stato possibile procedere con la fase di fresatura, necessaria per la creazione di toroidi, i quali verranno avvolti e caratterizzati magneticamente. I toroidi sono stati quindi fresati con i seguenti dati della fresa:

- Velocità di avanzamento della fresa: 40 mm/min
- Velocità di rotazione della fresa: 1000 giri/min

Questi valori sono quelli ottimali affinché il materiale non si surriscaldi eccessivamente e non subisca danni. Lavorazioni a velocità più basse portano a risultati meccanici e magnetici migliori, ma a costo di tempi decisamente più prolungati. Nella

Figura 23 e Figura 24 è possibile vedere i campioni disposti nella fresa:



Figura 22- Campione disposto nella staffa



Figura 23- Fresatura campioni Somaloy



Figura 24 - Fresatura campione Somaloy e schermo fresa con controllo automatico del processo

I campioni fresati presentano mediamente i seguenti valori:

- diametro interno: 30 mm
- diametro esterno: 40 mm
- altezza: 5 mm
- peso: 20 g

Non si riportano i dati precisi di ogni campione, in quanto poco significativi e di interesse esclusivamente come dati di ingresso per il software della caratterizzazione magnetica dei materiali.

La preparazione dei campioni per la preparazione magnetica segue le seguenti fasi:

- La prima fase consiste nell'isolamento dei campioni, che avviene semplicemente avvolgendo del nastro isolante:



Figura 25- Isolamento elettrico dei campioni

Il nastro isolante, oltre all'isolamento elettrico, protegge i provini da eventuale invecchiamento. Il processo di avvolgimento è stato effettuato avvolgendo il nastro isolante attorno al campione toroidale, dopo aver tagliato una striscia di nastro di lunghezza pari a 40 mm e divisa in due parti, in modo da ottenere due strisce di 40 mm più sottili e semplici da avvolgere, evitando quindi la formazione di rigonfiamenti sull'avvolgimento. L'avvolgimento deve essere abbastanza stretto ma non eccessivamente, altrimenti il nastro potrebbe rompersi.

La fase successiva riguarda la disposizione degli avvolgimenti primario e secondario. Non avendo a disposizione una bobinatrice automatica, questi avvolgimenti sono stati fatti

manualmente. L'avvolgimento secondario, su cui vengono acquisite le misure, presenta un numero di avvolgimenti pari a 100 ed è stato effettuato mediante filo di rame già isolato:



Figura 26-Avvolgimento secondario con filo di rame di 100 spire

Le terminazioni dell'avvolgimento vengono poi intrecciate e su circa 2 mm di terminazione verrà poi eliminato l'isolamento mediante saldatore a stagno. L'avvolgimento primario è invece costituito da 200 spire, e per questo si utilizzano dei cavi rivestiti in plastica:

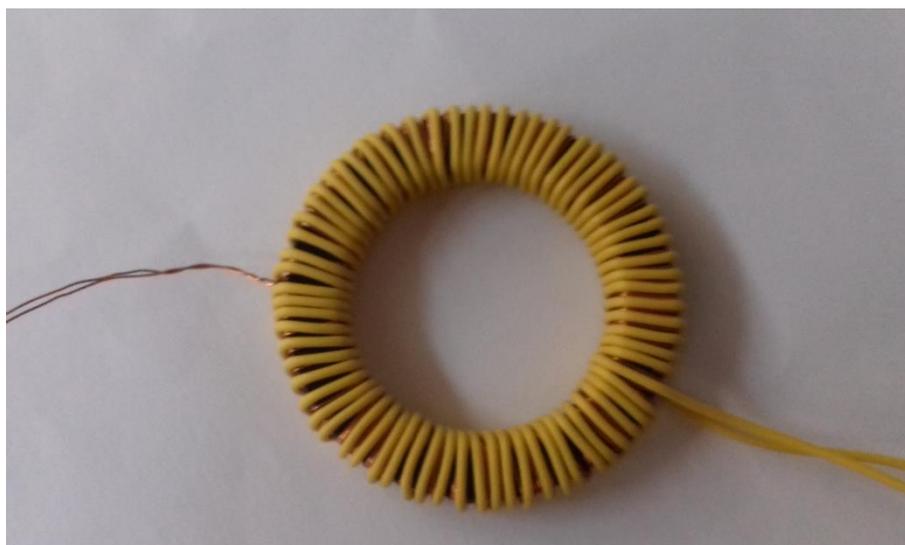


Figura 27- Avvolgimento primario di 200 spire

La procedura di avvolgimento del primario è del tutto simile a quella del primario, dove bisogna prestare attenzione a non avvolgere in modo troppo stretto l'avvolgimento, in quanto potrebbe rompersi l'isolamento o, peggio ancora, potrebbe spezzarsi il filo di rame interno. Per questa fase si procede con 7 metri di cavo più spesso, in quanto nel primario passa corrente e il secondario è invece a vuoto in quanto si effettua solamente la misura delle tensioni a vuoto. Il cavo viene avvolto per 1/3 in senso orario, ottenendo circa 80 spire e poi, per i rimanenti 2/3 nell'altro senso per altre 120 spire, per un totale di 200 spire. Si osservi che a fine avvolgimento vengono prese comunque le misure di resistenza, per capire se ci sono stati danni agli avvolgimenti. I valori di riferimento delle resistenze sono:

- Resistenza avvolgimento primario: 0,6 Ω
- Resistenza avvolgimento secondario: 0,9 Ω



Figura 28- Campione completo di avvolgimento primario e secondario

Come detto precedentemente, è necessario togliere l'isolamento delle parti più esterne degli avvolgimenti: per il primario basterà spellare l'avvolgimento mediante un tronchese, dato che il rame interno alla plastica è già nudo. Per la bobina secondaria sarà necessario procedere con l'eliminazione dell'isolante (pece) mediante saldatura a stagno. Nella seguente Figura 29 si riportano le immagini relative alla saldatura degli avvolgimenti secondari.



Figura 29- Saldatura a stagno degli avvolgimenti secondari

Dalla Figura 29 è possibile notare che è stata utilizzata, per la saldatura, una temperatura di 420 °C. Andando a temperature ancora superiori si corre il rischio di fondere lo stesso filo di rame, invece per temperature inferiori non si ottengono dei buoni rivestimenti di stagno.



Figura 30- Saldatura avvolgimenti secondari

Dopo la preparazione dei provini si è effettuata la caratterizzazione magnetica. I campioni sono stati posizionati nel banco prova, come si può vedere nella Figura 31 e Figura 32:

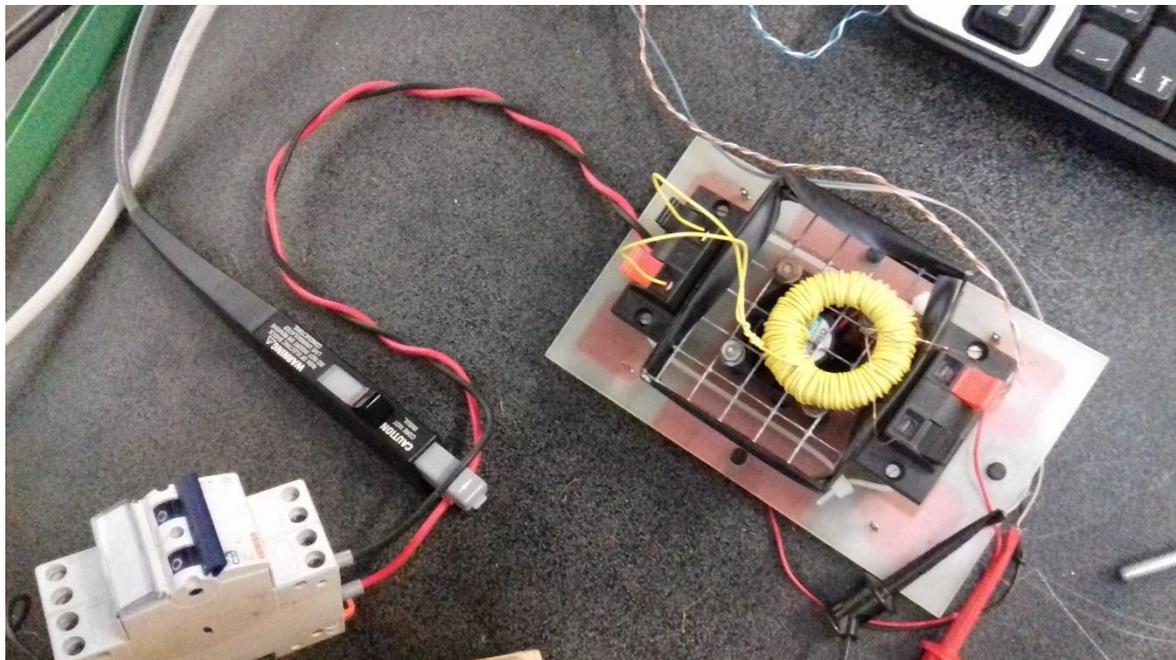


Figura 31- Banco prova per la caratterizzazione magnetica

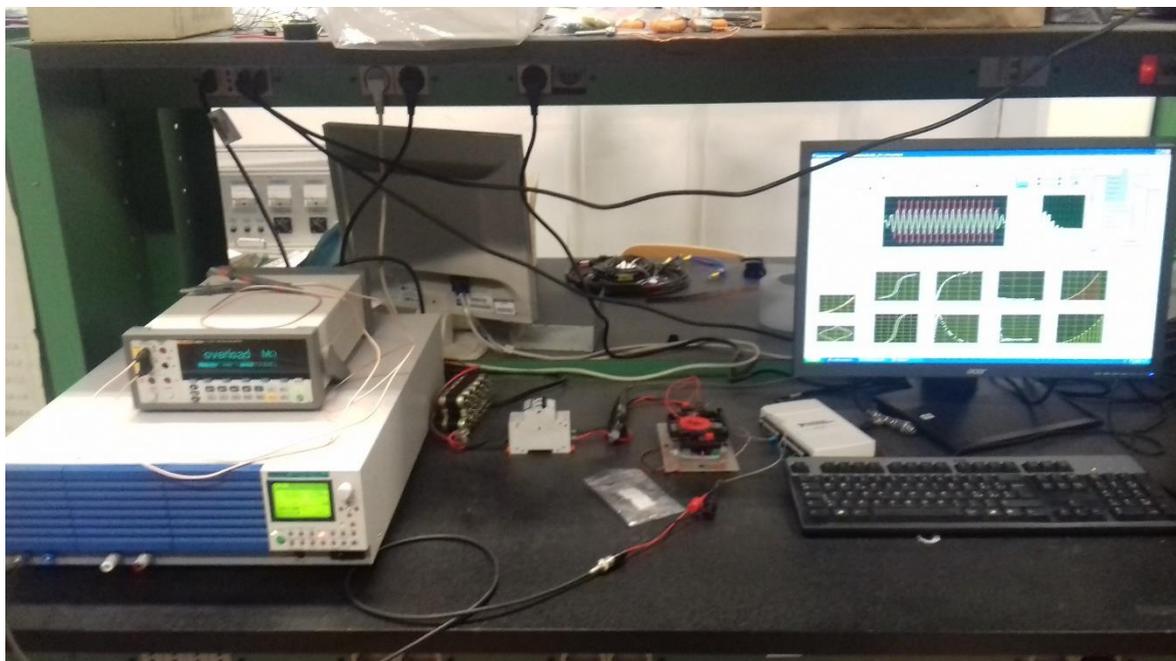


Figura 32- Banco prova per la caratterizzazione magnetica

In figura possiamo notare i diversi componenti che costituiscono il banco prova per la caratterizzazione magnetica: abbiamo un amplificatore da banco, il quale genera le sinusoidi

alle diverse frequenze e le invia agli avvolgimenti primari del trasformatore. Sull'avvolgimento primario è anche inserita una pinza amperometrica per la misura di corrente che circola al primario. I morsetti secondari sono connessi alla scheda di acquisizione dati, la quale elabora le misurazioni e restituisce i dati della caratterizzazione magnetica. Nella è possibile vedere la schermata del software, scritto in ambiente Labview:

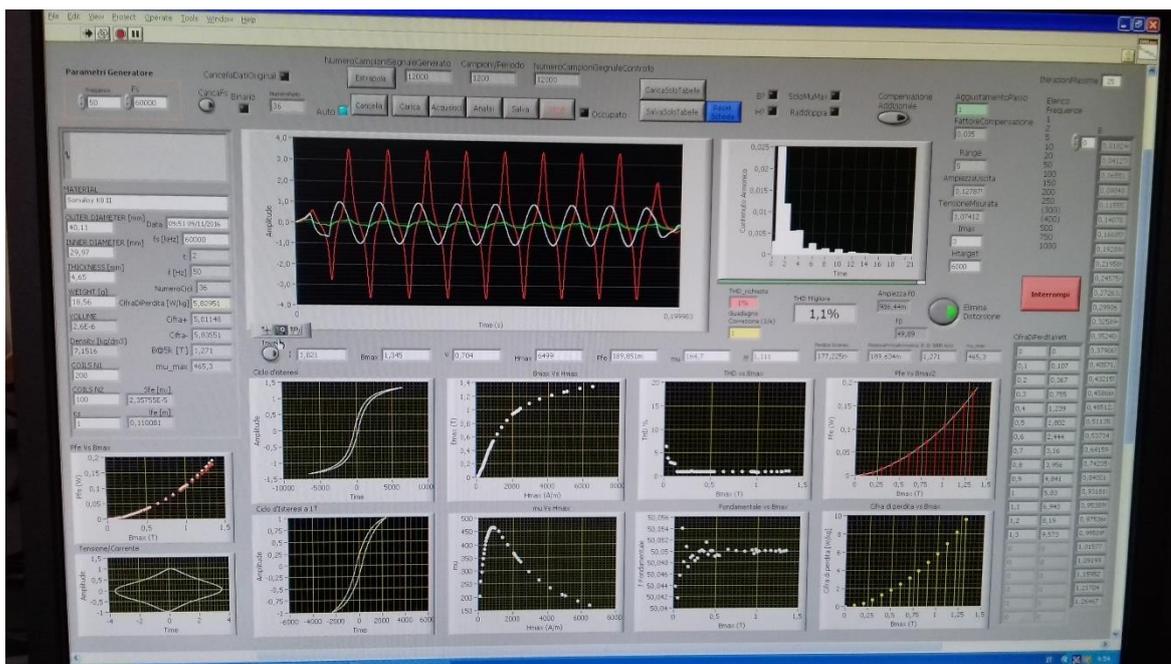


Figura 33- Schermata software per la caratterizzazione magnetica

Possiamo notare che il software restituisce le seguenti misure: abbiamo gli andamenti nel tempo di tensione (curva in bianco) e corrente (curva in rosso) nel tempo. Un corretto inserimento dei morsetti primari e secondari del toroide comporta, come in tutti i sistemi induttivi, uno sfasamento tra tensione e corrente con tensione in anticipo di 90° sulla corrente. La misura può essere più o meno lunga a seconda dell'attivazione del comando di eliminazione della distorsione armonica. Ovvero può essere inviato un segnale (curva in verde) di compensazione delle armoniche. In alto a destra possiamo vedere una analisi del contenuto armonico della corrente e il software provvede a far scendere i livelli di distorsione armonica al di sotto dell'1%. Vengono quindi ottenute le curve relative al ciclo di isteresi, l'andamento della permeabilità magnetica nel tempo e gli andamenti delle perdite nel ferro e delle cifre di perdita in funzione dei valori di induzione misurati.



4.3.2. Misure effettuate sui provini Somaloy e risultati di interesse

Sono state quindi effettuate le misure per frequenze crescenti da 10 Hz fino a 500 Hz. Si riportano i principali dati di interesse delle prove:

PROVINI SOMALOY	R PRIMARIO (Ω)	R SECONDARIO (Ω)	SPESSORE (mm)
SOMALOY K0 (I)	0,76	0,8	5,03
SOMALOY K0 (II)	0,61	0,88	4,65
SOMALOY K0.3 (I)	0,61	0,85	4,62
SOMALOY K0.3 (II)	0,68	0,86	4,8
SOMALOY K0.5 (I)	0,61	0,89	4,95
SOMALOY K0.5 (II)	0,67	0,86	4,71
SOMALOY K0.8 (I)	0,65	0,87	4,96
SOMALOY K0.8 (II)	0,66	0,89	4,55
SOMALOY SSK (I)	0,74	0,9	4,87
SOMALOY SSK (II)	0,6	0,94	5,04

Tabella 3- Misure resistenze a primario e secondario e spessori dei toroidi Somaloy

PROVINI SOMALOY	Dint [mm]	Dext (mm)	PESO (g)
SOMALOY K0 (I)	29,95	40,1	20,17
SOMALOY K0 (II)	29,97	40,11	18,56
SOMALOY K0.3 (I)	29,96	40,14	18,36
SOMALOY K0.3 (II)	30,03	40,13	18,89
SOMALOY K0.5 (I)	29,92	40,06	19,6
SOMALOY K0.5 (II)	30	40,15	18,65
SOMALOY K0.8 (I)	29,94	40,11	19,63
SOMALOY K0.8 (II)	29,94	40,08	18,11
SOMALOY SSK (I)	29,96	40,03	18,51
SOMALOY SSK (II)	29,96	40,09	19,38

Tabella 4 - Misure dei diametri esterni e interni e pesi dei toroidi Somaloy

Nella Tabella 3 e Tabella 4 sono stati riportati i valori delle resistenze a primario e secondario, necessarie per capire la bontà del processo di avvolgimento. Sono stati inoltre inseriti i valori geometrici (diametri e spessori) e i pesi dei campioni toroidali.



Nella seguente tabella si riportano invece i valori di massima permeabilità magnetica a 1 Hz, cifre di perdita a 50 Hz e induttanza massima a 5000 A/m alla frequenza di 50 Hz:

PROVINO SOMALOY	CIFRA DI PERDITA A 1T e 50Hz (W/kg)	μ_{max} 1Hz	Bmax @ 5000 A/m (50Hz) (T)
SOMALOY SSK (I)	20,44	205,16	0,69
SOMALOY SSK (II)	23,29	203,38	0,71
SOMALOY K0 (I)	7,47	420,88	1,18
SOMALOY K0 (II)	5,70	466,23	1,27
SOMALOY K0.3 (I)	6,15	420,03	1,22
SOMALOY K0.3 (II)	6,38	439,32	1,21
SOMALOY K0.5 (I)	7,06	390,40	1,16
SOMALOY K0.5 (II)	6,91	386,51	1,16
SOMALOY K0.8 (I)	7,66	385,11	1,11
SOMALOY K0.8 (II)	7,75	397,18	1,13

Tabella 5- Risultati caratterizzazione magnetica

Dalla Tabella 5 è possibile notare che: ad eccezione dei campioni SSK(I), SSK(II) e K0(I), i risultati sono conformi con quanto ci si aspettava. Infatti per valori di resina termoindurente kenolube crescenti si ottengono cifre di perdita più elevate e permeabilità massime e induzioni massime più basse. Si riportano per una più chiara visualizzazione i relativi istogrammi escludendo i campioni evidenziati in rosso:

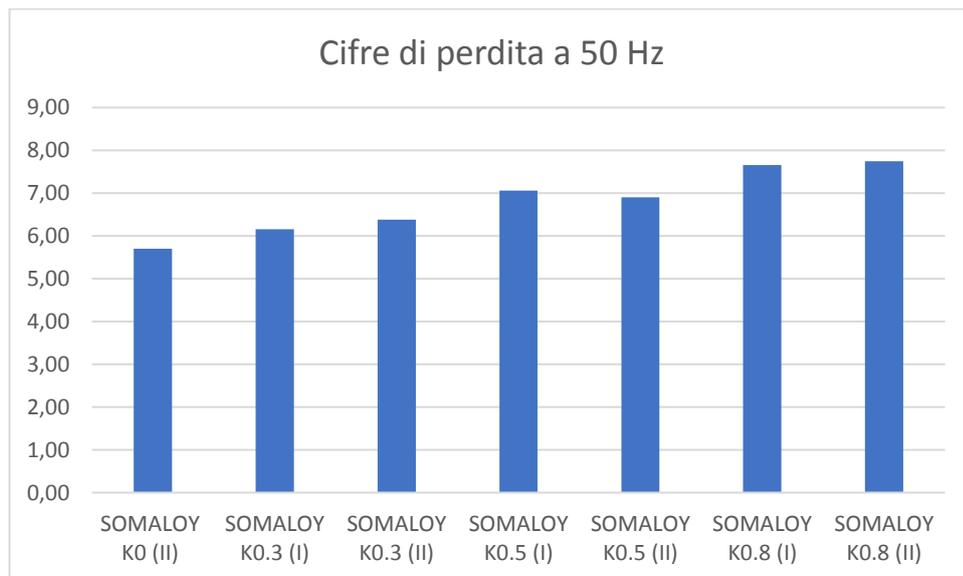


GRAFICO 2 - Cifre di perdita a 50 Hz

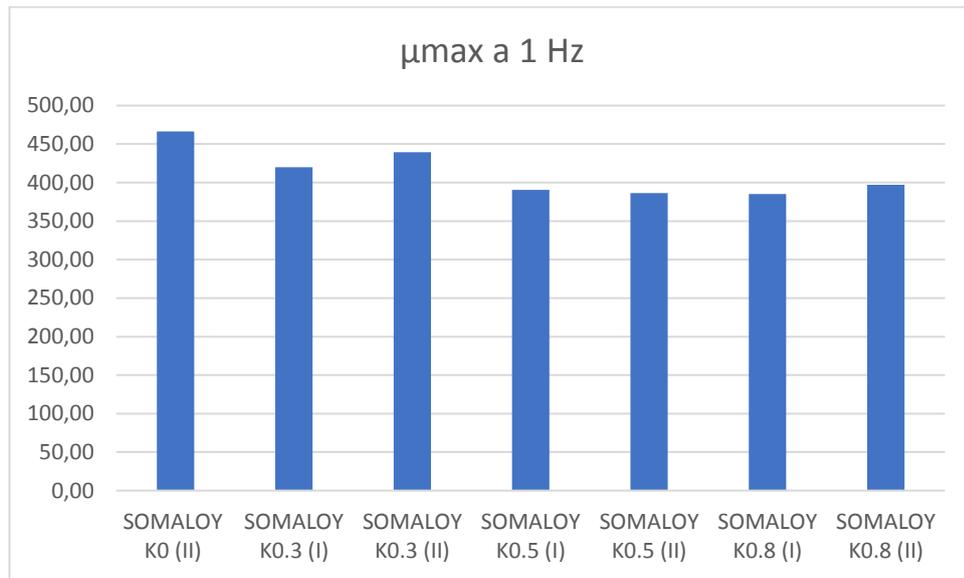


GRAFICO 3 - Permeabilità magnetiche massime a 1 Hz

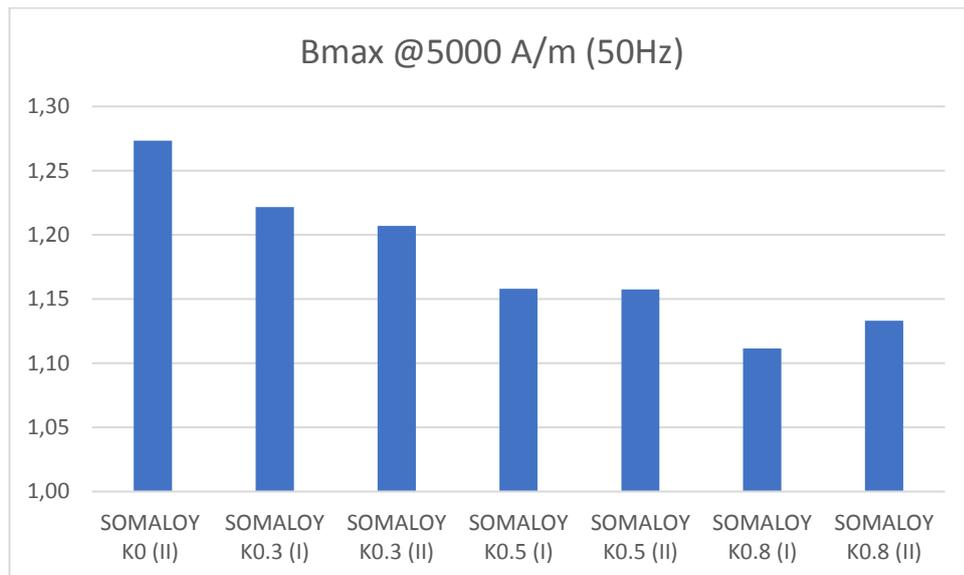


GRAFICO 4 - Induzione massime a 5000A/m (f=50Hz)

Si osservi che il valore di cifra di perdita del campione Somaloy K0 (II), rappresentativo proprio della polvere in commercio, è leggermente più alto del valore indicato nei cataloghi del prodotto, i quali indicano i seguenti valori facilmente reperibili in rete:

- cifra di perdita a 50 Hz misurate: 5,03 W/kg
- cifra di perdita da catalogo a 1T e 50Hz: 5 W/kg



Invece per quanto riguarda i campioni evidenziati in rosso: il campione K0(I) ha dato dei pessimi risultati, non individuabili dai dati relativi alla pressione di lavoro, ma probabilmente dovuti a danneggiamento meccanico del provino al di fuori dei normali processi svolti. Il provino è stato comunque riavvolto nuovamente e ha prodotto gli stessi risultati. Ad ogni modo non è un campione rappresentativo e per questo è stato scartato. Per quanto riguarda invece i campioni SSK(I) e SSK(II), questi hanno portato a dei risultati notevolmente diversi rispetto a quanto ci si aspettava. Le motivazioni sono legate a un errore nel trattamento termico condotto. Infatti, a differenza degli altri campioni analizzati, in questo caso il processo di preparazione è stato diverso, ovvero si sono seguite le seguenti fasi:

- preparazione della polvere Somaloy (la polvere commerciale contiene già una percentuale di kenolube) disposta in un contenitore metallico



Figura 34 - Polvere Somaloy in contenitore metallico

- Ciclo termico nel forno con:
 - rampa fino a 550°C di 2 ore
 - isoterma a 550°C di 30 minuti
- pressatura delle polveri
- ciclo termico di Curie
 - rampa fino a 500°C di 30 minuti
 - isoterma a 500°C di 30 minuti

Il raffreddamento avviene sempre in modo naturale.

Nella Figura 35 è possibile vedere la polvere ed estratta dal forno, la quale si presenta in forma più compatta. Con il ciclo termico il kenolube presente dovrebbe essere stato completamente eliminato. Ma come si può vedere dalle immagini il processo di miscelatura manuale e automatica (utilizzando sfere di acciaio), necessario per procedere con la nuova compattazione in pressa, ha prodotto un colore rossastro. Quindi il motivo dei risultati fortemente diversi dalle aspettative sono da imputare al ciclo termico utilizzato e in particolare alla rampa iniziale.



Figura 35- Polvere somaloy estratta dal forno



Figura 36- Preparazione delle polveri da miscelare con sfere di acciaio



Avendo ottenuto questi risultati si è deciso di utilizzare un nuovo ciclo termico con una rampa meno ripida:

- Ciclo termico con
 - rampa fino a 550°C per 4 ore
 - isoterma di 550°C per 30 minuti

Sono quindi fatti altri due toroidi, indicati con le sigle SSKT2(I) e SSKT2(II), dove la lettera “T” indica il secondo trattamento termico utilizzato. Con questo trattamento sono stati ottenuti i seguenti risultati:

CAMPIONI SOMALOY	Peso (g)	Altezza (mm)	Pressioni massime (bar)	Densità (g/cm ³)
SSKT2 (I)	42,287	4,65	152,75	7,24
SSKT2 (I)	41,266	4,56	152,04	7,20

Tabella 6- Dati campioni Somaloy senza kenolube

PROVINO SOMALOY	R PRIMARIO (Ω)	R SECONDARIO (Ω)	Spessore (mm)
SSKT2 (I)	0,7	0,87	4,75
SSKT2 (II)	0,63	0,87	4,66

Tabella 7- Resistenza a primario e secondario e spessore

PROVINO SOMALOY	Dint (mm)	Dext (mm)	Peso (g)
SSKT2 (I)	29,94	40,09	18,4
SSKT2 (II)	29,87	40,09	17,94

Tabella 8 - Diametri interno, esterno e peso dei toroidi Somaloy senza kenolube



PROVINO SOMALOY	CIFRA DI PERDITA A 50Hz (W/kg)	$\mu_{\max} 1\text{Hz}$	Bmax @ 5000 A/m (50Hz)
SSKT2 (I)	15,17	415,94	0,975
SSKT2 (II)	13,51	374,63	0,927

Tabella 9- Risultati della caratterizzazione magnetica dei toroidi Somaloy senza kenolube

I risultati hanno portato a dei valori di cifra di perdita più bassi, delle permeabilità magnetiche più alte e delle induzioni più alte rispetto ai campioni SSK(I) e SSK(II). Inoltre, come si potrà vedere nel GRAFICO 33 e GRAFICO 37 al prossimo paragrafo, le perdite per correnti parassite sono molto più alte e questa evidenza come il trattamento termico sia di importanza fondamentale per l'ottenimento di buone proprietà sia magnetiche che meccaniche. Quindi sicuramente la strada seguita è quella giusta, ma bisognerà valutare meglio in futuro i parametri da adottare nel ciclo termico. Analisi ulteriori su questo problema non verranno condotte in questo lavoro di tesi.

4.3.3. Grafici ottenuti con le prove di caratterizzazione magnetica

In questo paragrafo vengono riportati i grafici ottenuti con la caratterizzazione magnetica per ogni provino. Vengono quindi riportati i grafici relativi a:

- Perdite nel ferro in funzione della frequenza e separazione delle perdite in:
 - Perdite per correnti parassite
 - Perdite per isteresi magnetica
 - Perdite per potenza eccedente (o perdite addizionali)

L'andamento in funzione della frequenza delle perdite totali, corrispondenti ad un valore di induzione di 1T, viene interpolato mediante una curva con tre valori indicati con le seguenti lettere: A_1 , A_2 , A_3 e questi valori saranno di interesse nel dimensionamento dello statore, come si vedrà in seguito.

$$P_{sp_{tot}}(f) = A_1 f^2 + A_2^{1.5} f + A_3^2$$

- Grafico di confronto tra le perdite nel ferro misurate e calcolate con la curva a tre parametri
- Andamento della permeabilità magnetica μ in funzione del campo magnetico H alla frequenza di 50 Hz
- Caratteristiche di normale magnetizzazione (B-H) a 50 Hz



Campione Somaloy-kenolube K0(II)

B (T)	A ₁	A ₂ ^{1,5}	A ₃ ²
1	0,09592	0,0022	9,06E-05

Tabella 10 - Parametri per la curva delle perdite nel ferro

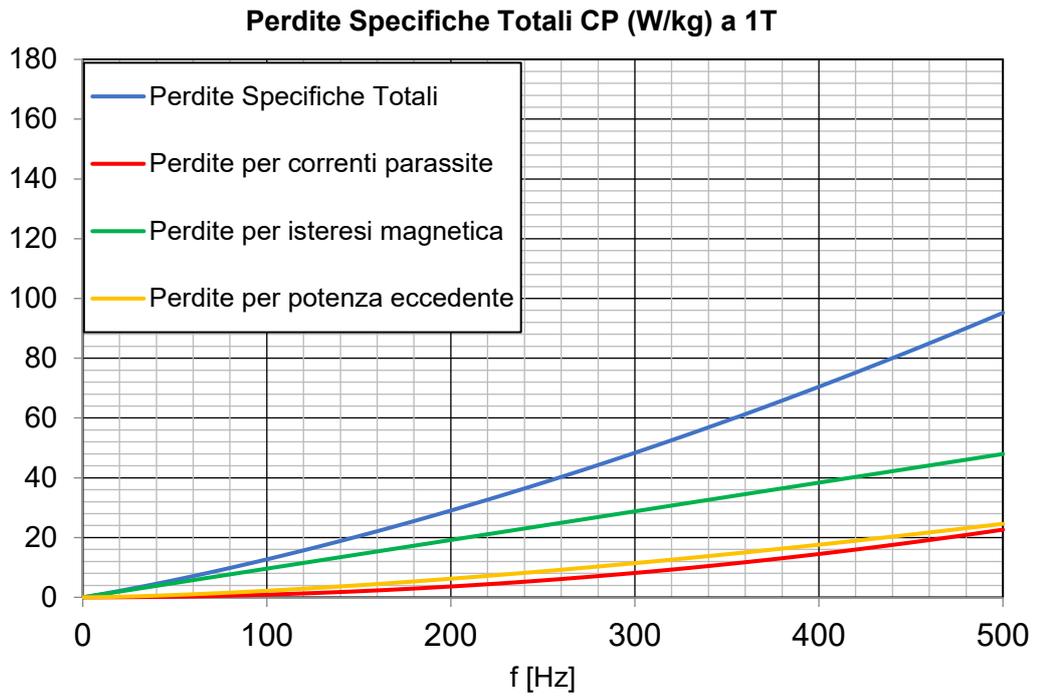


GRAFICO 5 - Perdite specifiche totali Somaloy K0(II)

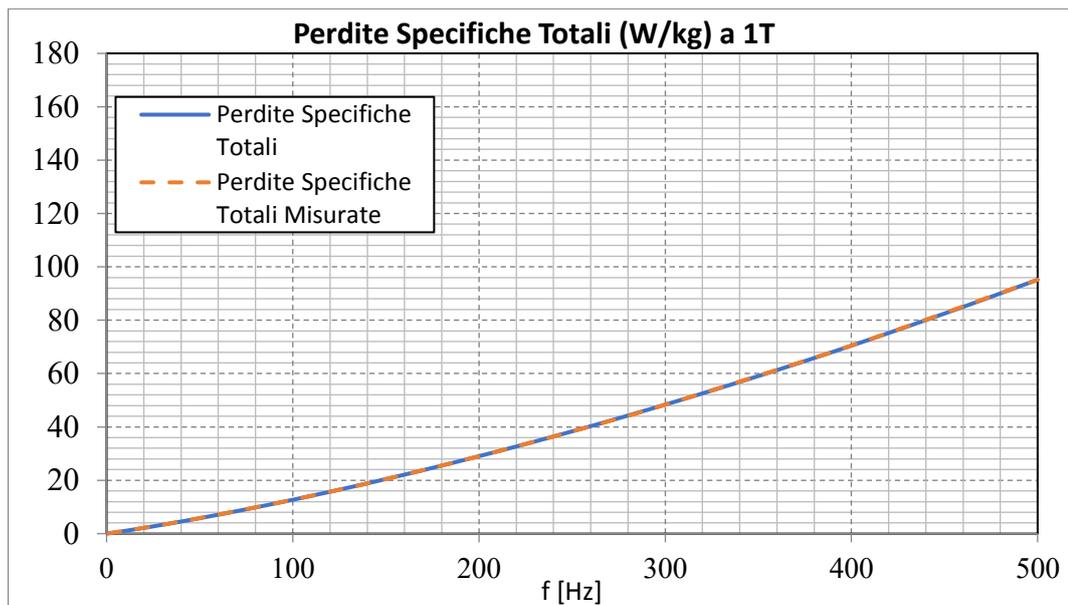


GRAFICO 6 - Perdite specifiche Somaloy K0(II), misurate e calcolate con parametri

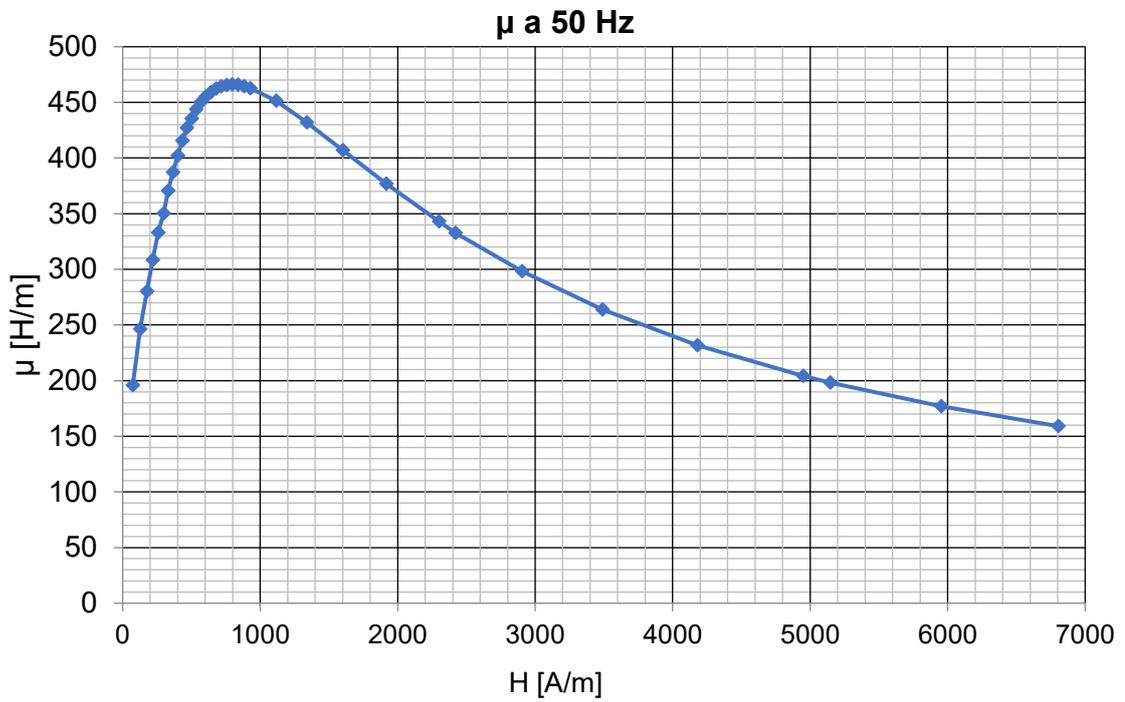


GRAFICO 7- Permeabilità magnetica relativa in funzione di H

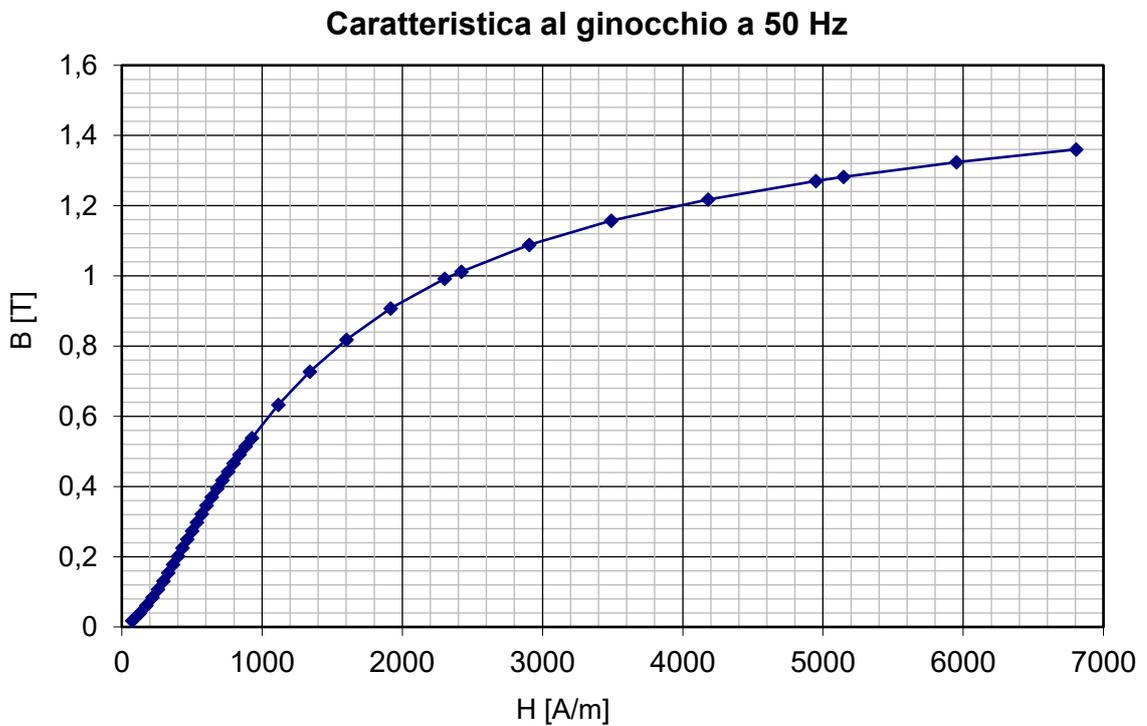


GRAFICO 8 - Caratteristica di normale magnetizzazione



Campione Somaloy-kenolube K0.3(I)

B (T)	A ₁	A ₂ ^{1,5}	A ₃ ²
1	0,10037	0,00237	1,08E-04

Tabella 11- Parametri per la curva delle perdite nel ferro

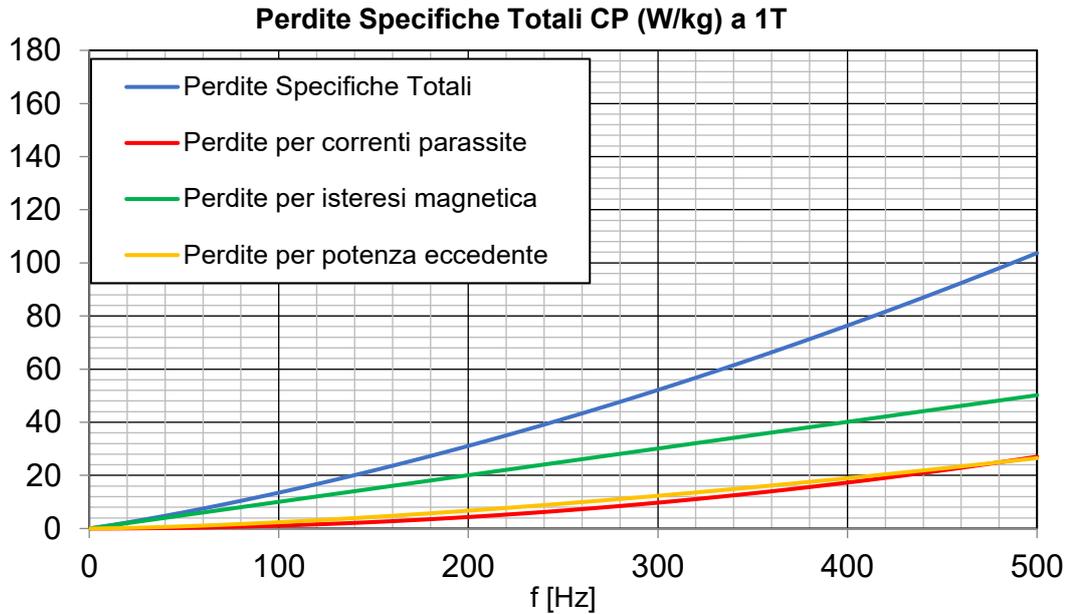


GRAFICO 9 - Perdite specifiche totali Somaloy K0.3(I)

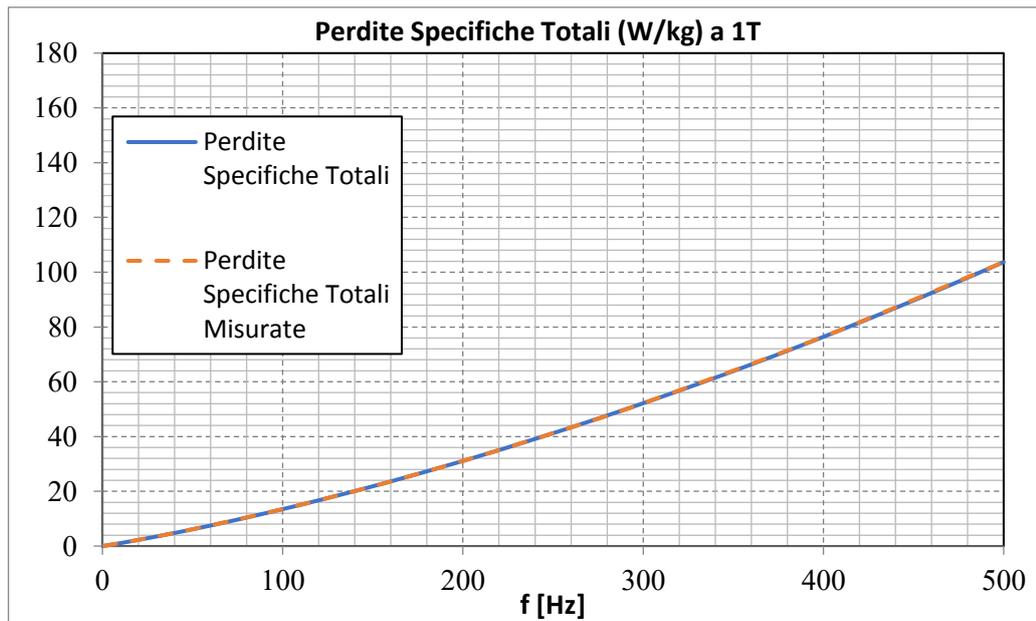


GRAFICO 10- Perdite specifiche Somaloy K0.3(I), misurate e calcolate con parametri

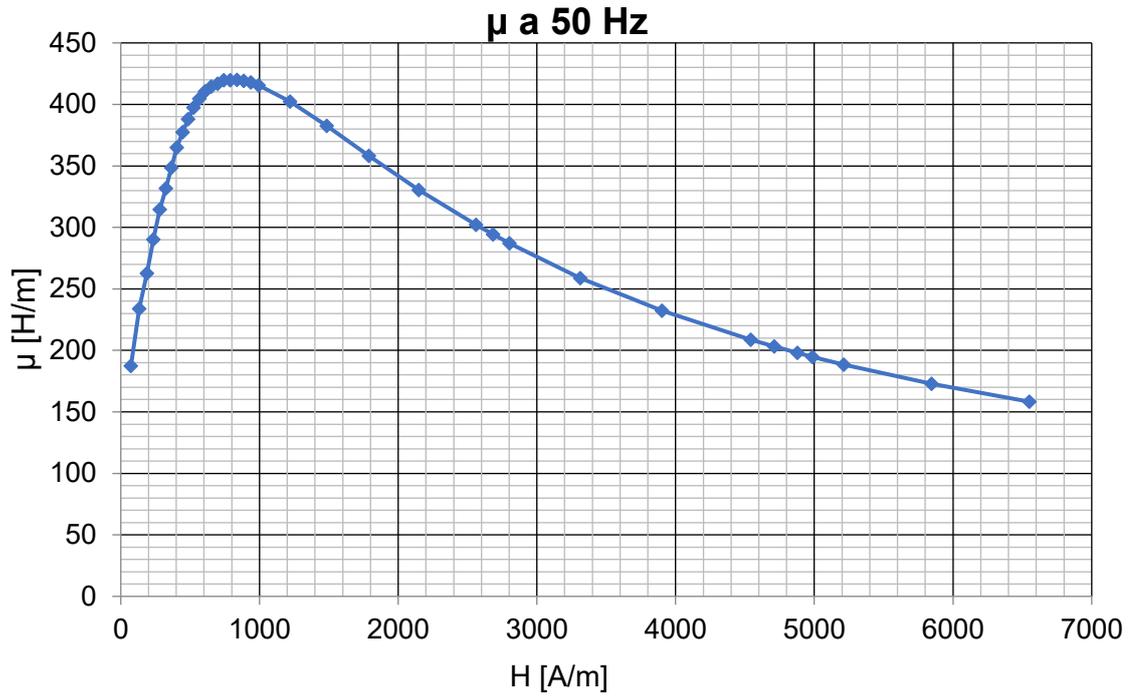


GRAFICO 11 - Permeabilità magnetica relativa in funzione di H

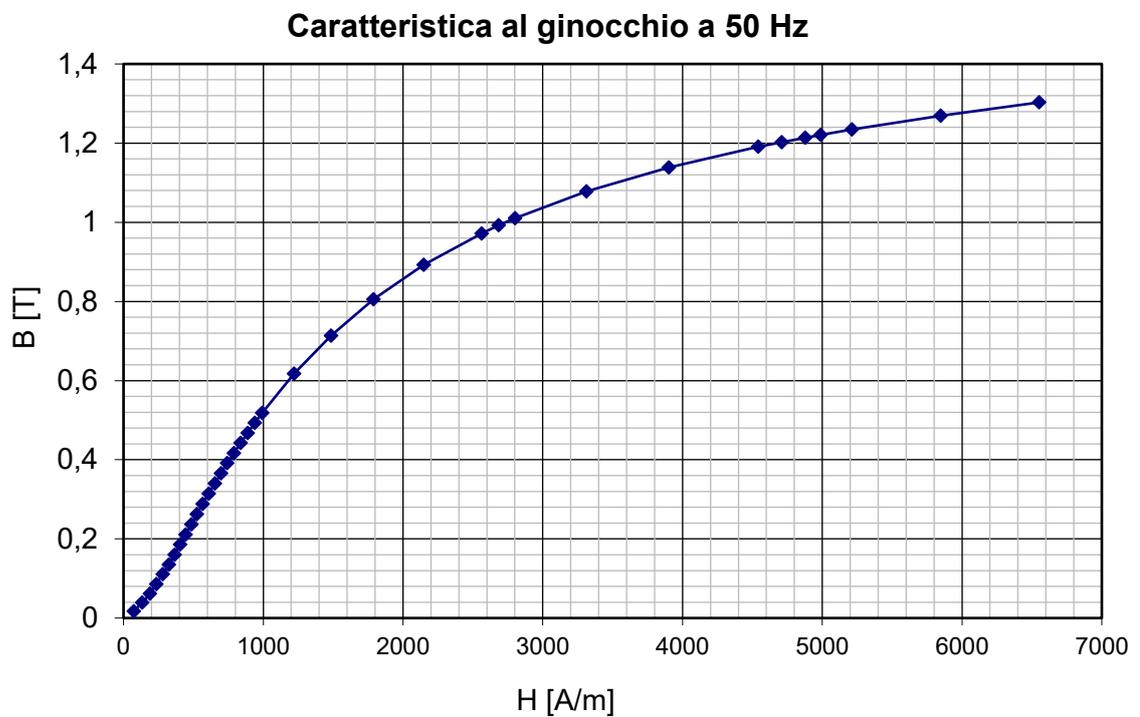


GRAFICO 12 - Caratteristica di normale magnetizzazione



Campione Somaloy-kenolube K0.3(II)

B (T)	A ₁	A ₂ ^{1,5}	A ₃ ²
1	0,10156	9,41E-05	2,83E-03

Tabella 12 - Parametri per la curva delle perdite nel ferro

Perdite Specifiche Totali CP (W/kg) a 1T

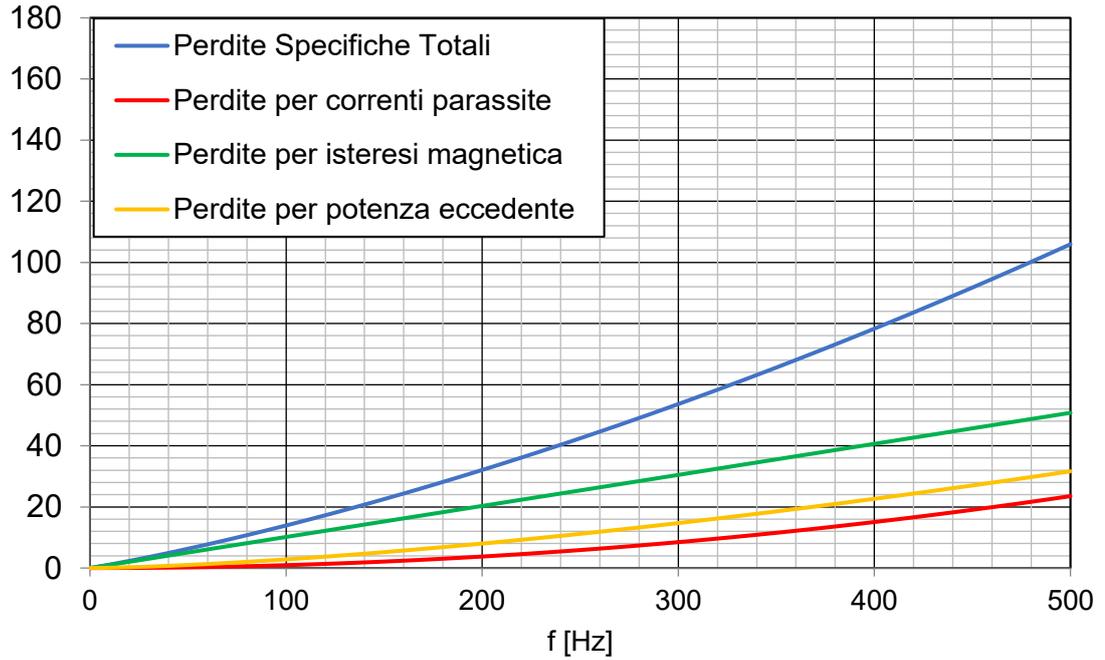


GRAFICO 13 - Perdite specifiche totali Somaloy K0.3(II)

Perdite Specifiche Totali a 1T

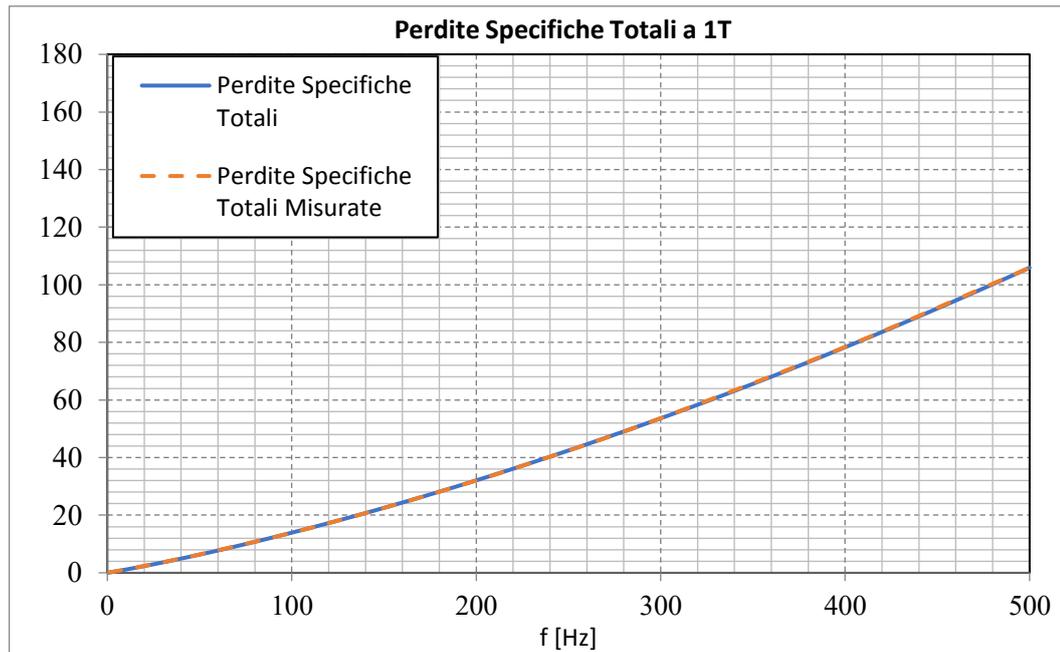


GRAFICO 14 - Perdite specifiche Somaloy K0.3(II), misurate e calcolate con parametri

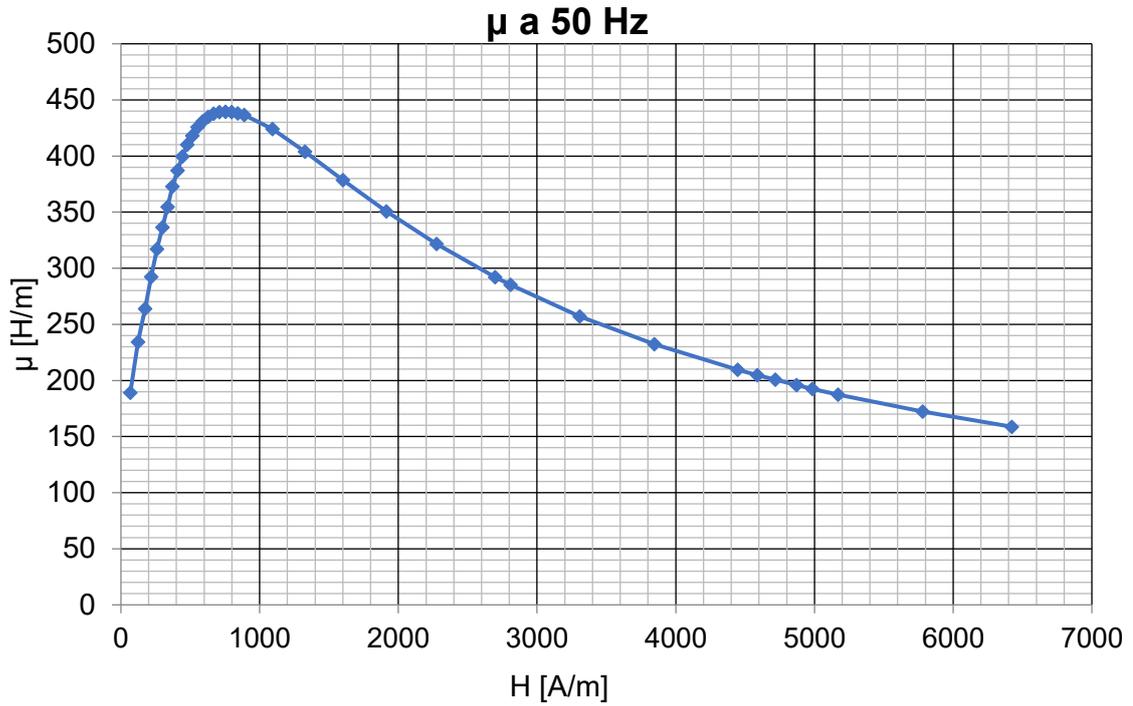


GRAFICO 15 - Permeabilità magnetica relativa in funzione di H

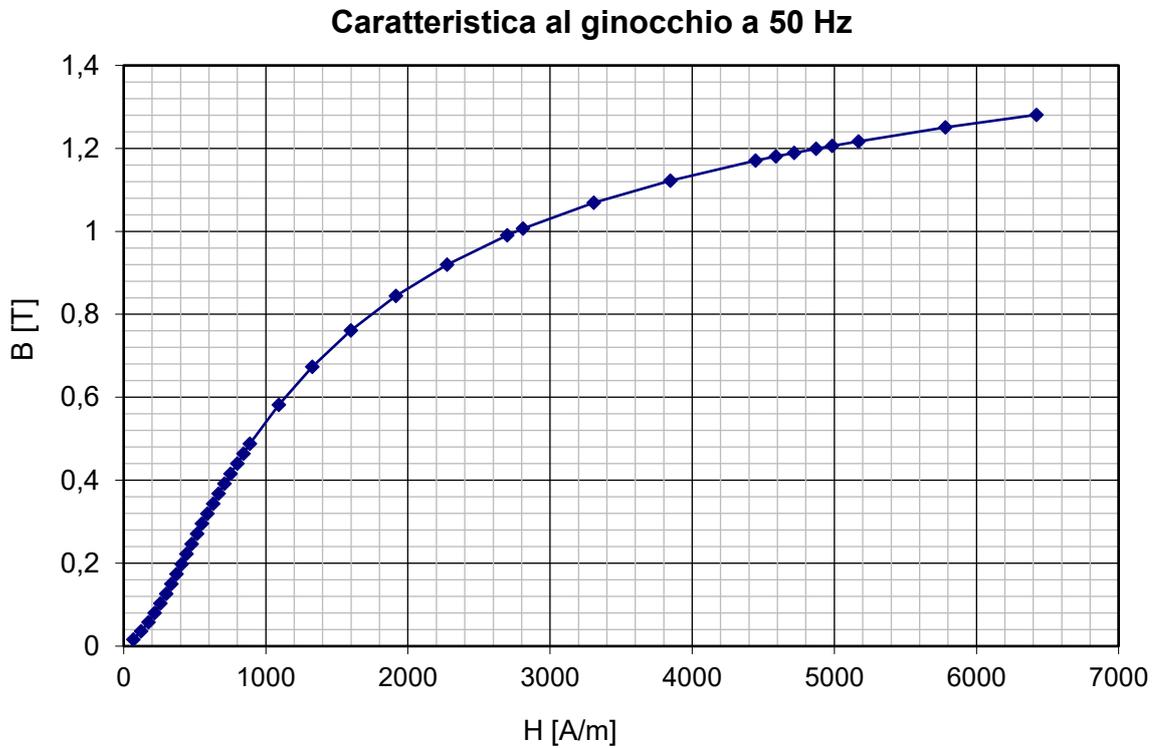


GRAFICO 16 - Caratteristica di normale magnetizzazione



Campione Somaloy-kenolube K0.5(I)

B (T)	A ₁	A ₂ ^{1,5}	A ₃ ²
1	0,11197	0,00324	1,04E-04

Tabella 13 - Parametri per la curva delle perdite nel ferro

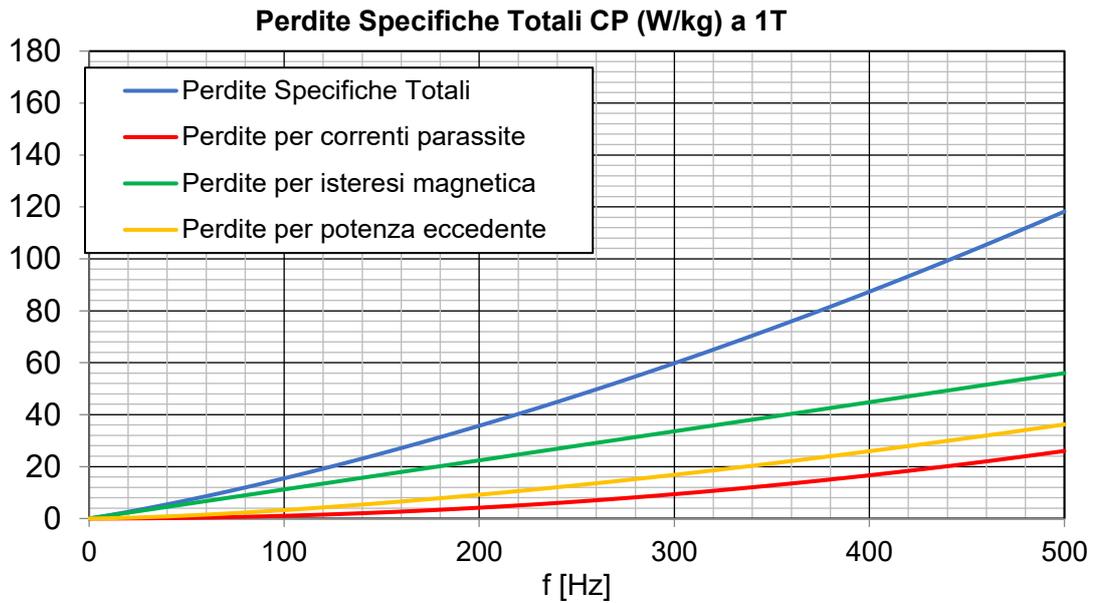


GRAFICO 17 - Perdite specifiche totali Somaloy K0.5(I)

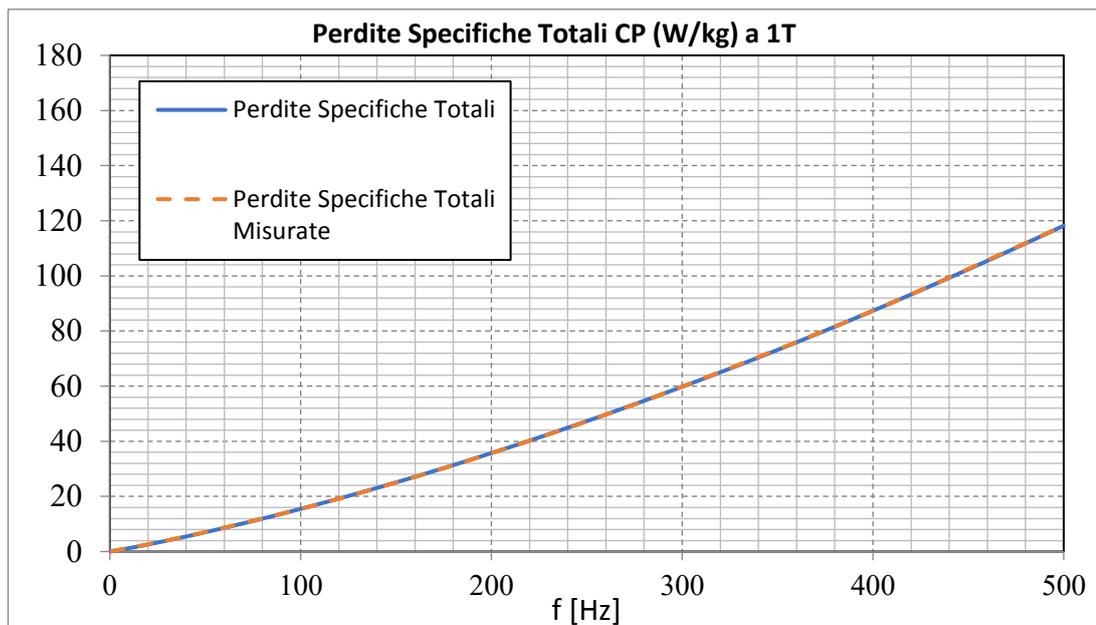


GRAFICO 18 - Perdite specifiche Somaloy K0.5(I), misurate e calcolate con parametri

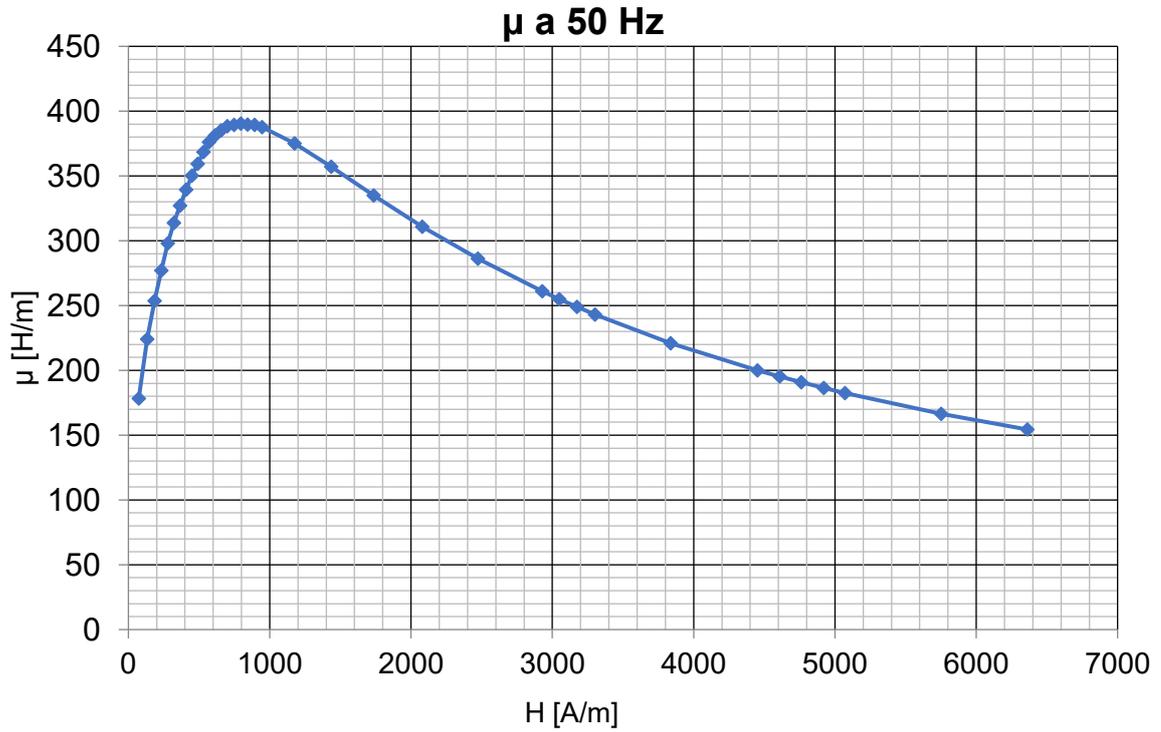


GRAFICO 19 - Permeabilità magnetica relativa in funzione di H

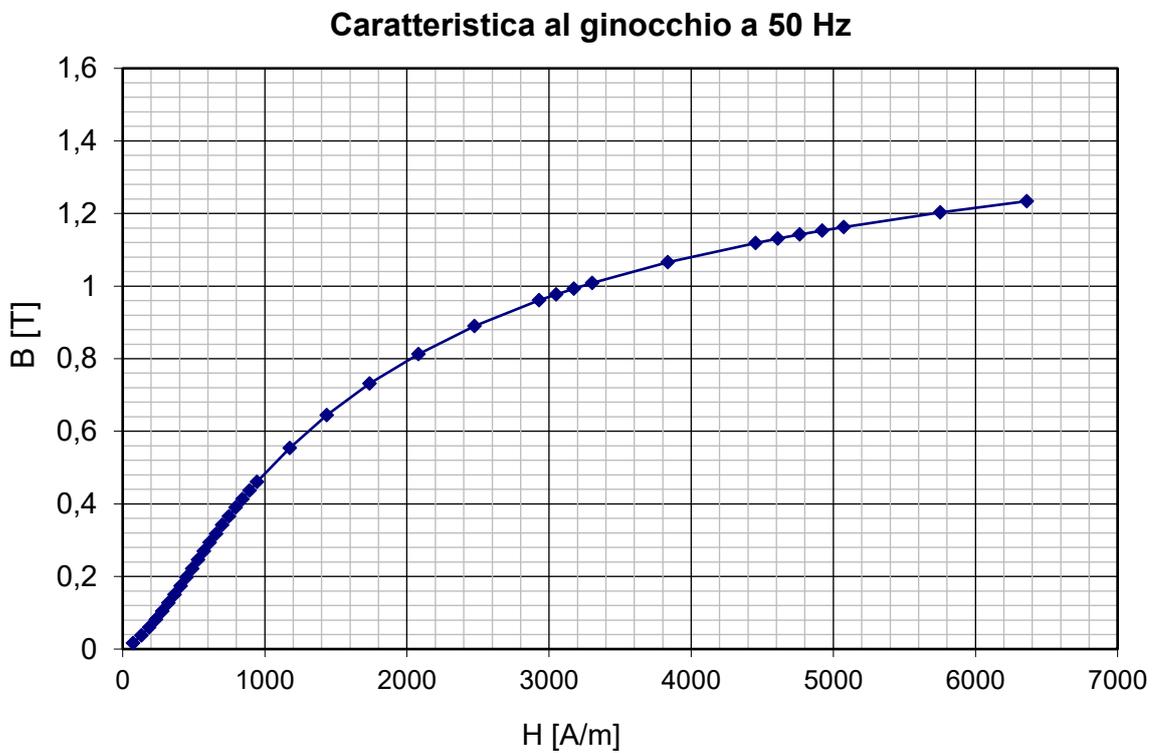


GRAFICO 20 - Caratteristica di normale magnetizzazione



Campione Somaloy-kenolube K0.5(II)

B (T)	A ₁	A ₂ ^{1,5}	A ₃ ²
1	0,11034	8,89E-05	0,00318

Tabella 14 - Parametri per la curva delle perdite nel ferro

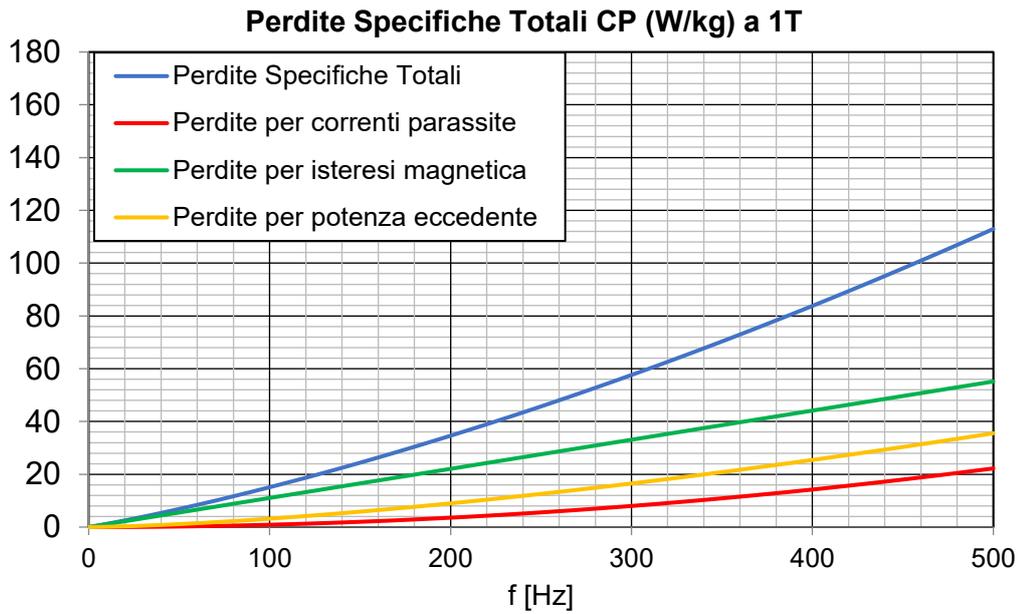


GRAFICO 21 - Perdite specifiche totali Somaloy K0.5(II)

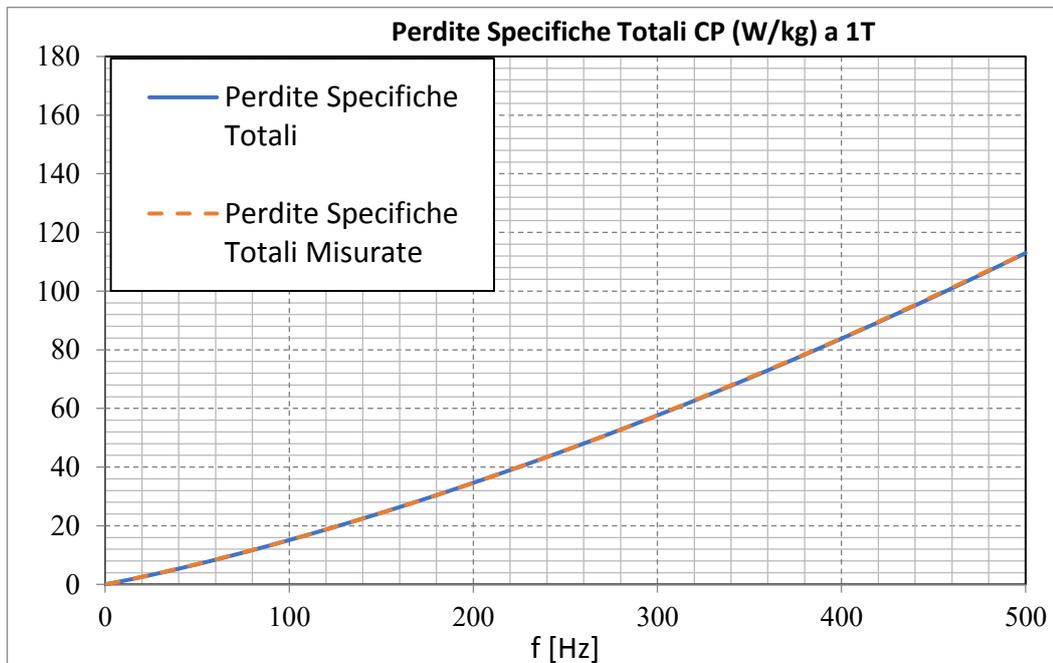


GRAFICO 22 - Perdite specifiche Somaloy K0.5(II), misurate e calcolate con parametri

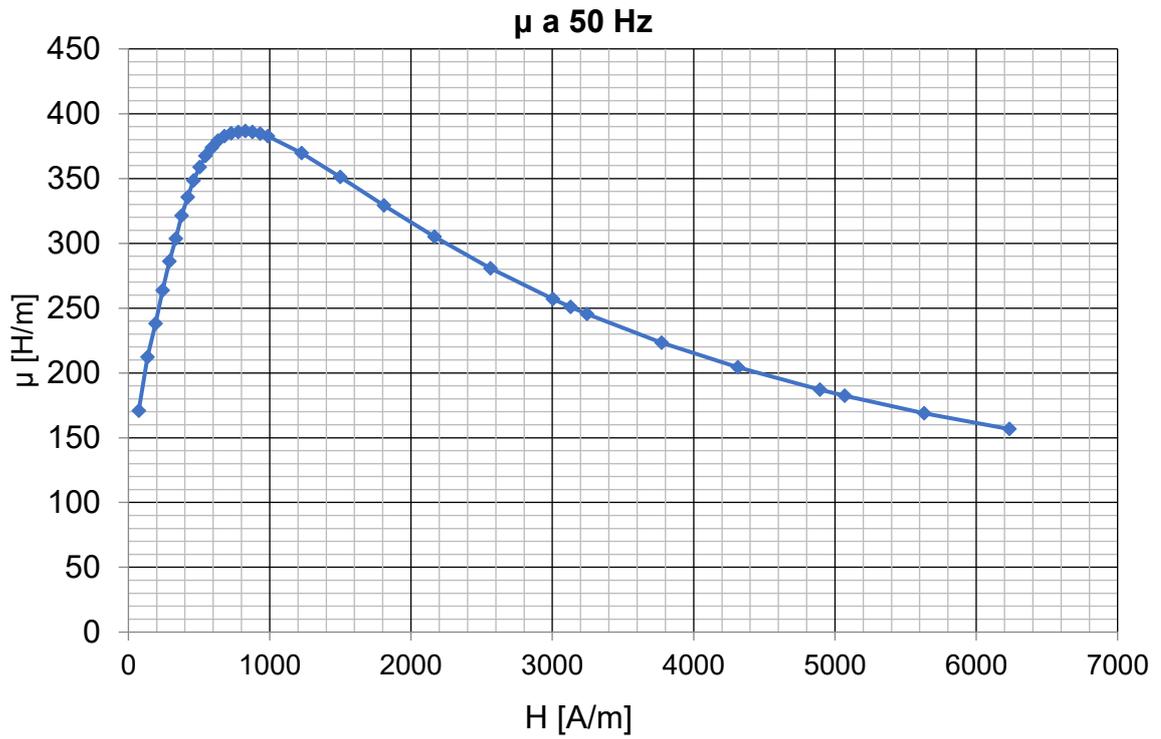


GRAFICO 23 - Permeabilità magnetica relativa in funzione di H

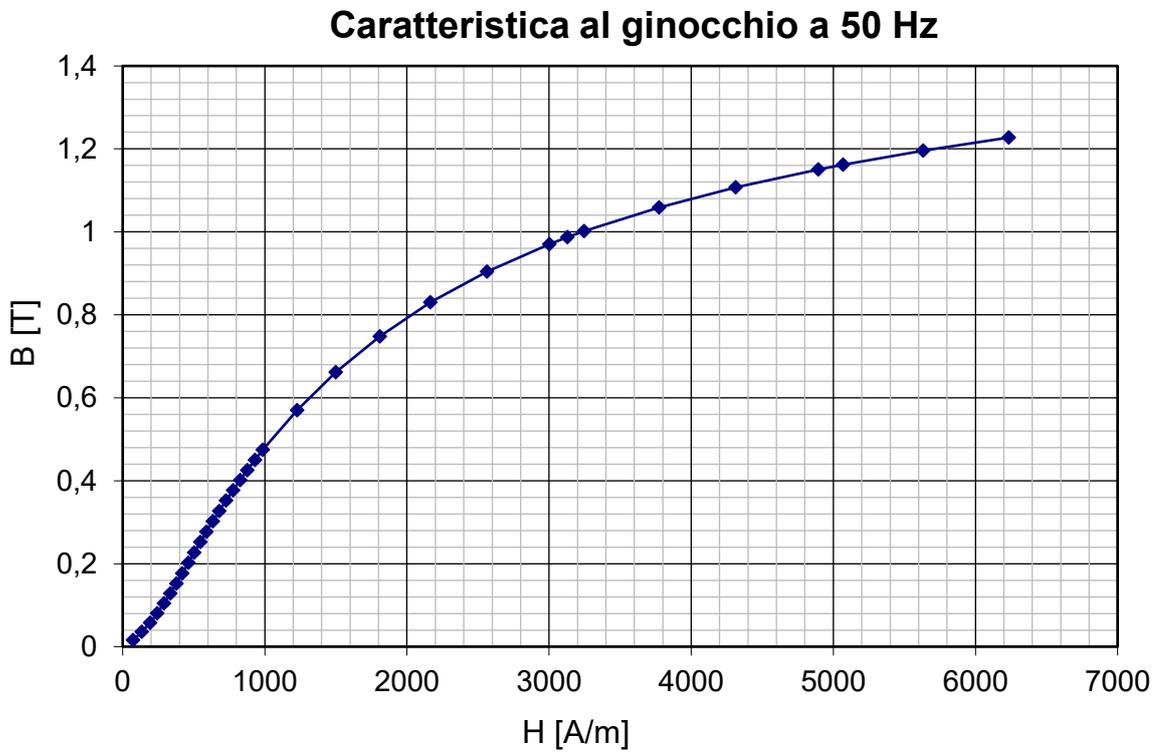


GRAFICO 24 - Caratteristica di normale magnetizzazione



Campione Somaloy-kenolube K0.8(I)

B (T)	A ₁	A ₂ ^{1,5}	A ₃ ²
1	0,11961	1,14E-04	0,00373

Tabella 15 - Parametri per la curva delle perdite nel ferro

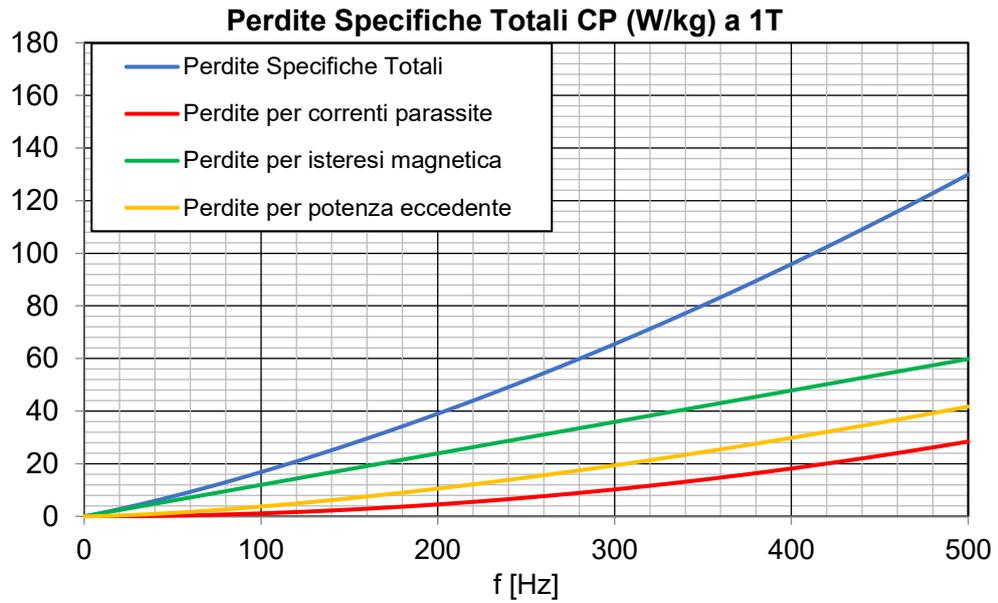


GRAFICO 25 - Perdite specifiche totali Somaloy K0.8(I)

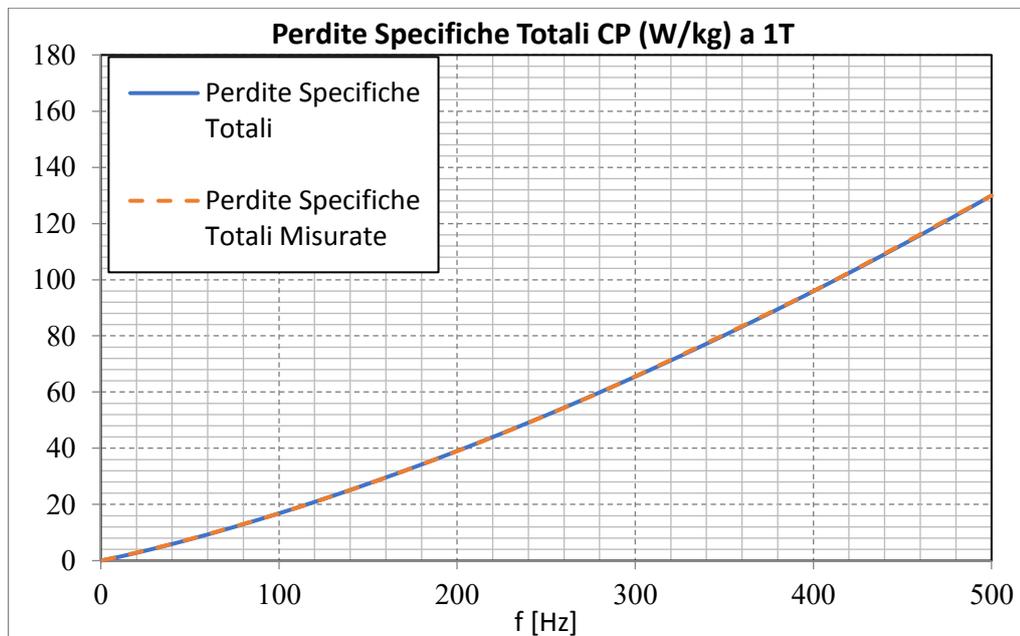


GRAFICO 26 - Perdite specifiche Somaloy K0.8(I), misurate e calcolate con parametri

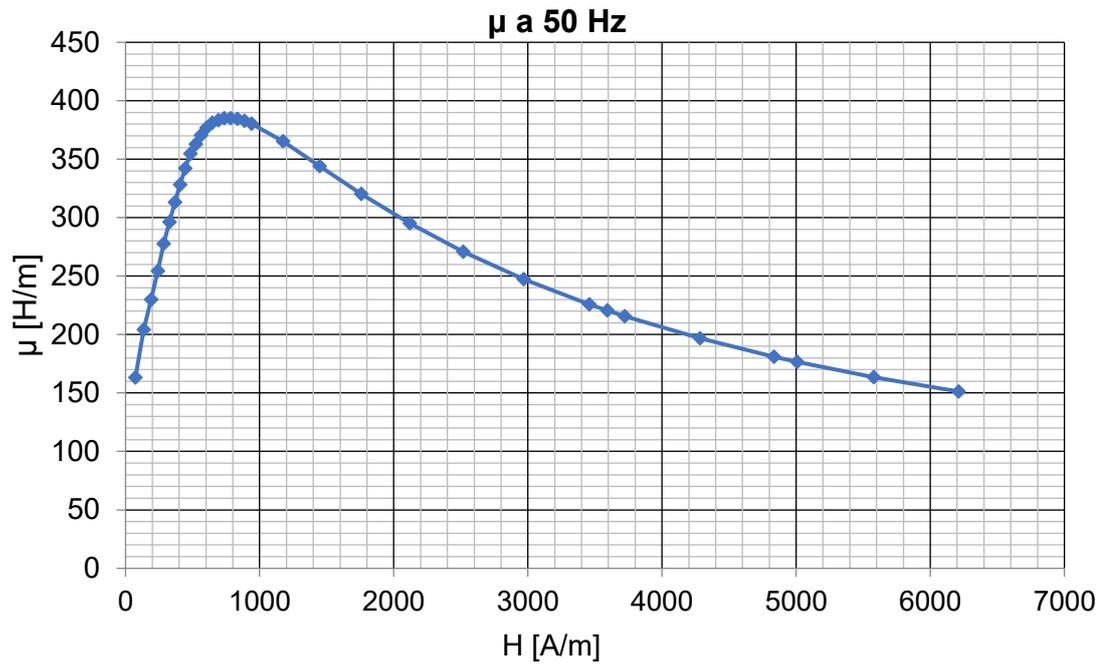


GRAFICO 27 - Permeabilità magnetica relativa in funzione di H

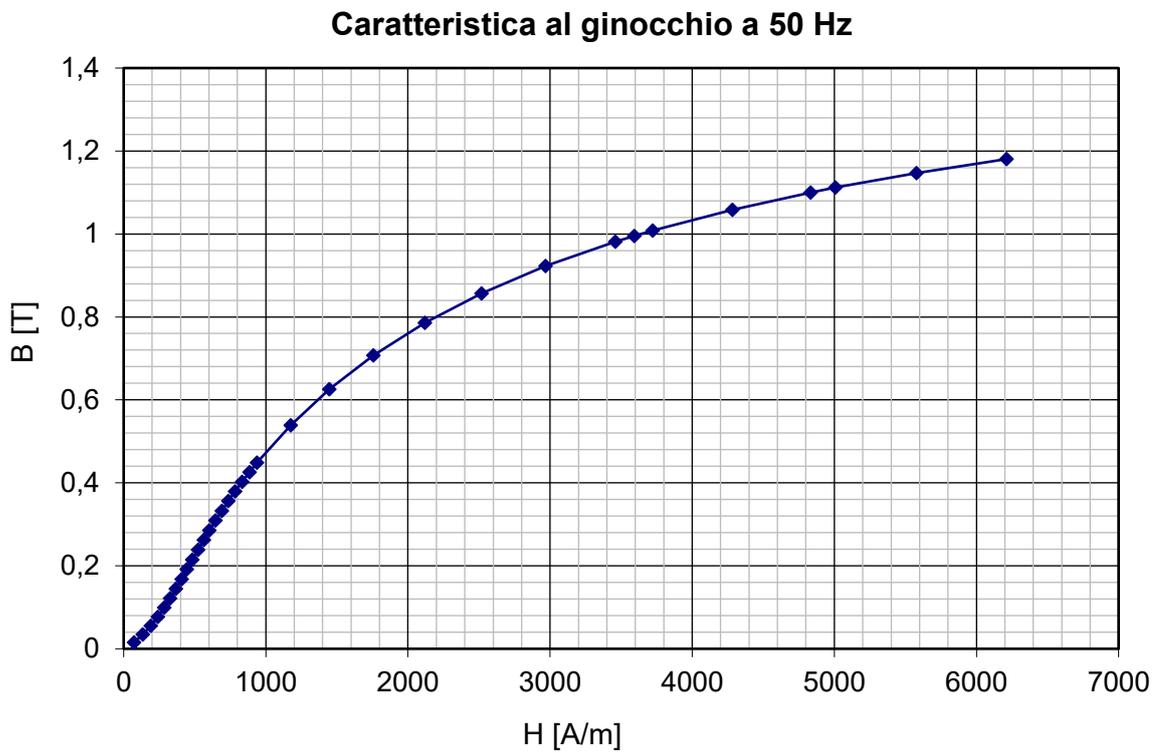


GRAFICO 28 - Caratteristica di normale magnetizzazione



Campione Somaloy-kenolube K0.8(II)

B (T)	A ₁	A ₂ ^{1,5}	A ₃ ²
1	0,12465	1,20E-04	0,00325

Tabella 16 - Parametri per la curva delle perdite nel ferro

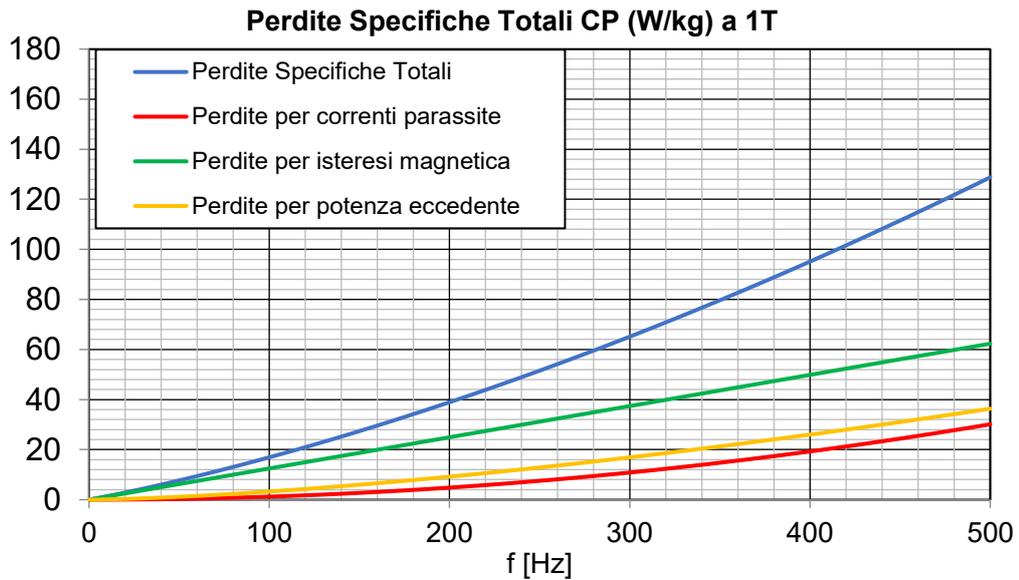


GRAFICO 29 - Perdite specifiche totali Somaloy K0.8(II)

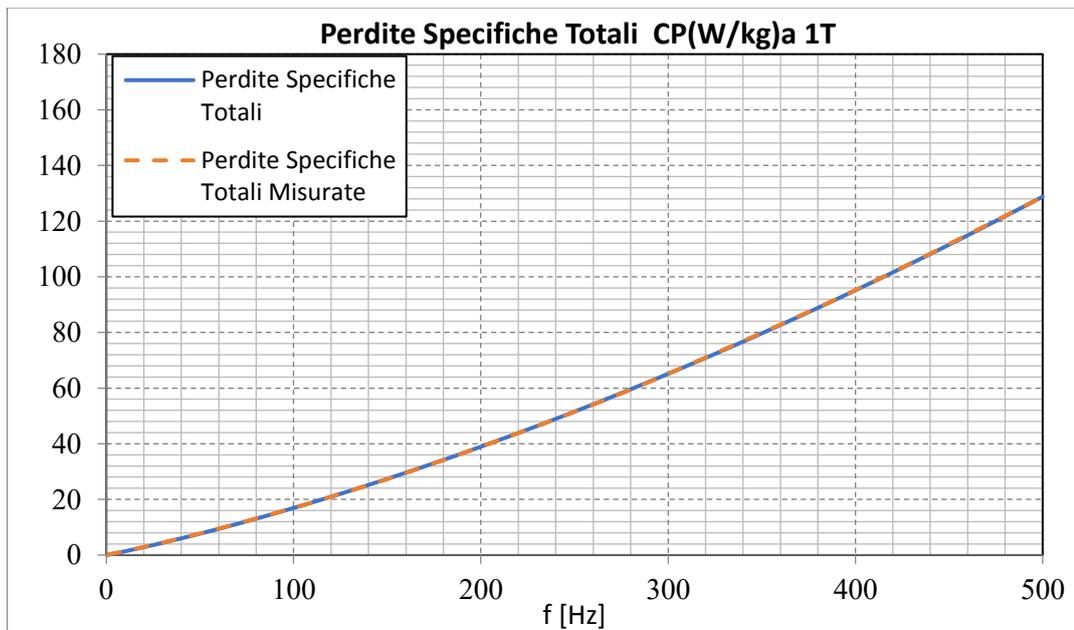


GRAFICO 30 - Perdite specifiche Somaloy K0.8(II), misurate e calcolate con parametri

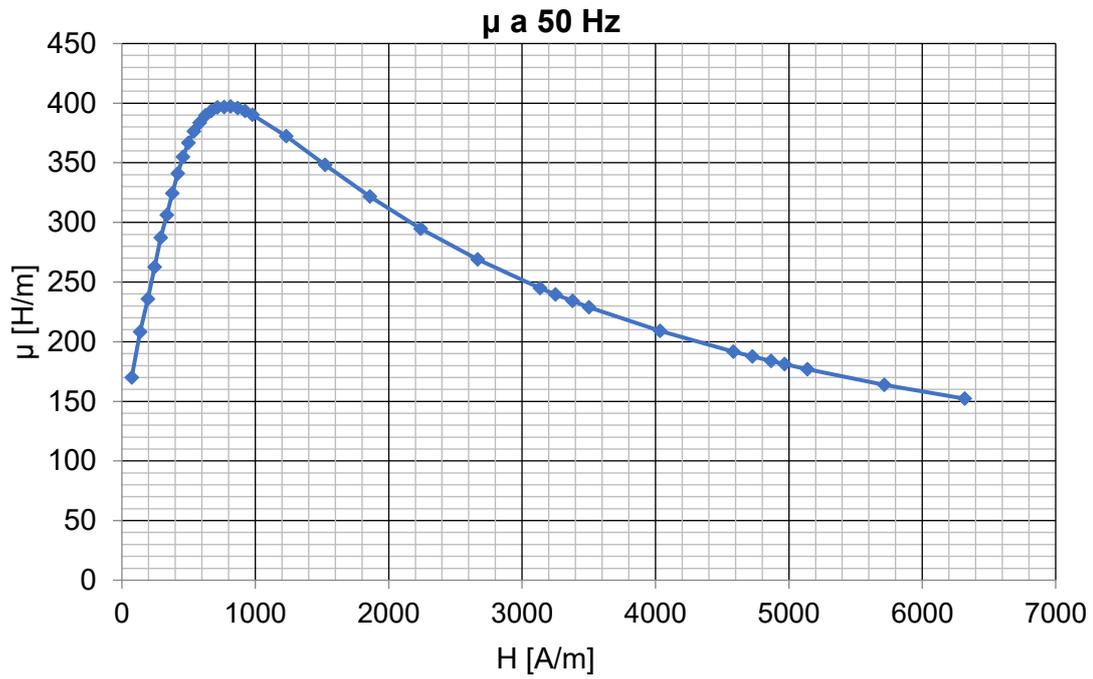


GRAFICO 31 - Permeabilità magnetica relativa in funzione di H

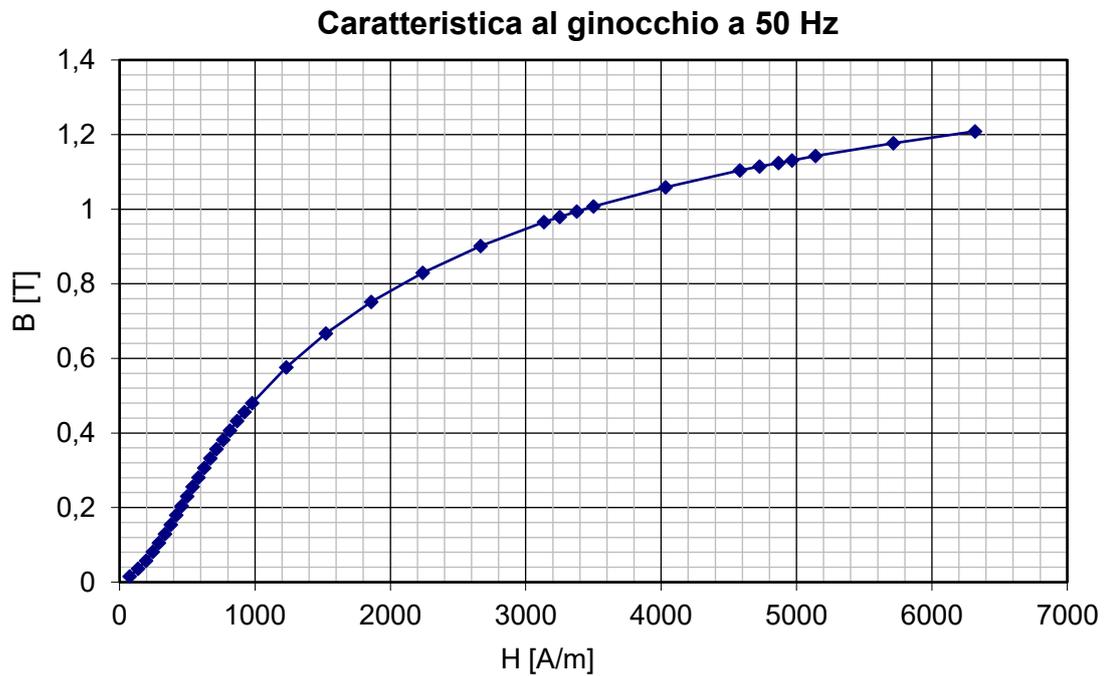


GRAFICO 32 - Caratteristica di normale magnetizzazione



Campione Somaloy-kenolube SSKT2(I)

B (T)	A ₁	A ₂ ^{1,5}	A ₃ ²
1	0,22119	9,49E-04	4,56E-04

Tabella 17 - Parametri per la curva delle perdite nel ferro

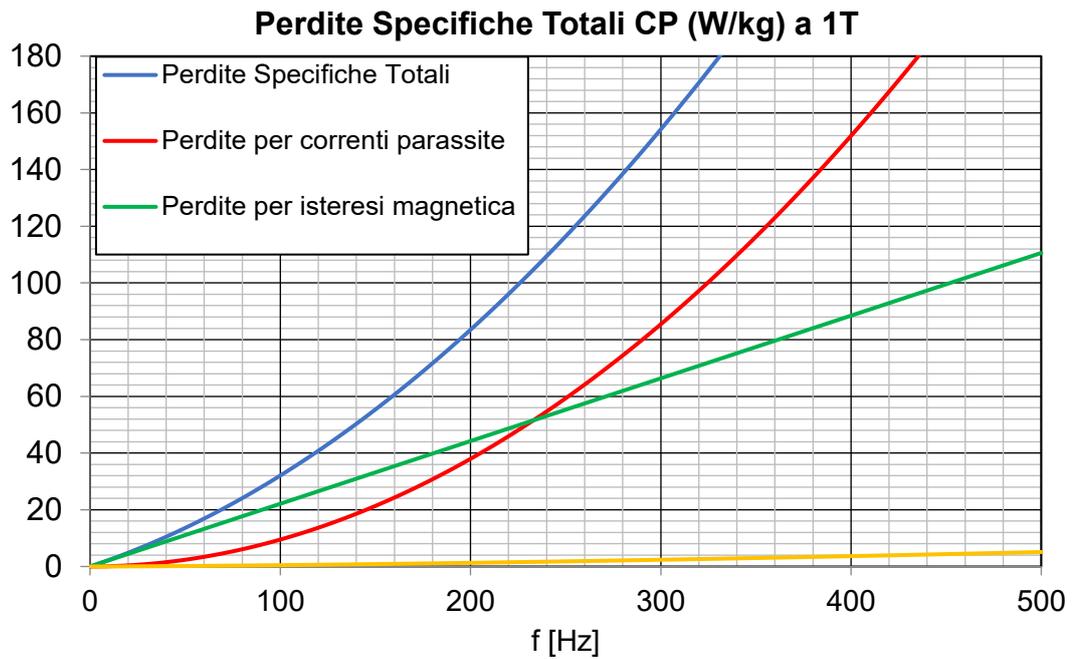


GRAFICO 33 - Perdite specifiche totali Somaloy SSKT2(I)

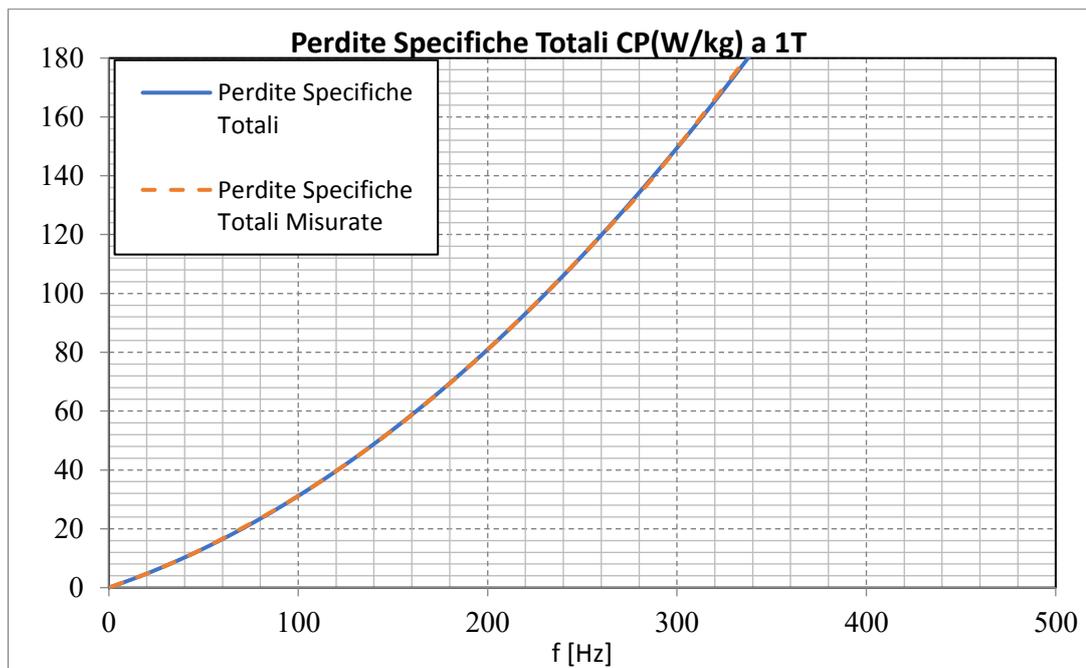


GRAFICO 34 - Perdite specifiche Somaloy SSKT2(I), misurate e calcolate con parametri

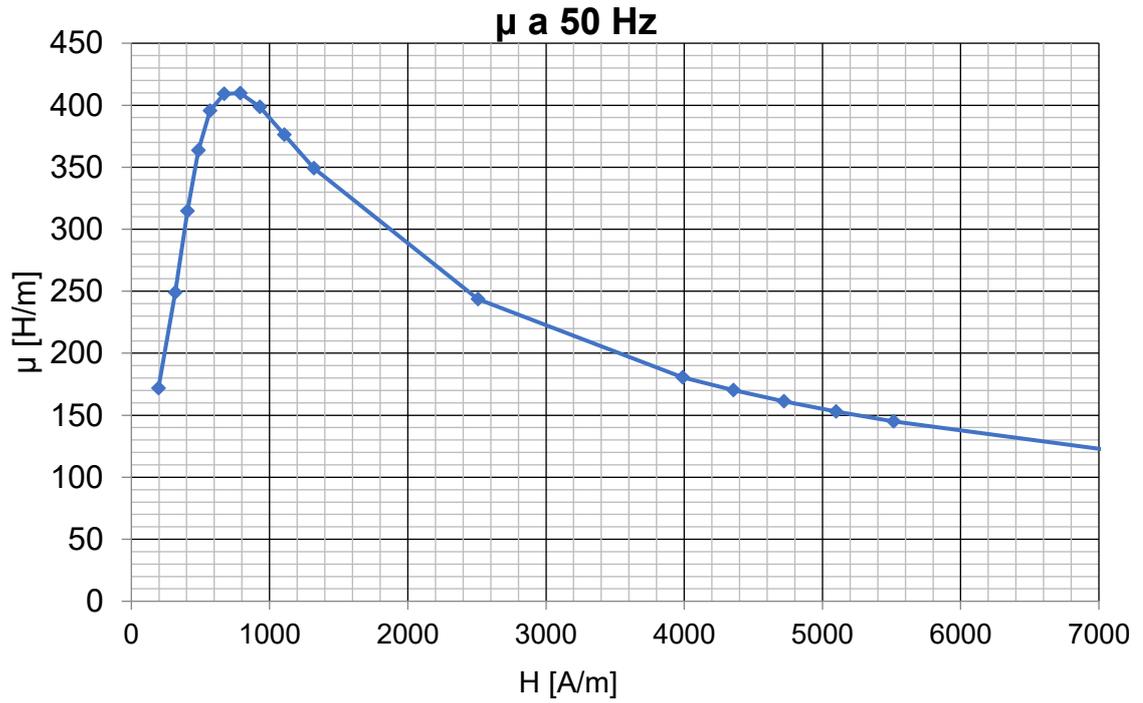


GRAFICO 35 - Permeabilità magnetica relativa in funzione di H

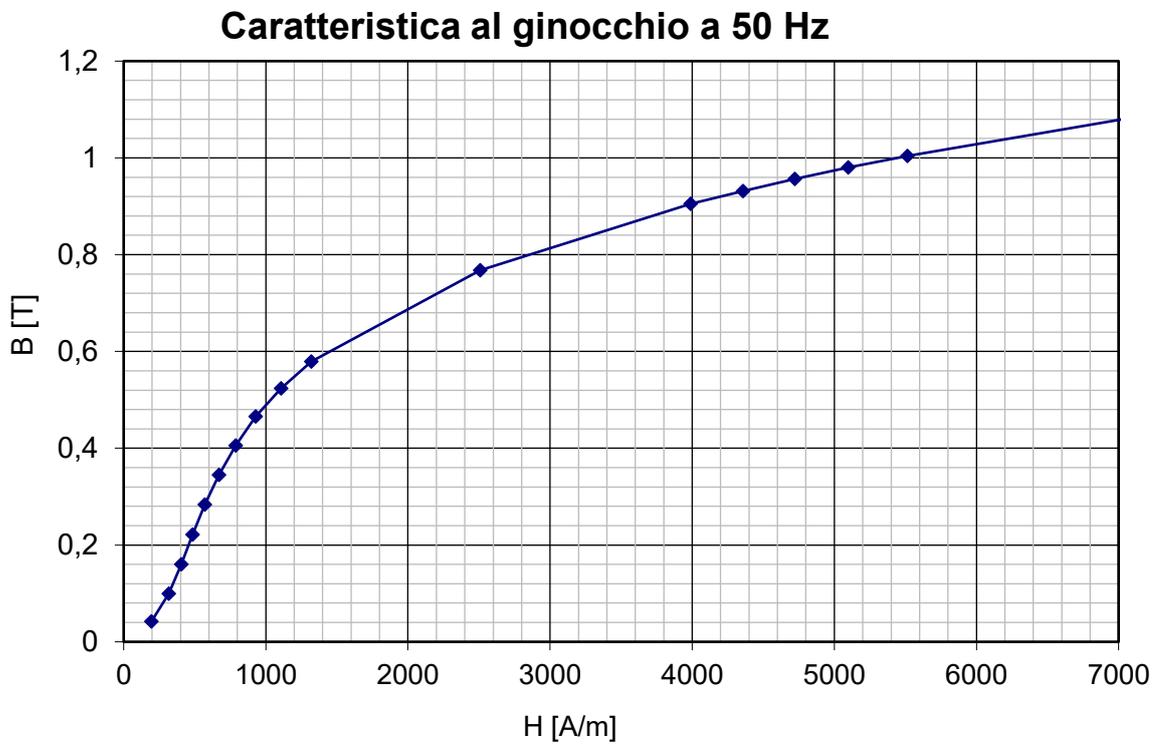


GRAFICO 36 - Caratteristica di normale magnetizzazione



Campione Somaloy-kenolube SSKT2(II)

B (T)	A ₁	A ₂ ^{1,5}	A ₃ ²
1	0,22025	6,91E-04	1,73E-03

Tabella 18 - Parametri per la curva delle perdite nel ferro

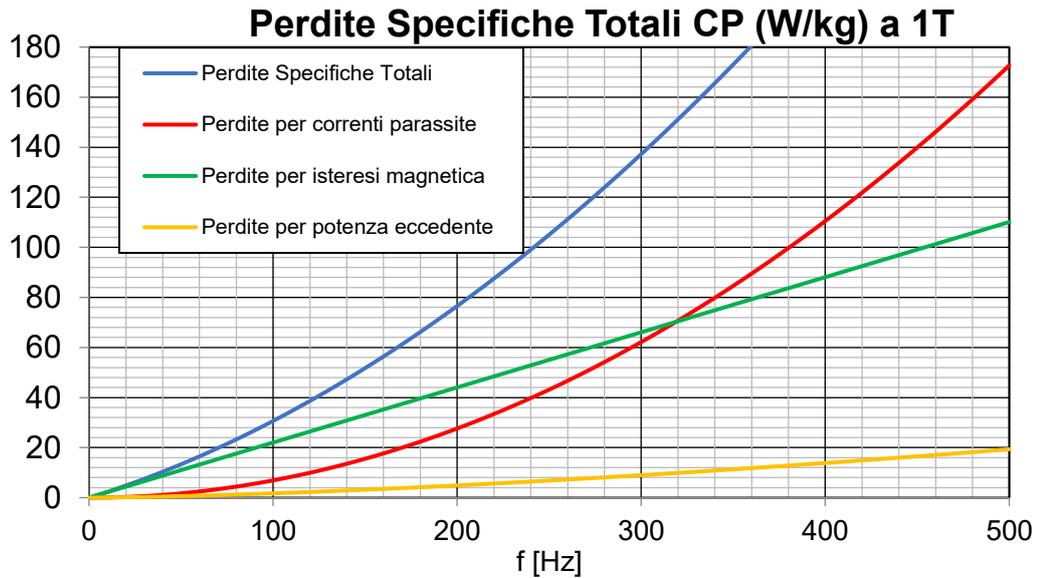


GRAFICO 37 - Perdite specifiche totali Somaloy SSKT2(II)

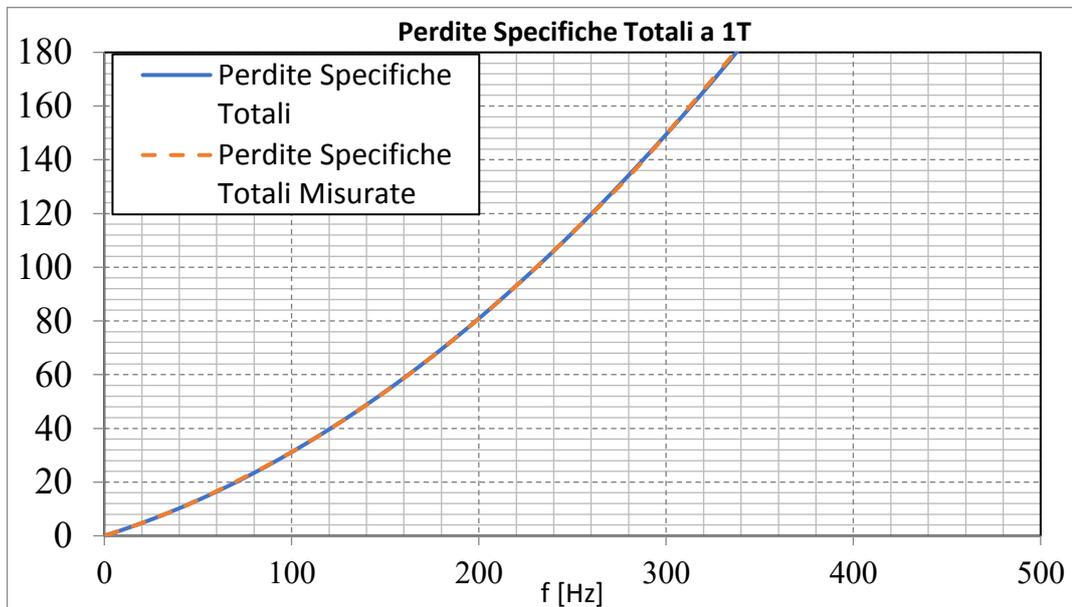


GRAFICO 38 - Perdite specifiche Somaloy SSKT2(II), misurate e calcolate con parametri

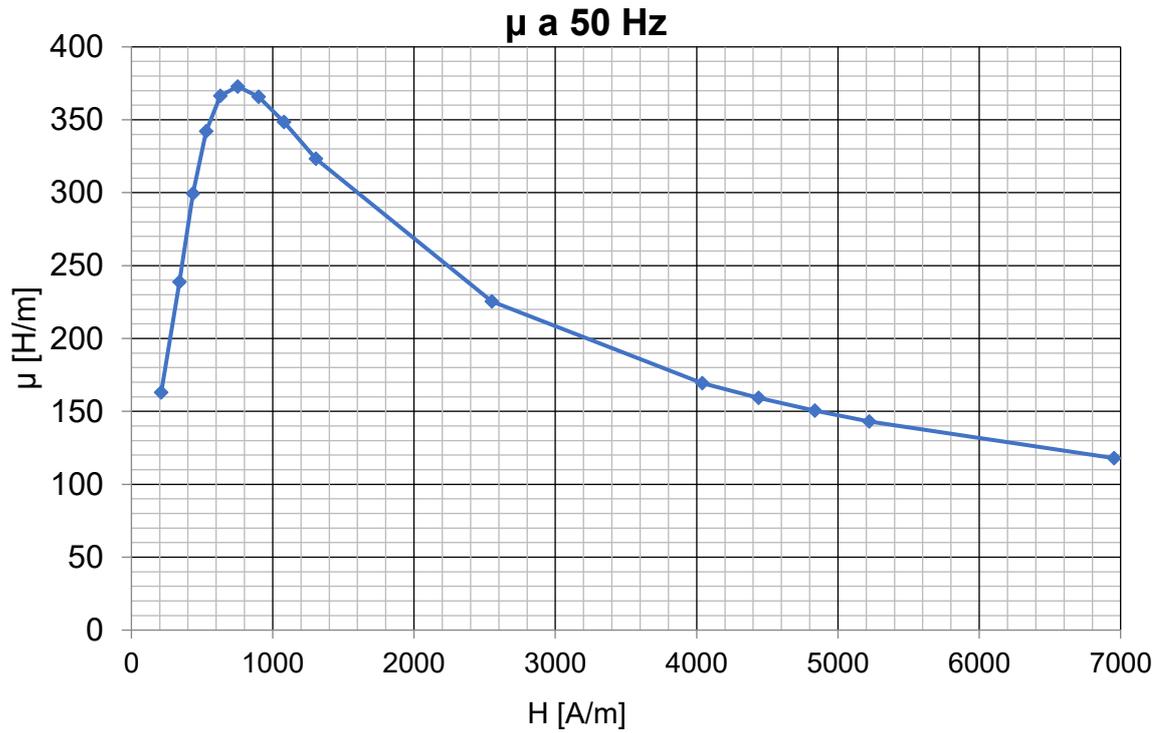


GRAFICO 39 - Permeabilità magnetica relativa in funzione di H

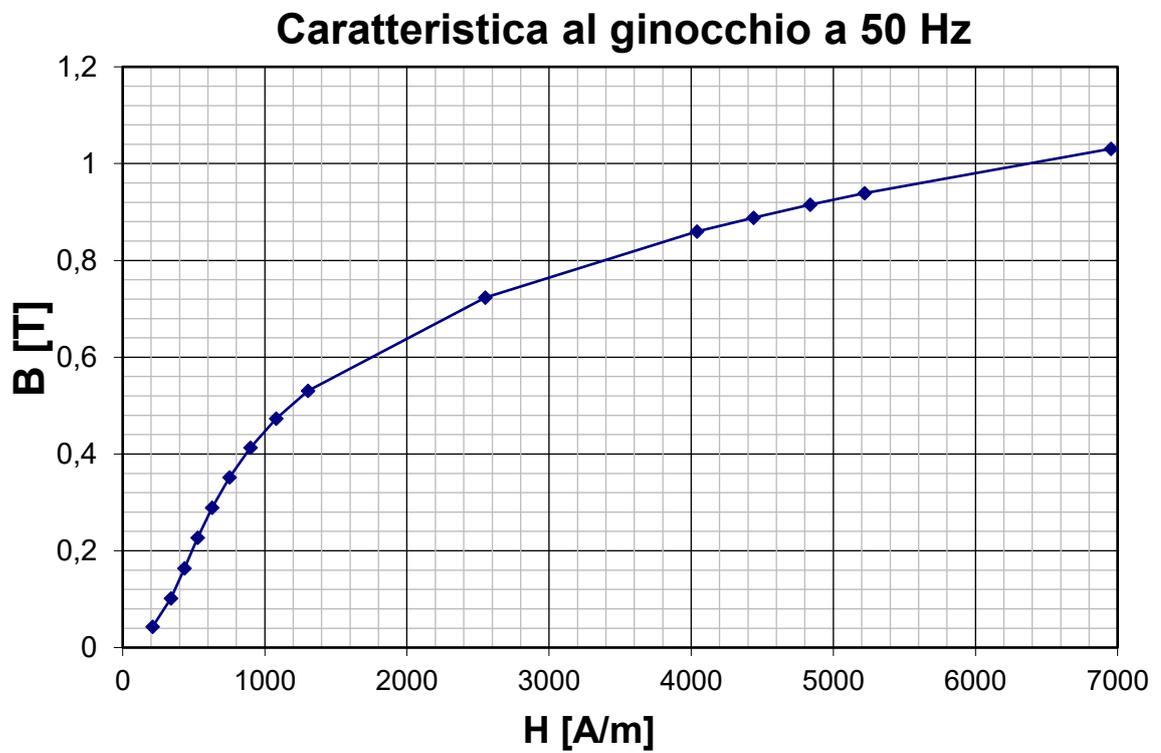


GRAFICO 40 - Caratteristica di normale magnetizzazione



Si riporta un grafico riassuntivo di tutti gli andamenti delle perdite specifiche totali (o cifre di perdita) in funzione della frequenza:

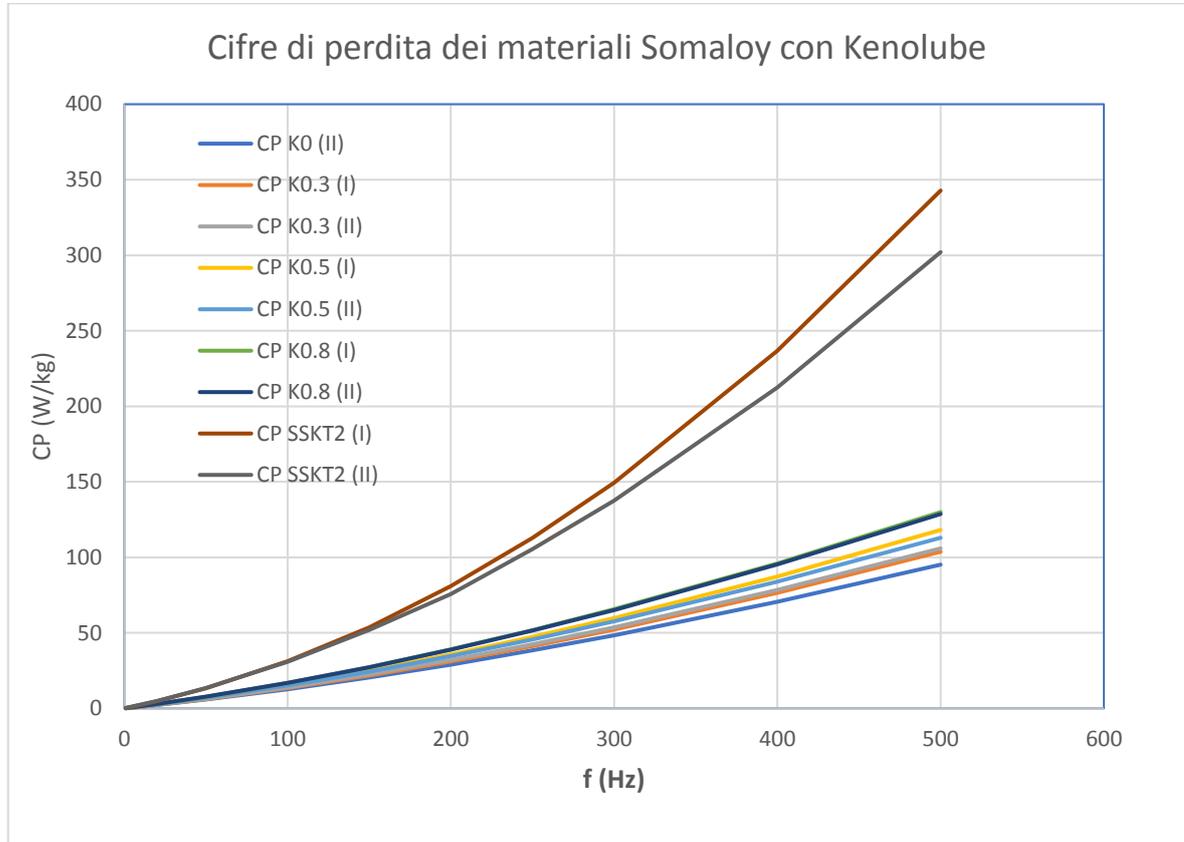


GRAFICO 41- Perdite specifiche totali per tutti i materiali Somaloy alle diverse percentuali di Kenolube

Nel GRAFICO 41 si può notare come che ad un aumento della percentuale di resina termoindurente Kenolube corrisponde un aumento delle cifre di perdita. Situazione diversa per i provini SSKT2 (I) e SSKT2(II), dove l'aumento delle cifre di perdita è dovuto al trattamento termico che ha modificato le proprietà del materiale portando ad un considerevole aumento delle perdite per correnti parassite. Nel prossimo capitolo verranno illustrati i risultati relativi al materiale alternativo, scelto per la realizzazione del prototipo di motore a flusso assiale, a base di resina termoindurente di tipo fenolica, e verranno evidenziati i pregi meccanici di questa miscela ai danni di un peggiore, anche se di poco, comportamento magnetico.



CAPITOLO 5

REALIZZAZIONE PROTOTIPO

In questo capitolo verranno presentate tutte le fasi che porteranno alla realizzazione del motore a flusso assiale: verrà descritta la fase di dimensionamento dello statore in ambiente MatLab e il disegno della macchina, la pressatura delle polveri con i relativi trattamenti termici e le caratterizzazioni magnetiche, la fase di lavorazione alla fresa, l'isolamento degli avvolgimenti utilizzati e la fase di assemblaggio finale. Per ogni fase verranno descritte le problematiche incontrate e le motivazioni che hanno condotto a soluzioni alternative.

5.1. Progetto e dimensionamento del motore

5.1.1. Dati di ingresso del motore

La fase di progettazione e dimensionamento parte con la scelta dei dati in ingresso del motore, da dare al codice di simulazione, scritto in ambiente MatLab. Il prototipo parte da un motore già realizzato in un precedente lavoro di tesi [1], realizzato con il materiale commerciale Somaloy, materiale di cui è possibile vedere i risultati, corrispondenti alla caratterizzazione magnetica, al paragrafo 4.3.3. I dati scelti in ingresso sono quindi del tutto identici ai dati del prototipo precedente, ad esclusione dei parametri di sfruttamento dei materiali. Si riportano quindi i dati di ingresso per la simulazione:

- Numero di fasi (m_f) 3
- Coppia nominale (T_{nom}) 2 Nm
- Velocità nominale (ω_{nom}) 6000 rpm
- Numero di cave (N_c) 12
- Paia poli (pp) 5
- Cave per polo e per fase (q) 2/5
(avvolgimento a bobina di dente a doppio strato)
- Diametro esterno dello statore (D_2) 120 mm
- Rapporto diametro interno ed esterno: (K_r) 0,63
- Altezza massima dello statore (h_{stat}) 17,5 mm
- Apertura di cava (w_0) 4 mm
- Traferro (h_{ag}) 0,8 mm



I dati relativi alla coppia nominale e velocità nominale sono stati scelti del tutto identici al precedente prototipo, e stesso discorso vale per l'alimentazione del motore, il quale era stato alimentato con una tensione al DC-link pari a 48 V. Anche per quanto riguarda il coefficiente K_r , ovvero il rapporto tra il diametro interno e il diametro esterno dello statore, è stato utilizzato lo stesso valore del prototipo precedente. Questo parametro geometrico incide fortemente sul rendimento del motore e sulla densità di coppia prodotta. Da calcoli analitici non riportati in questo lavoro di tesi, ma tratti dal lavoro [1], si può dedurre che, per un determinato valore del raggio esterno della macchina e per dei dati valori di corrente nelle fasi e induzione, la massima coppia erogabile la si ottiene in corrispondenza di un K_r pari a $1/\sqrt{3}$. Nel GRAFICO 42 si può vedere l'andamento della coppia erogata dalla macchina, normalizzata al massimo valore di coppia erogabile, in funzione del parametro K_r :

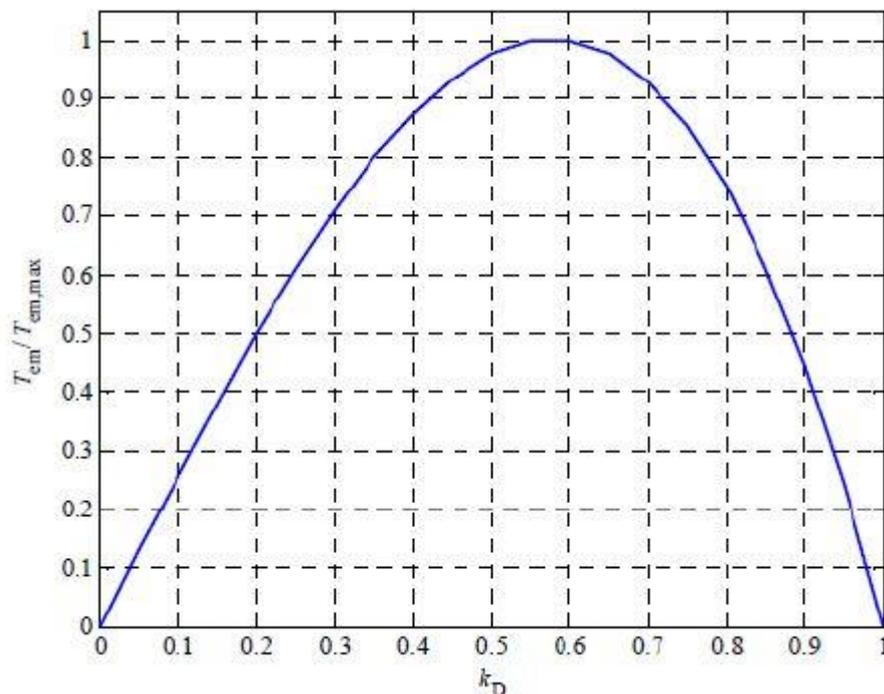


GRAFICO 42- Andamento della coppia in funzione del K_r [1]

Il massimo valore di densità di coppia, cioè del rapporto tra la coppia erogabile e la massa dei materiali attivi, lo si ottiene per un valore di k_r compreso tra $1/\sqrt{3}$ e 0,65 [6]. Inoltre è stato dimostrato [7] che, dato un determinato valore di coppia prodotta e un determinato



valore di K_r , si può incrementare la densità di coppia del motore aumentando il numero di poli della macchina, nel caso in cui il rapporto tra la lunghezza assiale e il diametro esterno siano minori del valore 0,3. Il valore di 0,63 corrisponde ad una massimizzazione del rapporto coppia/peso, cioè significa ottenere un motore che sia il più compatto possibile.

5.1.2. Caratterizzazione magnetica del materiale scelto e relativi dati di ingresso

Si riportano nel seguito i dati in input del materiale scelto, dove questi dati sono il risultato della caratterizzazione magnetica del materiale: miscela di ferro e resina termoindurente di tipo fenolica. Inizialmente si era deciso di realizzare due statori: uno con la miscela di resina fenolica e l'altro con la resina epossidica, ma per ragioni di tempo si è sviluppato solamente il prototipo con la resina fenolica, presente in una percentuale in peso dello 0.2%.

Provino	Peso campione pressato (g)	Densità (g/cm ³)	Pressioni massime (bar)
FERRO + FENOLICA 0.2%	57,58	7,17	114,90
	R PRIMARIO (Ω)	R SECONDARIO (Ω)	SPESSORE (mm)
	0,73	0,98	6,37
	Dint (mm)	Dext (mm)	PESO Toroide (g)
	30,02	40,06	24.92
	CP a 1T e 50Hz (W/kg)	μ_{max} 1Hz	Bmax @ 5000 A/m a 50Hz (T)
	8,90	398,5	1,24

Tabella 19 - Dati caratterizzazione magnetica provino Ferro + Fenolica 0,2%

Dalla Tabella 19 è possibile vedere che il valore della cifra di perdita a 1 T e 50 Hz è più alto (8,9 W/kg) rispetto ai valori ottenuti con i materiali commerciali Somaloy senza l'aggiunta di Kenolube (5,7 W/kg), e i valori di permeabilità massima a 1 Hz e di induzione massima a 50 Hz sono più bassi, però questo materiale, come si vedrà più avanti, presenta una più elevata resistenza meccanica e sicuramente in futuro sarà possibile scendere ulteriormente con le percentuali di resina termoindurente. Si riportano le immagini relative al campione toroidale di Ferro e fenolica 0,2%:



Tabella 20 - Campione pressato Ferro+Fenolica 0,2%

La preparazione seguita per questo campione è del tutto identica a quella effettuata per i campioni Somaloy inclusi i tempi di miscelazione automatica e del trattamento termico di Curing.

Campione Ferro + Fenolica 0,2%

B (T)	A₁	A₂^{1,5}	A₃²
1	0,156	5,48E-05	2,47E-03

Tabella 21- Coefficienti per la separazione delle perdite -(Ferro+Fenolica 0,2%)

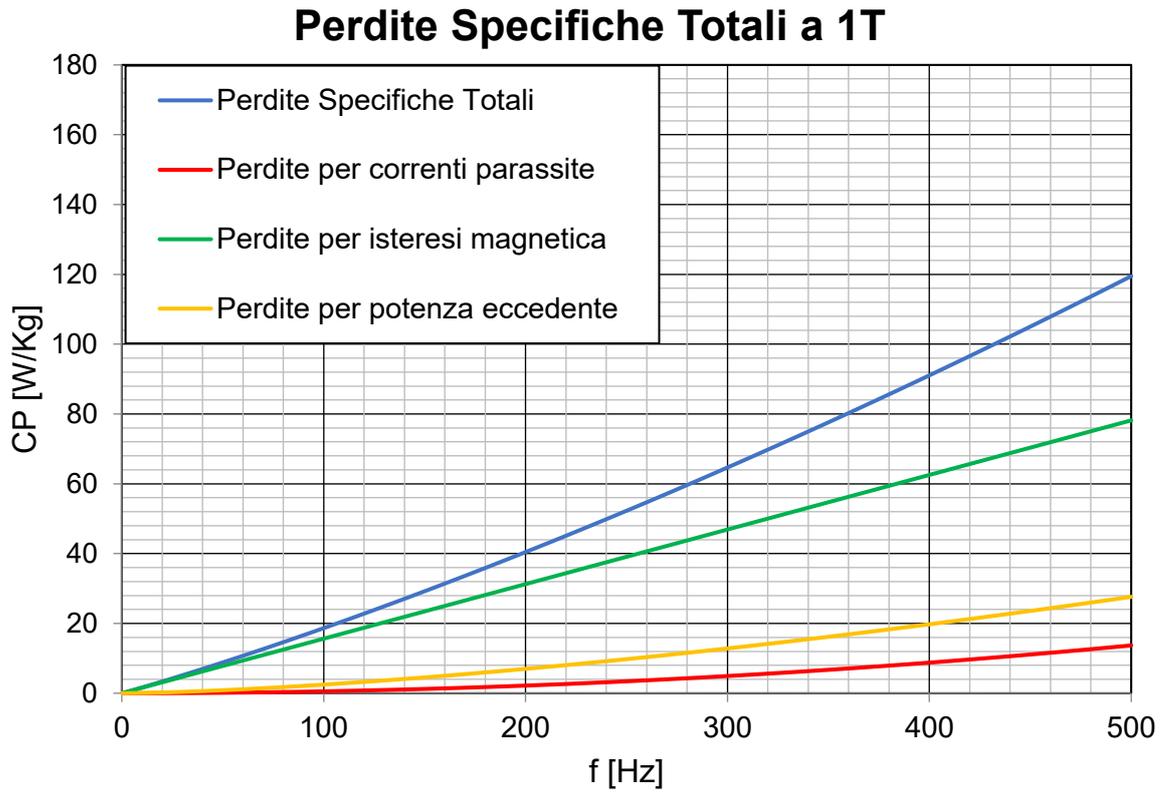


GRAFICO 43 - Andamento delle perdite complessive e delle singole quote di perdita

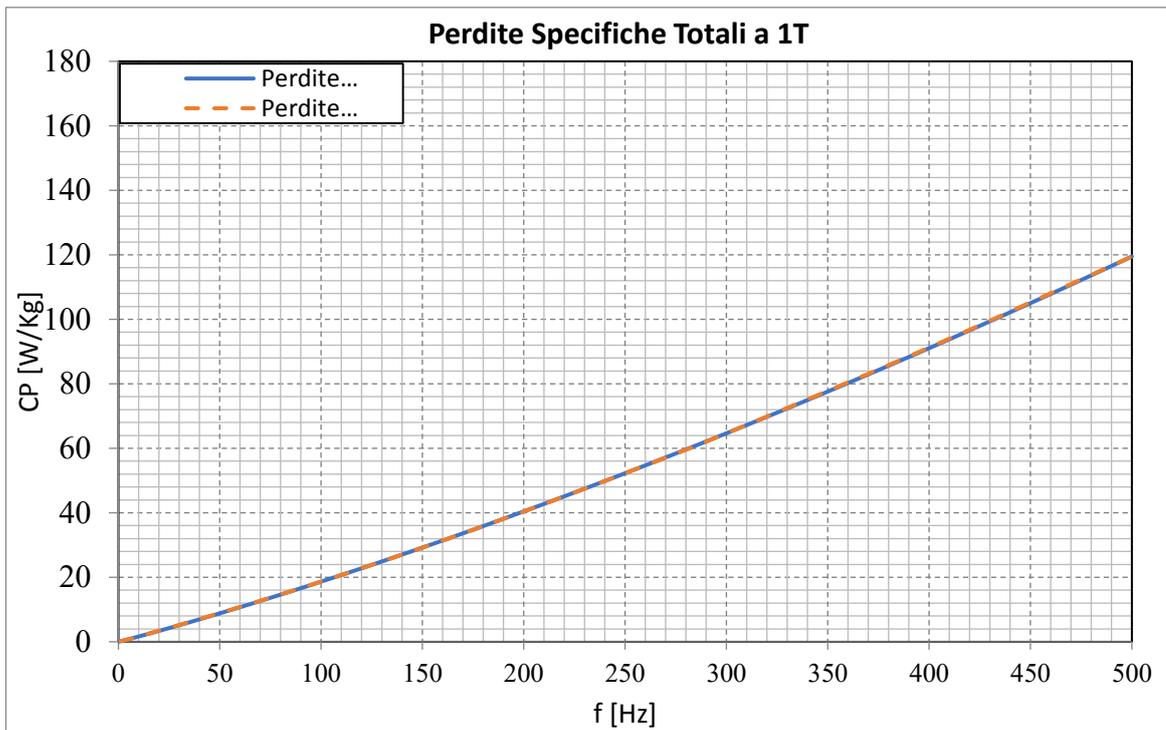


GRAFICO 44 - Confronto perdite complessive misurate e calcolate

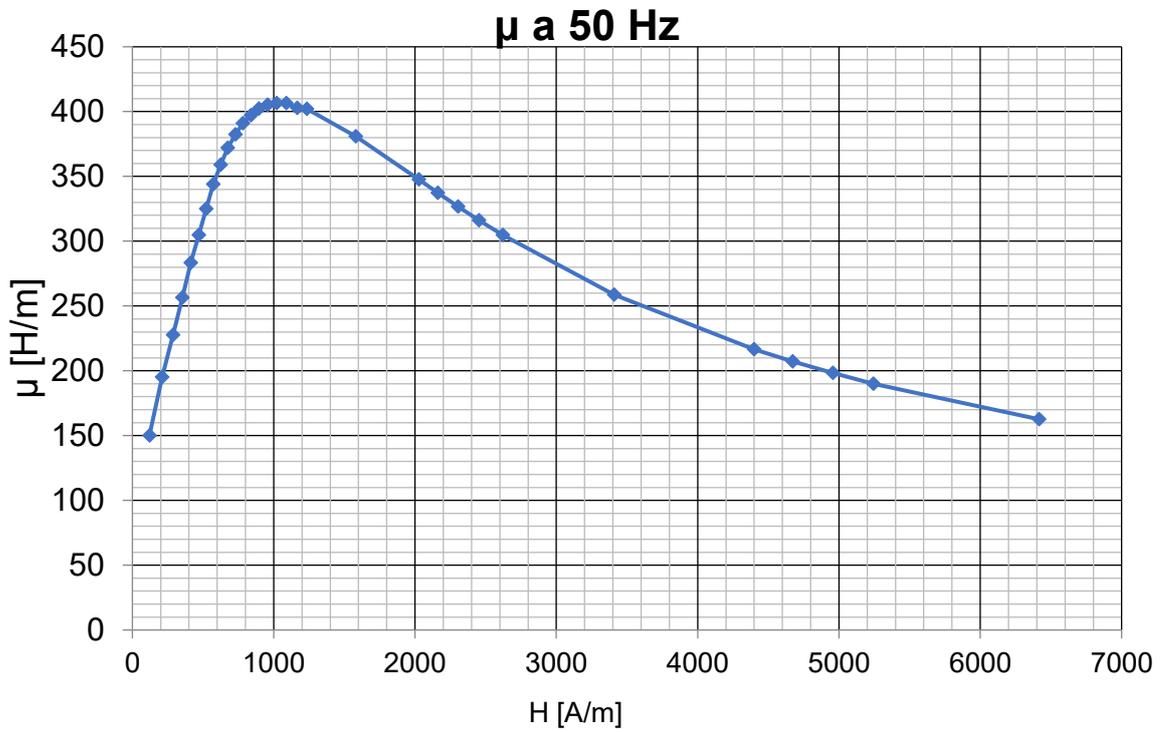


GRAFICO 45- Andamento della permeabilità massima in funzione del campo magnetico applicato

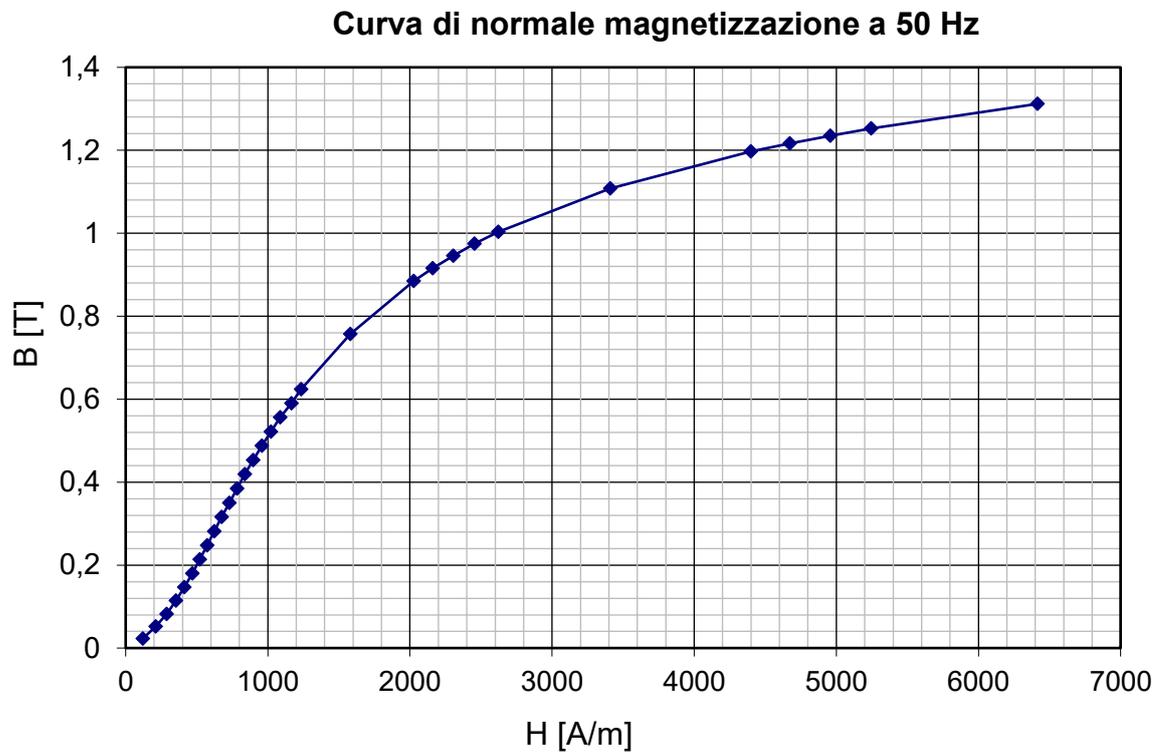


GRAFICO 46 - Curva di normale magnetizzazione a 50 Hz (Ferro+fenolica 0,2%)



5.1.3. Dati di ingresso per i materiali del rotore e degli avvolgimenti

In questo lavoro di tesi non è stata effettuata l'operazione di costruzione del rotore, ma si è riutilizzato il rotore già costruito per il precedente prototipo [1] e per il quale verranno riportati i principali dati di interesse:

Magneti per il rotore NdFeB 96,7 % e fenolica 3,3 %

- Diametro esterno della corona magnetica 120 mm
- Altezza dei magneti (l_m) 4 mm
- Induzione residua (B_r) 0,612 T
- Coefficiente di temperatura (α_b) -0,17% / °C
- Permeabilità relativa (μ_r) 1,133
- Densità dei magneti (d_{magn}) 4800 kg/m³
- Temperatura di funzionamento dei magneti (ϑ_{PM}) 90 °C

Il rotore è stato realizzato mediante materiali plasto-magnetici, descritti al paragrafo 3.2, ovvero mediante una miscela di:

Giogo di rotore

- Polveri di Neodimio-Ferro-Boro al 96,7 %
- Resina fenolica al 3,3 %

Dove l'elevata percentuale di resina fenolica ha prodotto un materiale molto resistente meccanicamente. I magneti utilizzati per il rotore sono stati incollati su un giogo realizzato in ferro comune, presente in commercio con la sigla Fe S232, per il quale le caratterizzazioni magnetiche sono state condotte in un precedente lavoro di tesi [1], e se ne riportano solo i principali dati di interesse:

Ferro Fe S232

- Induzione massima a 5000 A/m: 1,87 T
- Permeabilità relativa massima: 1,503
- Densità: 7826 kg/m³



GRAFICO 47- Rotore con magneti in NdFeB su supporto in Fe S232

Vengono infine riportati i dati in input degli avvolgimenti in rame:

Dati in input avvolgimento in rame Cu

- Resistività del rame (ρ_{cu}) $1,68 \cdot 10^{-8} \Omega m$
- Temperature dell'avvolgimento (θ_{cu}) $130 \text{ }^\circ C$
- Massima densità di corrente 10 A/mm^2
- Densità del rame (d_{cu}) 8940 kg/m^3

In questo prototipo di motore verrà realizzata una configurazione di avvolgimento del tutto identica al prototipo precedente, per poterne fare un corretto confronto. L'avvolgimento adottato è quindi a bobina di dente (o avvolgimento concentrato), e questa configurazione permette di ridurre i volumi, oltre ad essere di facile realizzazione. Avere dei volumi di materiale minori significa ridurre i costi delle materie prime e inoltre l'avvolgimento a bobina di dente permette di avere degli avvolgimenti sulle testate più corti, le quali non contribuiscono alla produzione di coppia e questo significa avere minori perdite nel rame per effetto Joule. Inoltre il layout scelto per l'avvolgimento è della tipologia a doppio strato, cioè su ogni dente viene avvolta un'unica bobina, e quindi ogni cava ospiterà due bobine differenti, e quindi bisognerà prestare particolare attenzione ai problemi di isolamento tra le due bobine all'interno della singola cava.



5.1.4. Risultati del calcolo analitico

I dati in input, elencati al paragrafo precedente, sono stati inseriti nel codice, scritto in ambiente MatLab e creato in un altro lavoro di tesi [8], e per questo motivo non verrà data una descrizione del codice ma verranno presentati soltanto i risultati geometrici ed elettrici ottenuti.

DATI GEOMETRICI STATORE

- Diametro esterno statore (D_2): 120 mm
- Diametro interno statore (D_1): 69,47 mm
- Apertura di cava (w_0): 4 mm
- Altezza scarpa ($h_{11} + h_{12}$): 1,5 mm
- Altezza utile di cava (h_{us}): 11,5 mm
- Larghezza utile di cava (w_s): 8 mm
- Altezza totale dente (h_{ts}): 14,5 mm
- Altezza giogo di statore (h_{ts}): 5 mm
- Raggio di raccordo della cava (rc): 1,5 mm

DATI GEOMETRICI ROTORE

- Altezza giogo di rotore (h_{yr}): 4 mm
- Spessore dei magneti (l_m): 2 mm

DATI AVVOLGIMENTO

- Numero di bobine per fase: 4
- Numero di spire per cava (N_1): 7
- Sezione del conduttore (S_c): 2,74 mm²

Nella seguente Figura 37 è riportato il disegno, in prospettiva frontale, dello statore e del rotore, con i corrispondenti nomi per ogni grandezza.

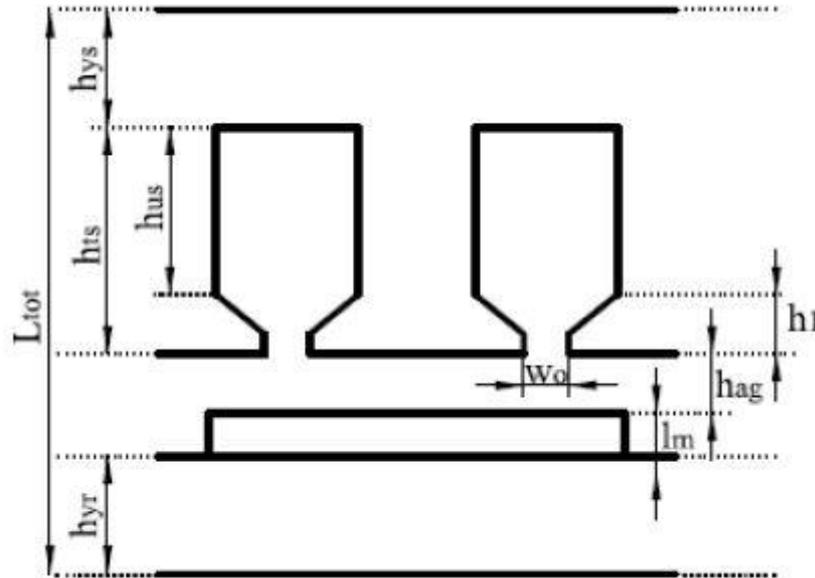


Figura 37 - Disegno di statore e rotore

Bisogna notare che la lavorazione alla fresa non permette l'ottenimento di cave a sezione quadrata, ma le cave si presentano con sezione quadrata e lati raccordati di raggio 1,5 mm. Questo valore è il compromesso raggiunto con i limiti di lunghezza massima e diametro minimo della fresa, da 3 mm. Infatti diametri più piccoli per la fresa comportano la rottura della fresa stessa. Una soluzione alternativa potrebbe essere l'utilizzo di frese a T, come si può vedere nella seguente:

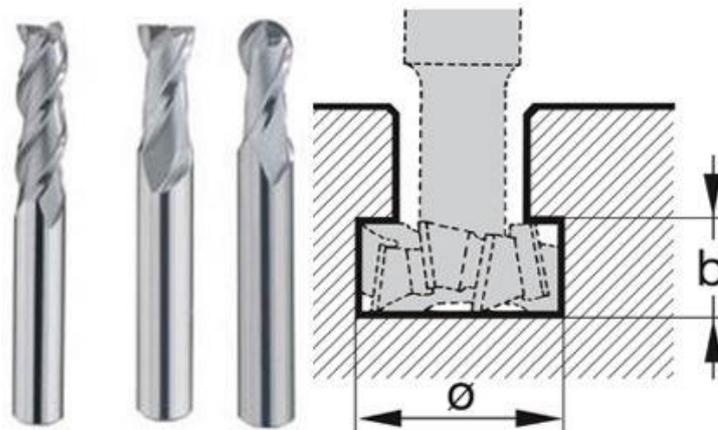


Figura 38 - Esempio di frese cilindriche (sinistra) e frese per cave a T



Le frese per cave a T non sono state utilizzate per motivi di tempo e disponibilità, ma soprattutto per le difficoltà nel trovare un diametro dell'albero della fresa compatibile con l'apertura di cava, e quindi sono state utilizzate le più comuni frese cilindriche.

I risultati del calcolo analitico hanno portato ad un numero di spire per singolo dente pari a 7 con una sezione del conduttore pari a $2,74 \text{ mm}^2$. Per migliorare il coefficiente di riempimento e quindi inserire più rame nella sezione della finestra, sono stati realizzati, come fatto nel prototipo precedente, delle piattine in rame. Quindi i conduttori in rame sono stati sostituiti da 7 piattine in rame con i seguenti valori:

- Altezza piattina: 6,5 mm
- Spessore piattina: 0,2 mm

Le piattine ovviamente presenteranno, alla fine del processo di isolamento, uno spessore maggiore che quindi dovrà essere opportunamente valutato. Inoltre nel prototipo precedente si è notato che il risultato della simulazione di 7 bandelle per dente non permetteva uno sfruttamento ottimale della macchina. Sono state quindi utilizzate 12 bandelle per dente e quindi anche in questo prototipo, per un confronto tra i due motori, sono state utilizzate 12 bandelle per dente.

5.1.5. Preparazione delle miscele e stampaggio dello statore

La tecnica della pressatura delle polveri, nonostante gli innumerevoli vantaggi, presenta dei limiti legati alle dimensioni dei motori che si possono ottenere e infatti non è possibile stampare cilindri di dimensioni molto elevate. La dimensione di progetto, ovvero un diametro esterno massimo di 120 mm, identico al prototipo precedente, non può essere stampata con la pressa presente nella sede di Alessandria del Politecnico di Torino, e per questo motivo è stata contattata un'azienda che si occupa di prodotti sinterizzati, sinterizzazione di particolari meccanici in acciaio e componenti per il settore meccanico e automotive. L'azienda possiede quindi una pressa abbastanza grande e capace di pressare cilindri del diametro di 120 mm e spessori di 20 mm.

La prima fase è stata quindi la preparazione di 10 kg di miscela di ferro e resina fenolica, presente allo 0,2% in peso. La miscela è stata preparato sotto cappa chimica, come già

fatto per le miscele Somaloy e Kenolube, e sono state miscelate prima manualmente e poi meccanicamente per 30 minuti.



Figura 39 - Preparazione della miscela ferro+fenolica0,2%

Le miscele, turbolate, sono state quindi portate in azienda e pressate. È importante osservare una differenza tra la pressa usata in laboratorio e quella usata in azienda: la pressa del laboratorio è impostata per terminare il lavoro di pressatura solo quando viene raggiunta una determinata pressione di lavoro, corrispondente ad un valore desiderato di densità del campione e che ci permette di capire se il campione è stato pressato correttamente. Con la pressa dell'azienda, per motivi di risparmio di tempo tempo, si effettuano pressature che terminano ad una altezza finale (si parla di “spessore finale atteso”). Però dallo spessore finale è difficile prevedere il valore di pressione massima da raggiungere. Per questo motivo sono stati fatti vari tentativi iniziali con spessori decrescenti dei dischi e quindi con delle pressioni sempre maggiori. La densità finale desiderata per i materiali SMC deve essere quanto più vicina al valore 7 g/cm^3 .



Figura 40 - Pressa a freddo azienda Sinteris



Figura 41- Pressa a freddo azienda Sinteris

Si riportano i principali dati di interesse ottenuti nel processo di pressatura delle polveri di ferro e fenolica allo 0,2% in peso, sono riportati solo i dati relativi ai campioni con buone densità finali raggiunte:

Campione	Densità finale (g/cm ³)	Pressione massima raggiunta (MPa)
1	6,41	404,2
2	6,47	427,3
3	6,54	438,8
4	6,5	415,8
5	6,42	415,6
6	6,75	485

Tabella 22 - Dati principali pressatura campioni Ferro+ Fenolica 0,2%

I campioni sono poi stati sottoposti al ciclo termico utilizzato per gli altri campioni:

- Rampa di 30 minuti fino a 150 °C
- Isotherma di 30 minuti a 150 °C
- Raffreddamento naturale

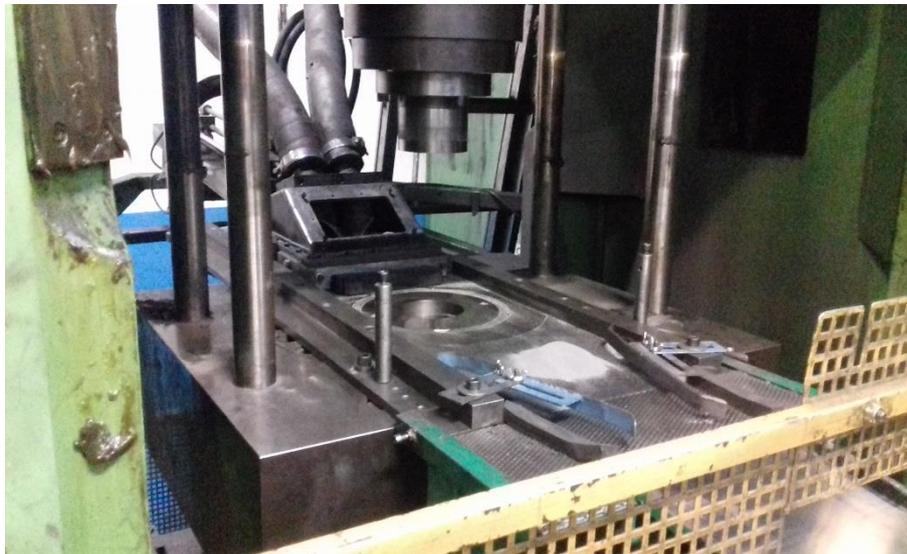


Figura 42- Stampo e punzone della pressa



Figura 43 - Stampo e punzone della pressa



Figura 44 - Dischi pressati e inseriti nel forno per il trattamento termico



Figura 45- Dischi a fine trattamento termico

Dopo aver recuperato i dischi dal forno, si è deciso di prendere uno dei sei dischi per effettuare le prove meccaniche e di caratterizzazione magnetica, al fine di valutare la bontà del processo.

Si è scelto dei sei dischi quello con le proprietà intermedie, ovvero il disco numero 4 della Tabella 22, ed è stato tagliato in modo da ottenere i parallelepipedi per la prova meccanica a tre punte, necessaria per valutare la resistenza statica del materiale, e le parti restanti verranno utilizzate per ottenere i toroidi per la caratterizzazione magnetica.



Figura 46 - Taglio del disco

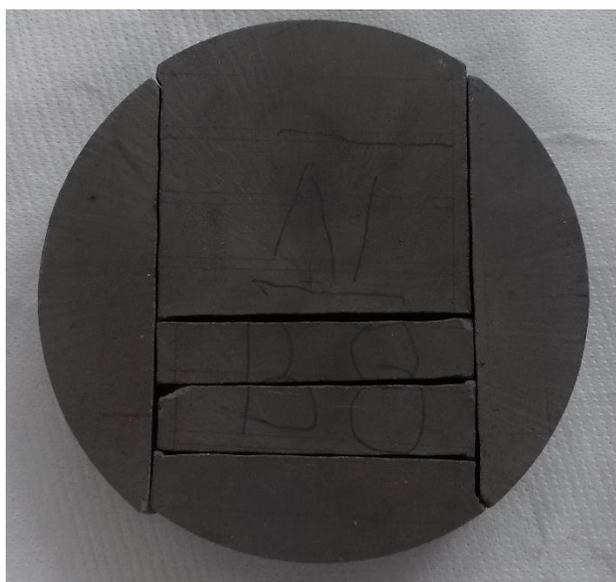


Figura 47 - Disco tagliato

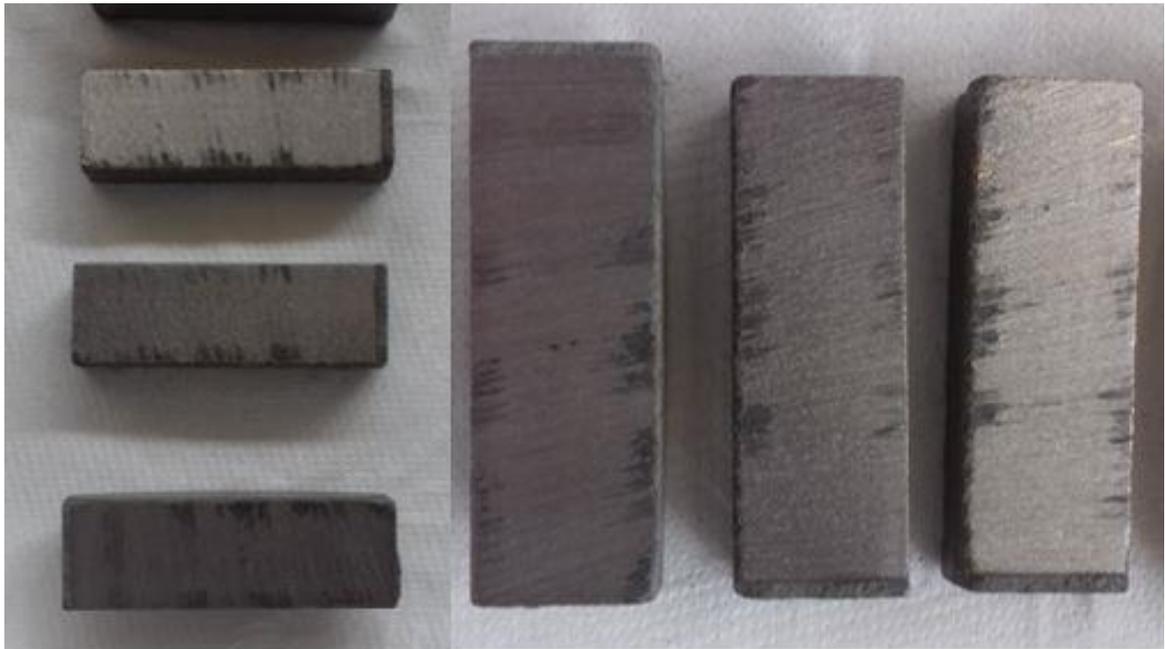


Figura 48 - Blocchetti ricavati dal taglio del disco

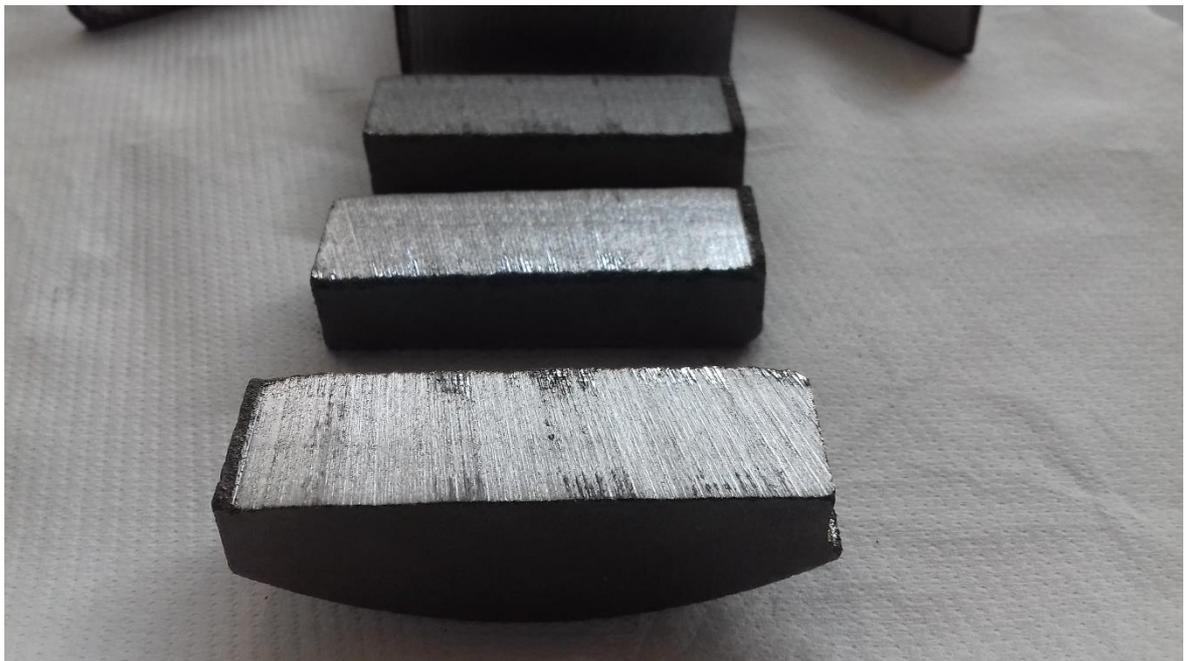


Figura 49 - Blocchetti ricavati dal taglio del disco

Durante la fase di fresatura il materiale purtroppo si è sgretolato, e quindi senza procedere alle prove meccaniche si è deciso di scartare i dischi pressati.



Figura 50 - Fresatura del provino 4 Ferro+ Fenolica 0,2%

Le motivazioni di questo cattivo comportamento meccanico possono essere due:

- Mancata reticolazione della resina fenolica durante il trattamento termico
- Invecchiamento chimico della resina fenolica utilizzata

La seconda opzione sembra la più probabile, in quanto il trattamento termico seguito è stato del tutto identico ai trattamenti termici già utilizzati. Inoltre la fenolica utilizzata, che normalmente dovrebbe presentare un colore tendente al bianco, era di colore giallastro. Ad ogni modo per verificare la corretta reticolazione è stata effettuata una prova DSC (Calorimetria differenziale a scansione). La prova consiste nel dare una quantità di calore ad un milligrammo circa di materiale da analizzare e valutare l'andamento dell'entalpia o del flusso di calore dato al provino in funzione della temperatura. Se il flusso di calore non risulta costante ma presenta dei valori più bassi, nel range di temperature del ciclo termico (da 20 °C a 150 °C), allora significa che il campione ha formato i legami della reticolazione e ha generato energia e quindi c'è stato un flusso di calore dal provino.

Dalle prove è risultato evidente che il campione non ha reticolato, e quindi il problema non è dovuto alla mancata reticolazione, in quanto era già reticolato, ma è dovuto all'invecchiamento della resina fenolica.

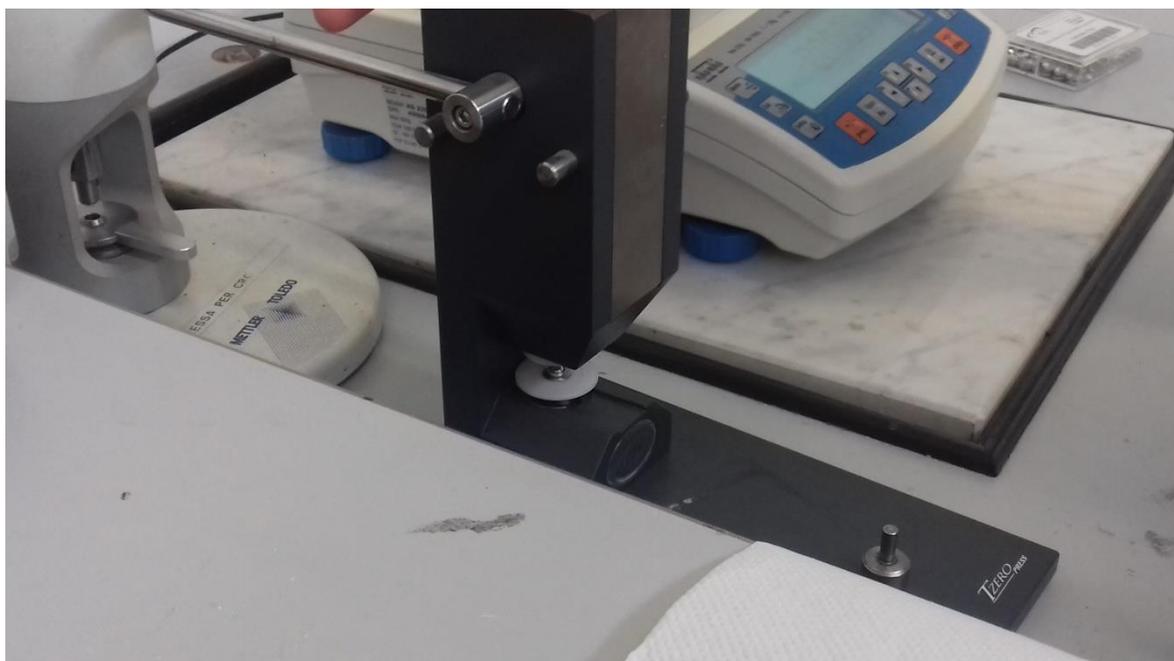


Figura 51 - Preparazione del campione per la DSC



Figura 52 - Macchinario per la DSC



Figura 53 - Macchinario per la DSC

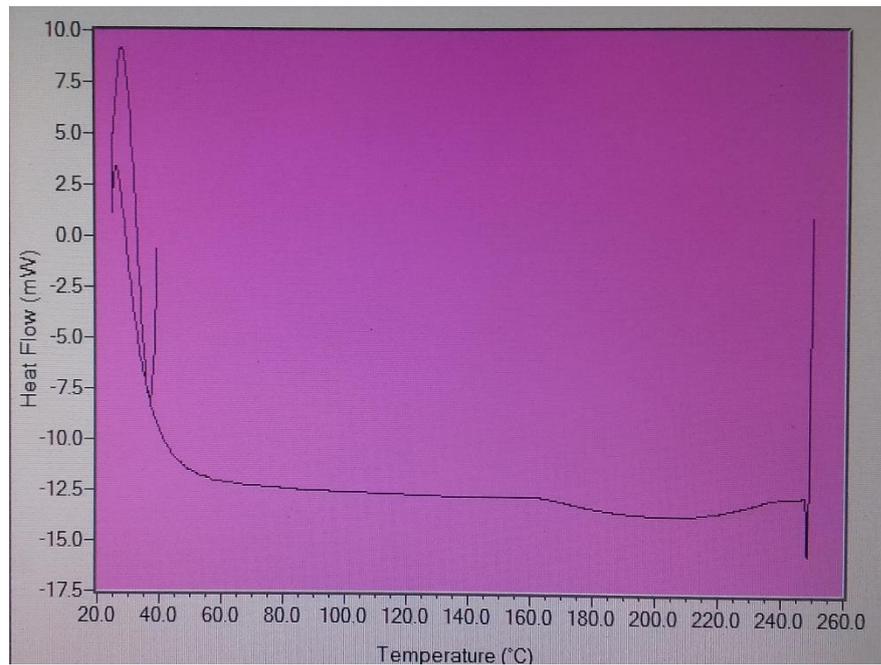


Figura 54 - Esempio di visualizzazione dei risultati della DSC su schermo

A questo punto è stato necessario valutare delle soluzioni alternative per la realizzazione dello statore del motore a flusso assiale. Nel prossimo capitolo verranno discusse le due alternative e verrà descritta la soluzione adottata.



5.2. Stampaggio modulare dello statore

A causa dell'invecchiamento della resina fenolica i 6 dischi pressati in azienda sono stati scartati quindi è quindi sono state valutate strade alternative. Le due opzioni valutate sono state le seguenti:

- Pressare nuovamente le polveri in azienda
- Pressare le polveri con la pressa del laboratorio in modo da ottenere uno statore modulare

La prima opzione è stata scartata a causa dei tempi eccessivamente lunghi di prenotazione della pressa dell'azienda. Per questo motivo è stata adottata la seconda opzione, la quale rappresenta la novità di questo lavoro di tesi. Dati i limiti della pressa a freddo del laboratorio, con il quale è possibile stampare dischi del diametro massimo di 40 mm, si è pensato di creare 12 dischi corrispondenti ai 12 denti dello statore. Questi dischi saranno poi incollati tra di loro mediante una resina termoindurente e poi fresati, in modo da ottenere uno statore di tipo modulare. Questa opzione è fortemente innovativa in quanto non si è più obbligati a pressare i dischi con presse molto grandi, a disposizione solo di pochissime aziende in Europa, inoltre la modularità permette di creare delle geometrie molto particolari e facili da ottenere, nonché permette di ottenere dei diametri anche più grandi dei limiti massimi imposti dalle presse più grandi, ovvero di 120 mm. Avendo a disposizione i dati geometrici, risultato della simulazione in MatLab, si è effettuato il disegno mediante il software SolidWorks. Nelle seguenti figure è possibile vedere il disegno del singolo dente, ricavabile dai dischi di diametro di 40 mm, e poi la struttura complessiva incollata:

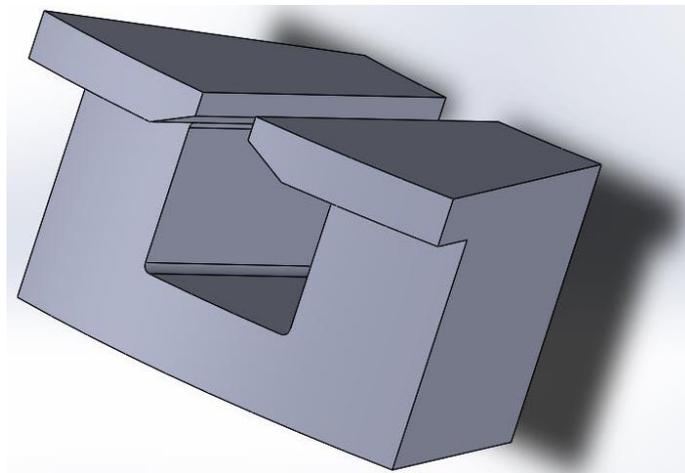


Figura 55 - Disegno in SolidWorks del singolo dente di statore

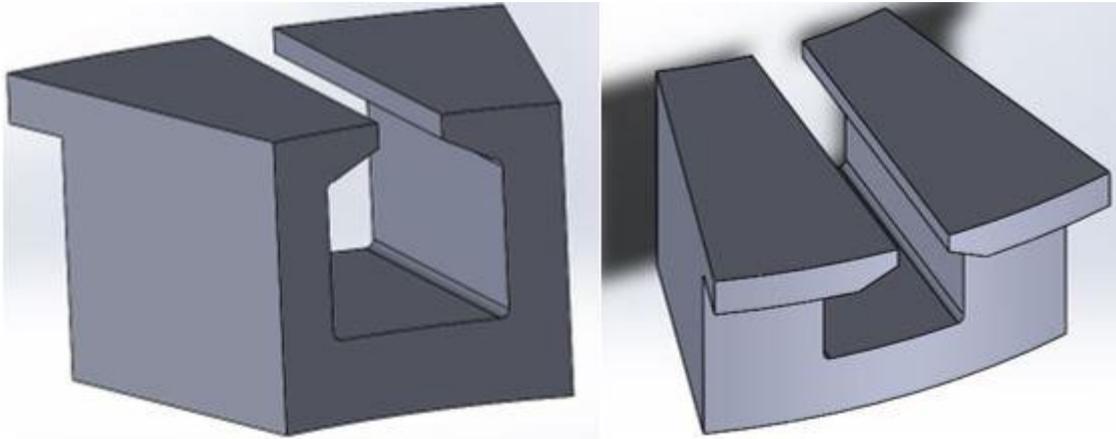


Figura 56 - Disegno in Solidworks di un dente di statore

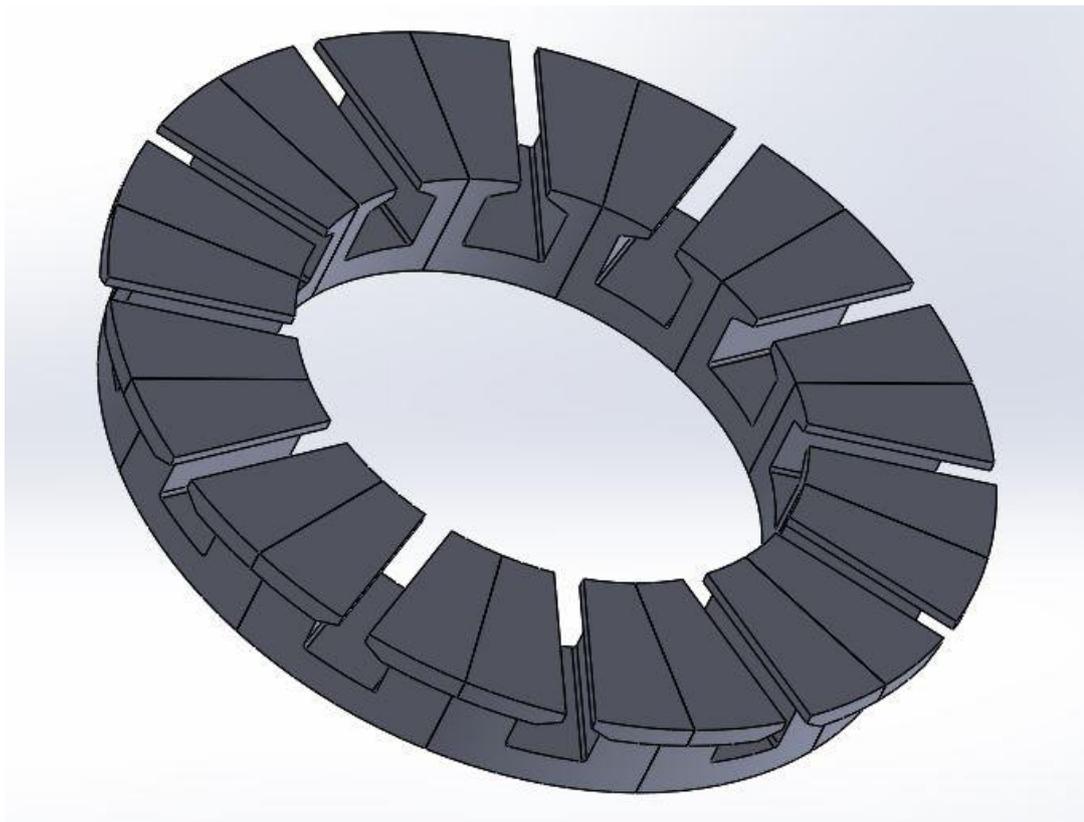


Figura 57 - Disegno in SolidWorks della struttura di statore assemblata

Per procedere con questa lavorazione sono state preparate nuovamente altre miscele di polvere Ferro + Fenolica 0,2 %, ma in questo caso si è utilizzata una resina fenolica nuova, che infatti presenta un colore più tendente al bianco:

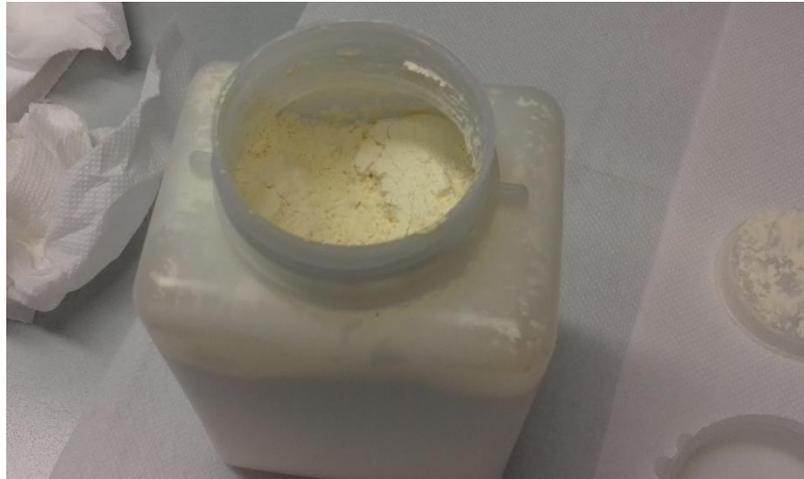


Figura 58 - Resina fenolica nuova

Per quanto riguarda la fase di pressatura è necessario dare alcune informazioni: la pressa presenta un limite di diametro massimo di 40 mm, ma non è l'unico limite. Infatti si ha anche un limite sullo spessore massimo raggiungibile, che è di circa 14,5 mm. Dato che il motore deve avere uno spessore di 17,5 mm si è effettuata una pressatura a più fasi:

- Pressatura in bassa pressione di un primo strato di polvere (circa 10 bar)
- Pressatura ad alta pressione (600 MPa) di un secondo strato di polvere sul disco pressato a bassa pressione

Si riportano una immagine del processo di pressatura:

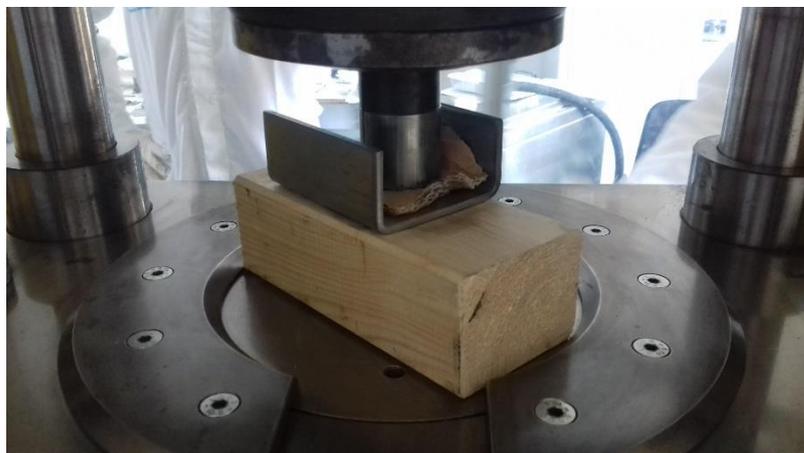


Figura 59 - Processo di doppia pressatura dei cilindri

Dalla Figura 59 è possibile notare l'inserimento di un blocco di legno. L'adozione di questo pezzo è dovuta alle enormi difficoltà di estrazione del punzone dallo stampo, nonostante l'applicazione di lubrificante spray sulle superfici dello stampo e del punzone. Questo processo è risultato rischioso per la vita della pressa, date le elevatissime pressioni raggiunte.

Si riportano i dati del primo campione ottenuto col processo di doppia pressatura:

Campione	Peso (g)	Spessore (mm)	Diametro (mm)
B8.3 AFM I	177,96	19,52	40,07

Tabella 23 - Dati campione B8.3 AFM

Dove la sigla B8.3 AFM indica:

- B: nome della resina (fenolica)
- 8: percentuale in complemento a 1 di resina (0,2%)
- 3: pressione di lavoro (600 MPa)
- AFM: Axial Flux Motor

Per verificare la bontà del processo di doppia pressatura sono state effettuate delle misure di densità del primo campione pressato. Il campione è stato infatti tagliato in parti opportune:

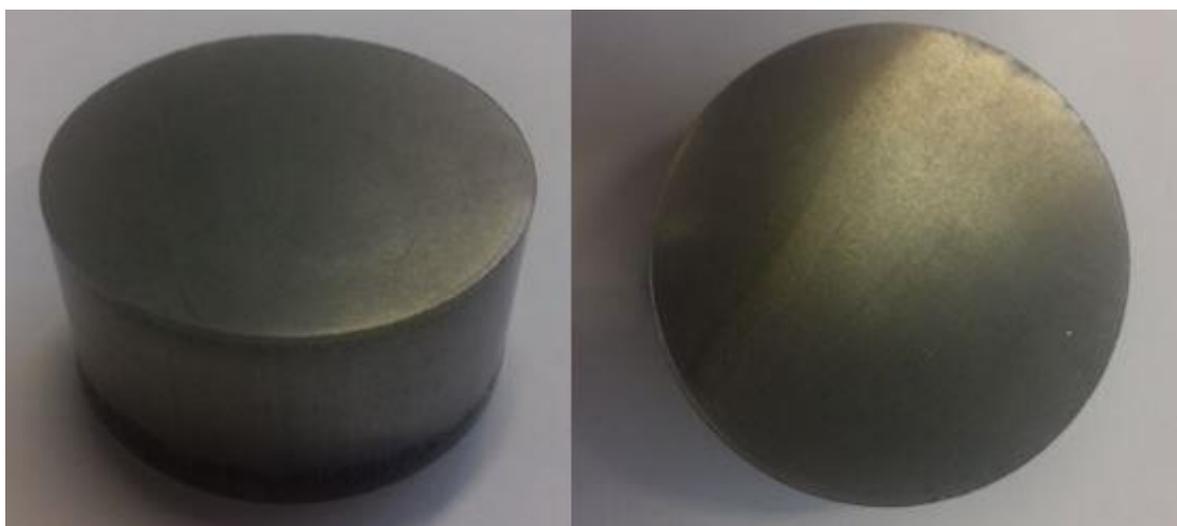


Figura 60 - Campione B8.3 AFM I



Figura 61- Taglio del campione B8.3 AFM I

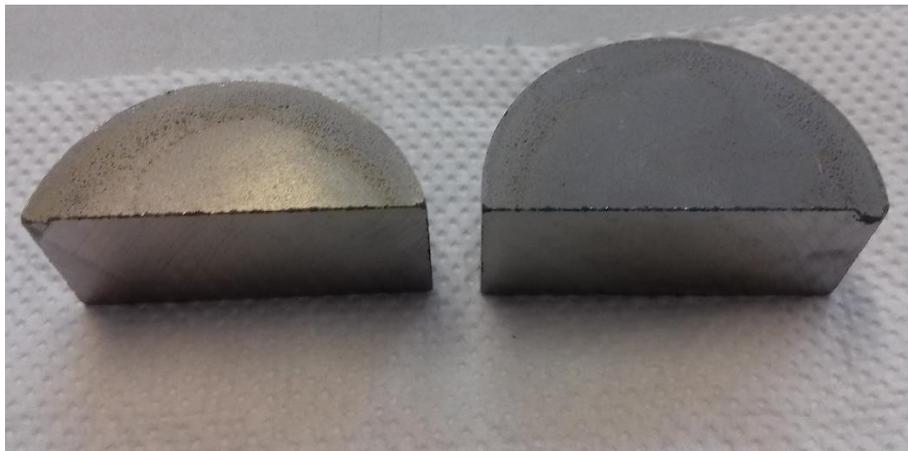


Figura 62 - Campione tagliato B8.3 AFM I

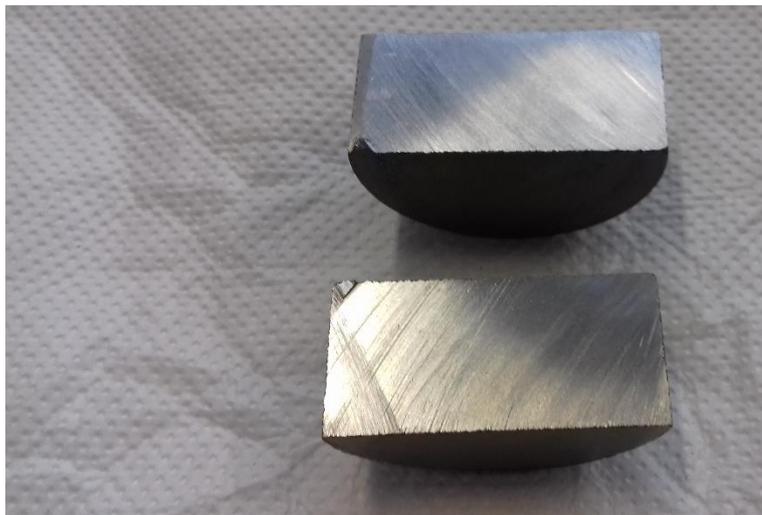


Figura 63- Campione tagliato B8.3 AFM I

Una delle due metà, come si vede in Figura 63, è stata tagliata ulteriormente in tre parti e di ognuna di queste è stata calcolata la densità:

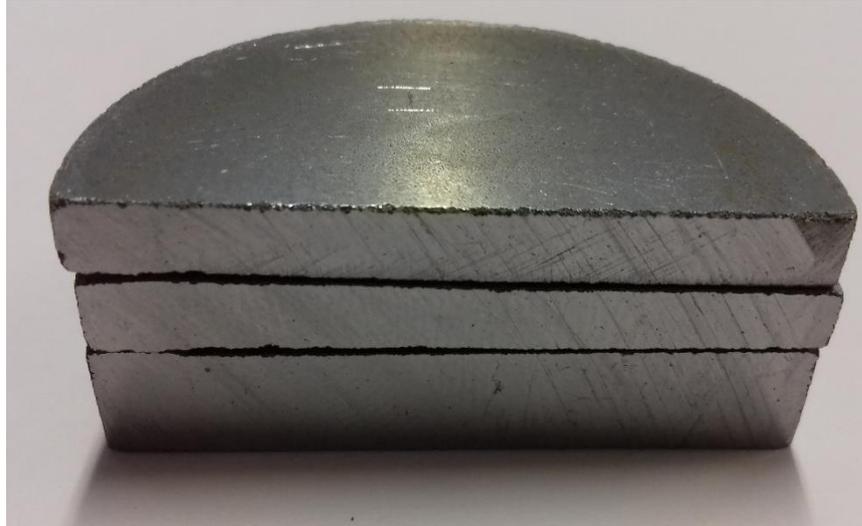


Figura 64 - Pezzi del campione B8.3 AFM I per il calcolo della densità

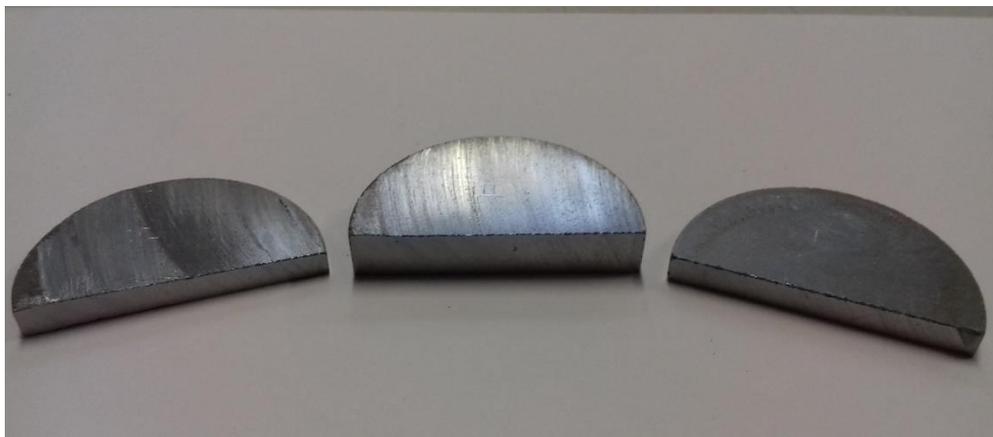


Figura 65 - Pezzi del campione B8.3 AFM I per il calcolo della densità

Il calcolo della densità dei tre pezzi è riportato nella seguente tabella:

Campione	Densità (g/cm ³)
B8.3 AFM I (Parte superiore)	7,10
B8.3 AFM I (Parte centrale)	7,06
B8.3 AFM I (Parte inferiore)	7,11

Tabella 24 - Densità dei tre pezzi del cilindro B8.3 AFM I



I risultati delle densità delle tre parti sono abbastanza vicini tra di loro e quindi si può affermare che il processo di doppia pressatura è valido e produce dei campioni abbastanza omogenei. È stata comunque effettuata una analisi al microscopio per verificare l'omogeneità dei campioni. Questa analisi è stata condotta sull'altra metà del campione, come si vede nella seguente figura:

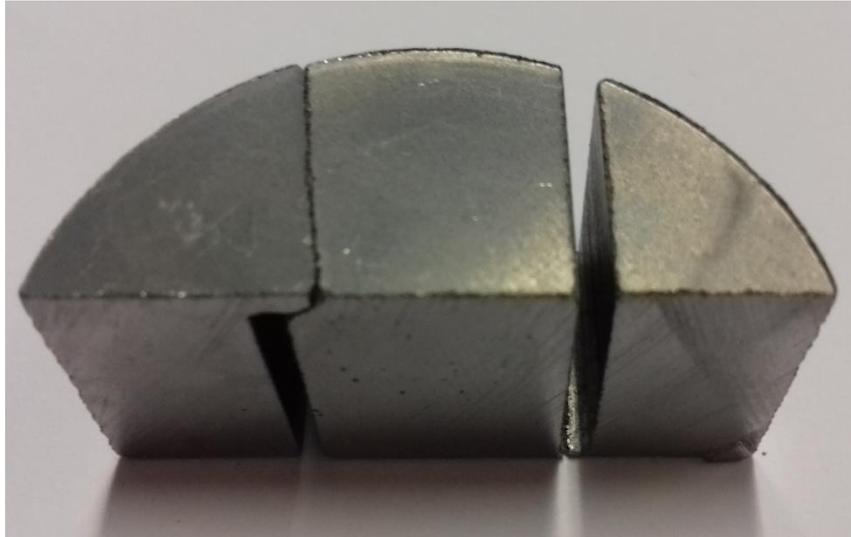


Figura 66 - Pezzi del campione da analizzare al microscopio

Si è scelto uno dei tre pezzi, quello centrale, e si è effettuata l'analisi al microscopio. Vengono elencate le principali fasi di questa analisi:

- Inglobatura: il campione viene inglobato all'interno di un materiale di tipo resina termoindurente e sottoposto a un ciclo termico con una isoterma a 155 °C per 15 minuti
- Fase di lucidatura in lucidatrice automatica con carta abrasiva: le carte abrasive utilizzate presentano una granulometria decrescente (da 180 fino a 2400)
- Fase di lucidatura in lucidatrice automatica mediante panno: in questa fase si dispone la faccia del campione da analizzare su un panno e si spruzza una sospensione diamantata. I panni utilizzati sono per granulometrie decrescenti (6, 3 e 1 micron)
- Analisi al microscopio

Nel seguito vengono riportate le immagini di ogni fase dell'analisi al microscopio.



Figura 67- Macchina inglobatrice



Figura 68 - Campione inglobato nella resina termoidurente

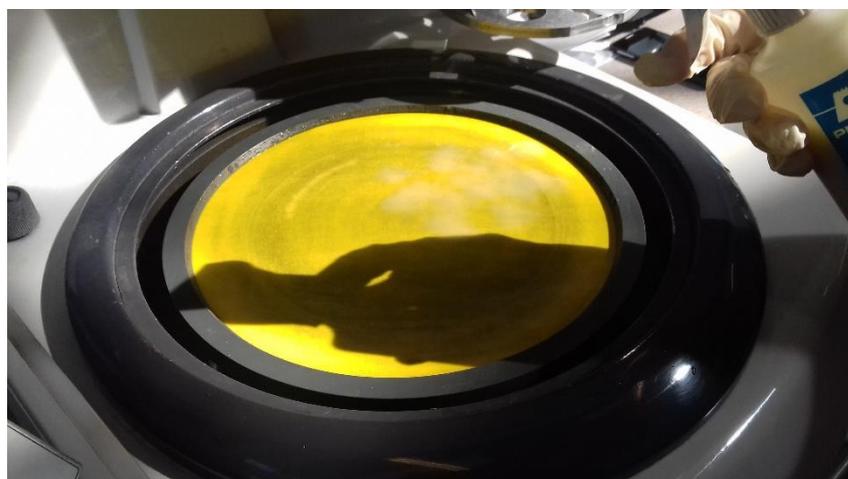


Figura 69 – Lucidatura su panno



Figura 70 - Microscopio a scansione elettronica

Si riportano quindi le immagini ottenute dall'analisi al microscopio:



Figura 71- Ingrandimento a 50x di tre parti distinte del provino

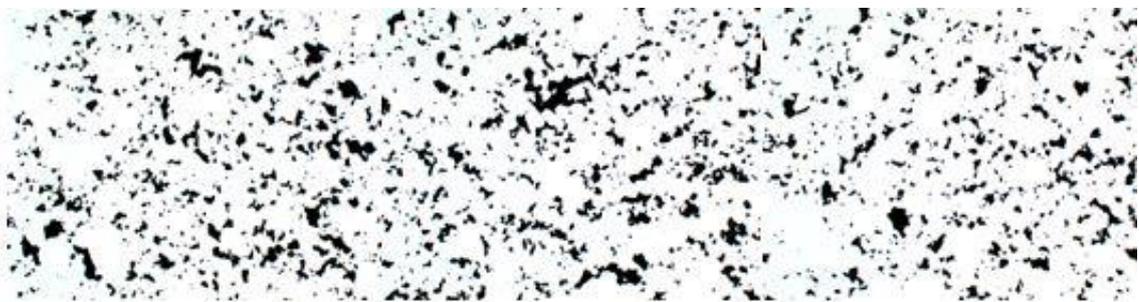


Figura 72- Ingrandimento a 100x di tre parti distinte del provino

Anche dall'analisi al microscopio è risultata evidente l'omogeneità del campione e quindi la bontà del processo di doppia pressatura.

A questo punto sono stati stampati i 12 cilindri e sottoposti al trattamento termico di Curing:



Figura 73 - Cilindri B8.3 AFM



Figura 74 - Cilindro B8.3 AFM III

La geometria finale dello statore è stata ottenuta fresando prima i lati esterni dei cilindri, come si può vedere nelle seguenti figure:



Figura 75- Prima fresatura dei cilindri

I dischi, dopo la prima fresatura, sono stati incollati tra di loro mediante colla epossidica:



Figura 76 - Cilindri da incollare

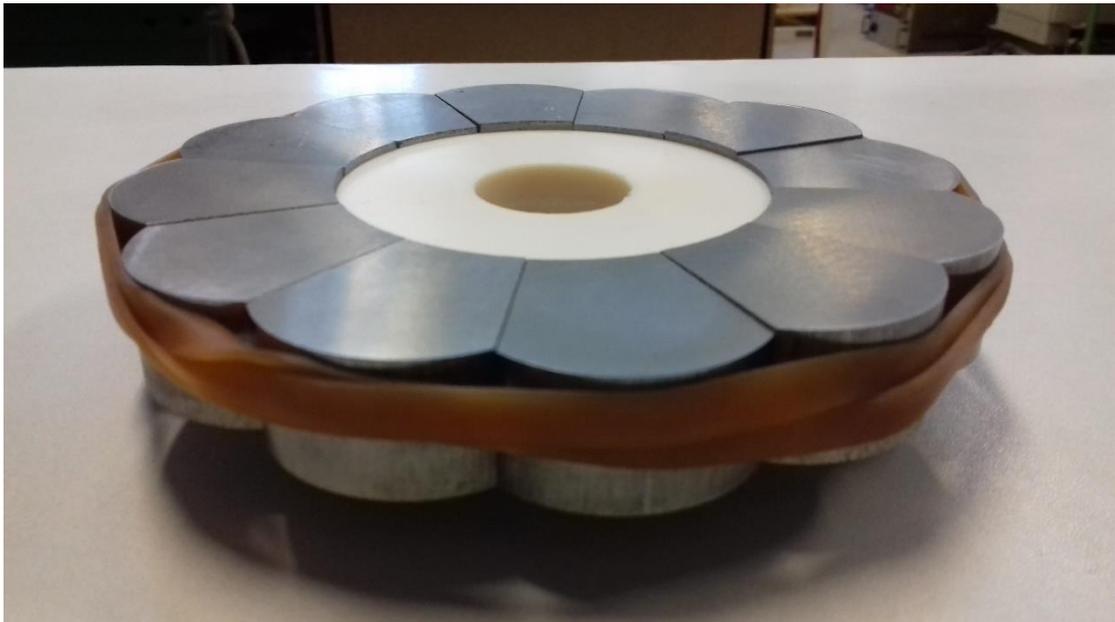


Figura 77 - Cilindri assemblati da incollare

Per la fase di incollaggio è necessario prestare particolare attenzione a non far incollare i cilindri sul supporto centrale. Il supporto utilizzato è in alluminio (come si vede in Figura 80) ed è stata utilizzata della carta da forno tra il supporto di alluminio e i singoli pezzi da incollare. Inoltre il trattamento termico per questa fase è stata di 30 minuti a 150° senza rampa, evitando in tal modo la fuoriuscita della resina epossidica.

Dopo aver estratto i 12 pezzi incollati si è proceduto con la fase di lucidatura e livellamento dello statore:

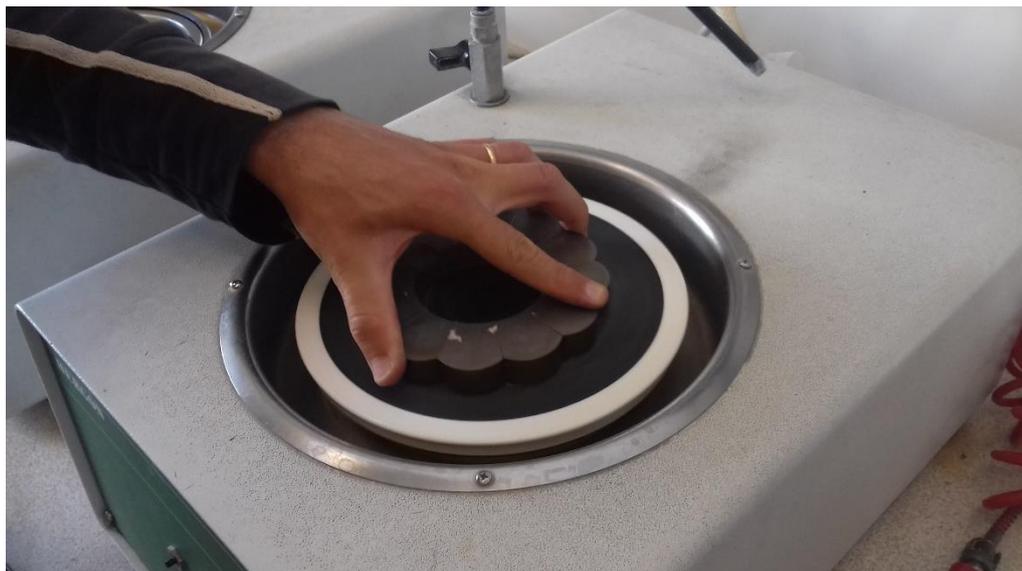


Figura 78 - Lucidatura statore

E si è ottenuto un disco livellato e perfettamente incollato:



Figura 79 - Statore lucidato e livellato

Dopo la fase di incollaggio e lucidatura si è proseguito il lavoro con la fresatura del diametro esterno di 120 mm:



Figura 80 - Fresatura dopo l'incollaggio

Si è quindi ottenuto il disco esterno e poi si è fresato lo statore in modo da ottenere il diametro esterno. Per le cave si è deciso di fresarle posizionando lo statore in posizione verticale, poggiata su un opportuno blocco:



Figura 81 - Fresatura del diametro esterno



Figura 82 - Fresatura delle aperture di cave

Purtroppo nell'ultima fase di fresatura delle cave, è stato commesso un errore di quota della fresa, e lo statore è stato distrutto dalla fresa. Nelle seguenti immagini è possibile vedere lo statore rotto dalla fresa.

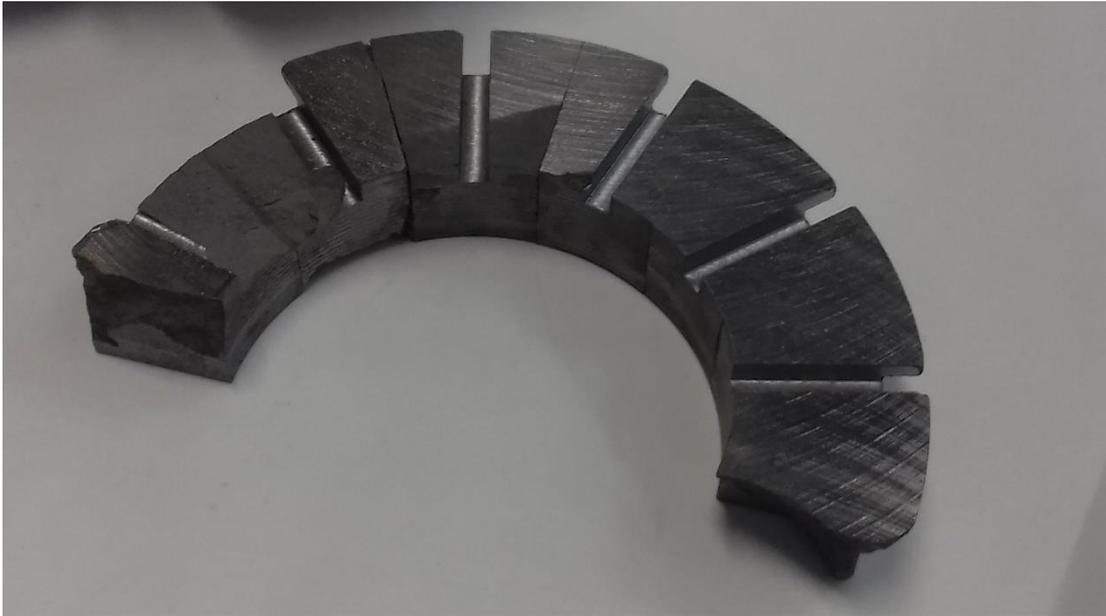


Figura 83 - Rottura dello statore a causa della fresa

Per questo motivo è stato necessario ripetere tutte le fasi precedenti: preparazione della miscela, pressatura, incollaggio e fresatura finale. Si riportano quindi le immagini del secondo statore fresato:



Figura 84 - Incollaggio del secondo statore



Figura 85 - Fresatura finale delle cave

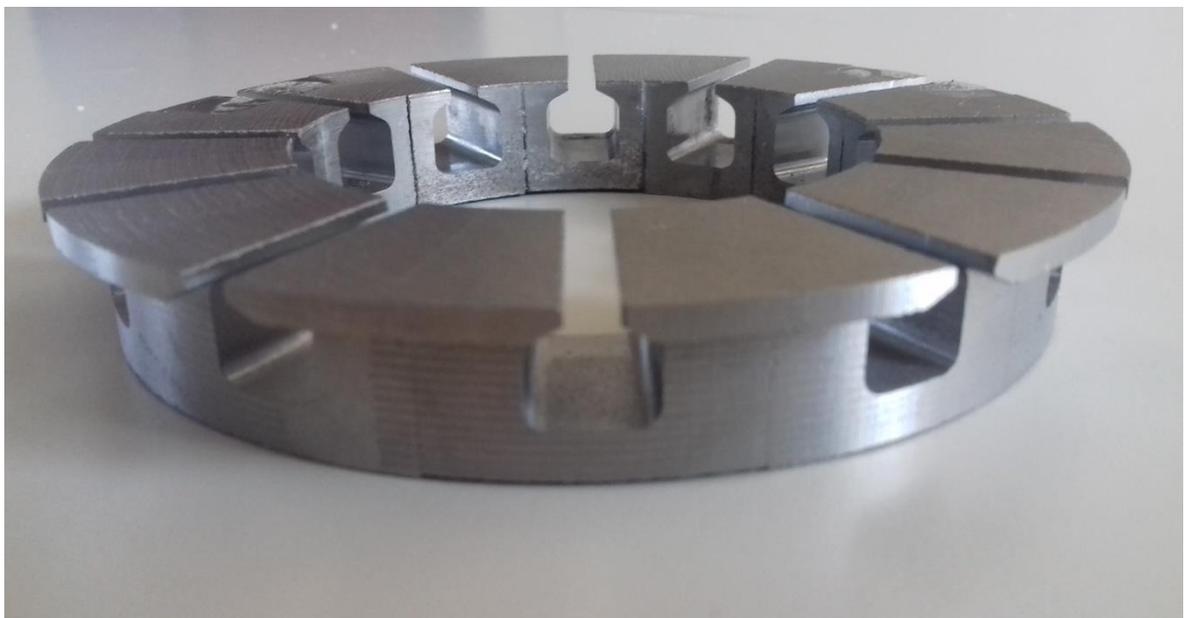


Figura 86 - Statore a fine lavorazione alla fresa

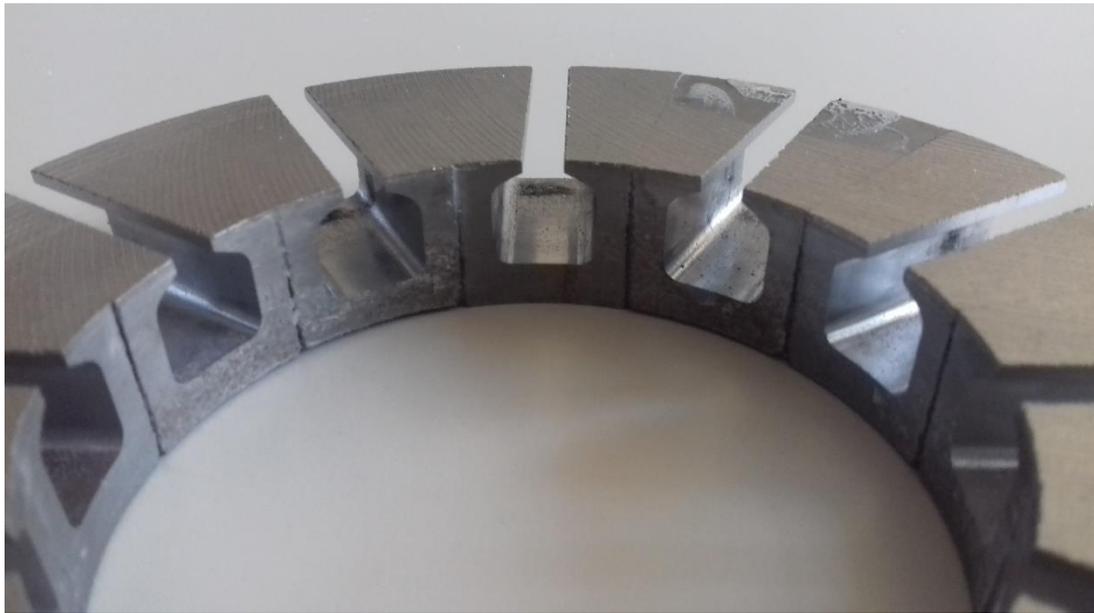


Figura 87 – Statore a fine lavorazione alla fresa

Come si può notare dalle immagini, il materiale a base di ferro e fenolica allo 0,2 % ha retto perfettamente alle vibrazioni meccaniche della fresa e non si è minimamente sgretolato.

La fase successiva è stata la scelta di un opportuno supporto da incollare sullo statore. La scelta del materiale non è stata semplice, in quanto è stato necessario valutare un materiale non metallico, a causa delle possibili correnti parassite circolanti in esso con ovvie conseguenze sul rendimento della macchina, e che al tempo stesso sia in grado di reggere alla temperatura di 150 °C per il trattamento termico di incollaggio nonché alle temperature di esercizio della macchina. I materiali testati sono stati i seguenti:

1. Resina acetica (o Poliacetalica) POM con colla epossidica:



Figura 88 - POM con colla epossidica

In questo caso il problema è risultato il diverso comportamento dei materiali, cioè la resina epossidica solidificandosi si è resa estremamente rigida e quindi ad una piccola deformazione del materiale POM consegue un totale distacco della resina epossidica solida.

2. Poliammide con colla epossidica:

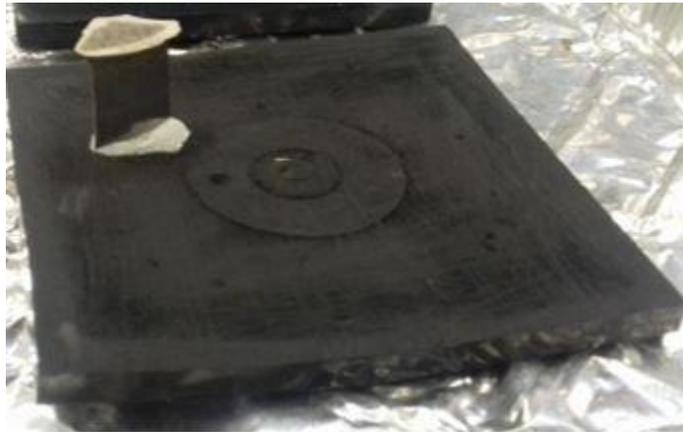


Figura 89- Poliammide con epossidica

In questo caso il processo di incollaggio è stato ottimo, infatti la giunzione è risultata più resistente degli stessi materiali. Però anche questo materiale è stato scartato in quanto si è deformato a 150 °C

3. Poliammide 6 (rinforzato con argilla) e colla epossidica

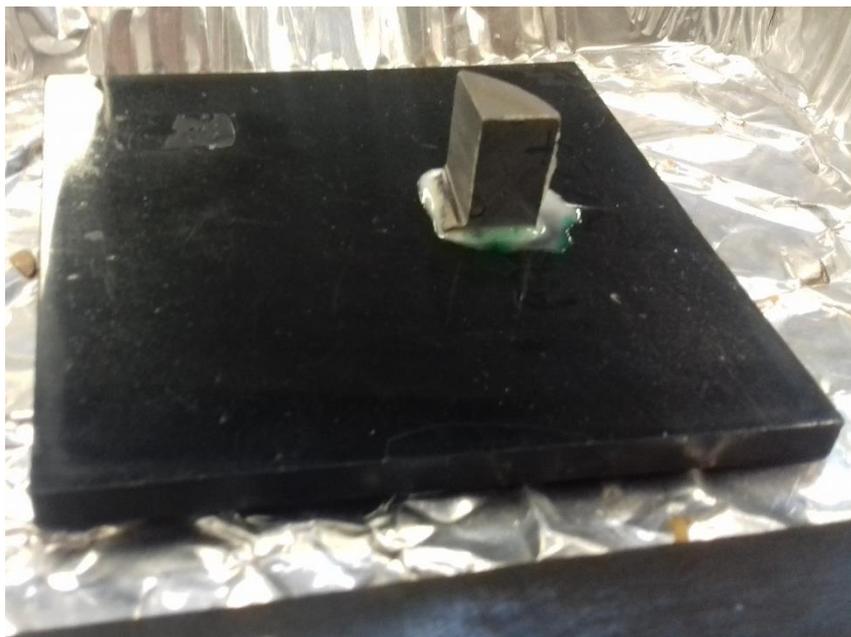


Figura 90 - Poliammide 6 con epossidica



Il materiale poliammide è risultato il migliore in quanto non si è deformato e la giunzione è risultata estremamente resistente. Come ultima possibilità si è analizzato il processo di incollaggio mediante colla acrilica, senza quindi il trattamento termico:

4. POM con colla acrilica

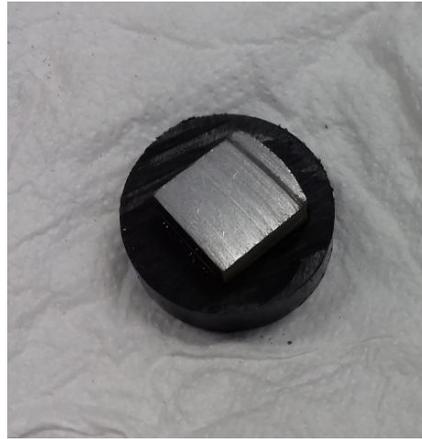


Figura 91- Acetalica (POM) con colla acrilica

Il risultato di questo incollaggio è stato ottimale e la giunzione è risultata più resistente degli stessi materiali.

Tra le possibili scelte si è deciso di optare per la terza opzione: materiale Poliammide 6 e colla epossidica. Per questa fase è stato necessario preparare le lastre di materiale e si sono seguite le fasi descritte nel seguito:

Fasi di preparazione del materiale PA6 Durethon B30S

- La prima fase è l'essiccazione dei granuli di materiale e il processo dura circa 4 ore alla temperatura di 80 °C
- Si prepara una cornice, sigillata da alluminio, nella quale vengono depositati i granuli di materiale PA6.

Le dimensioni della cornice e i dati del materiale sono:

- Lato: 17 cm
- Spessore: 3,97 mm
- Volume: 115 cm³
- Densità del materiale in granuli: 1,13 g/ cm³
- Peso in granuli di materiale per una lastra: 155,94 g



Dove da questi dati è stato possibile ricavare la quantità in peso di materiale in granuli, quantità che però viene moltiplicata per un coefficiente correttivo, pari a 1,2, che tiene conto del materiale che fuoriesce dalla lastra.

- Una volta inseriti i granuli nella cornice si ricopre con uno strato di lubrificante l'alluminio e le superfici della stessa cornice.
- Si effettua la fase di pressatura a caldo le cui fasi sono:
 - Si imposta una temperatura di 240 °C con il materiale pressato a bassa pressione
 - Raggiunta la temperatura di 240 °C si attende per circa 3 minuti
 - Si porta la pressione a 150 bar per circa 3 minuti
 - Segue una fase di avvicinamento e allontanamento delle piastre calde, al fine di eliminare la formazione di bolle nel materiale
 - Si raffredda ad acqua fino alla temperatura di 85 °C

Le seguenti immagini mostrano le fasi di lavorazione e le lastre finali di PA6 Durethon ottenute:



Figura 92 - Cornice o stampo della lastra

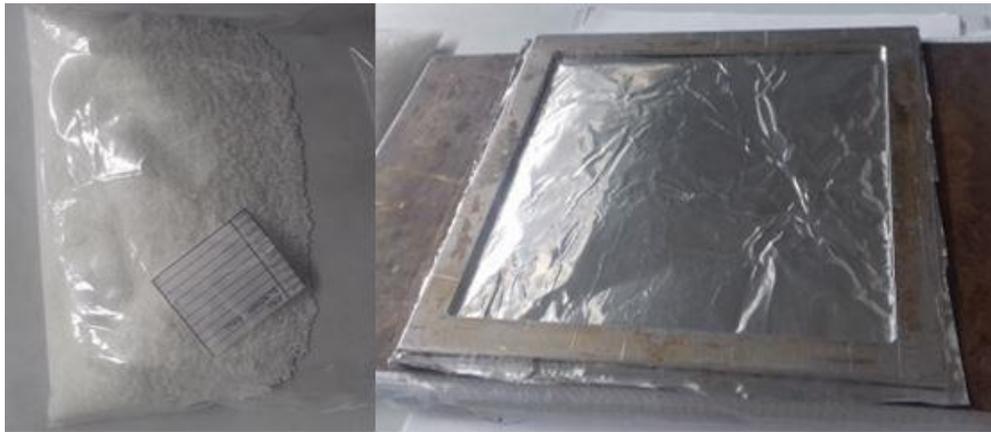


Figura 93 - Materiale PA6 in granuli (sinistra) e lastra chiusa con l'alluminio



Figura 94 - Granuli di PA6 disposti nello stampo



Figura 95 - Pressa a caldo



Figura 96 - Lastra in PA6 (sinistra) e statore da incollare con colla epossidica

La fase di incollaggio non è andata a buon fine, in quanto la lastra preparata è stata troppo sottile e si è deformata. Il danno per lo statore non è stato gravissimo ma è stato necessario incollare i pezzi che si sono separati.

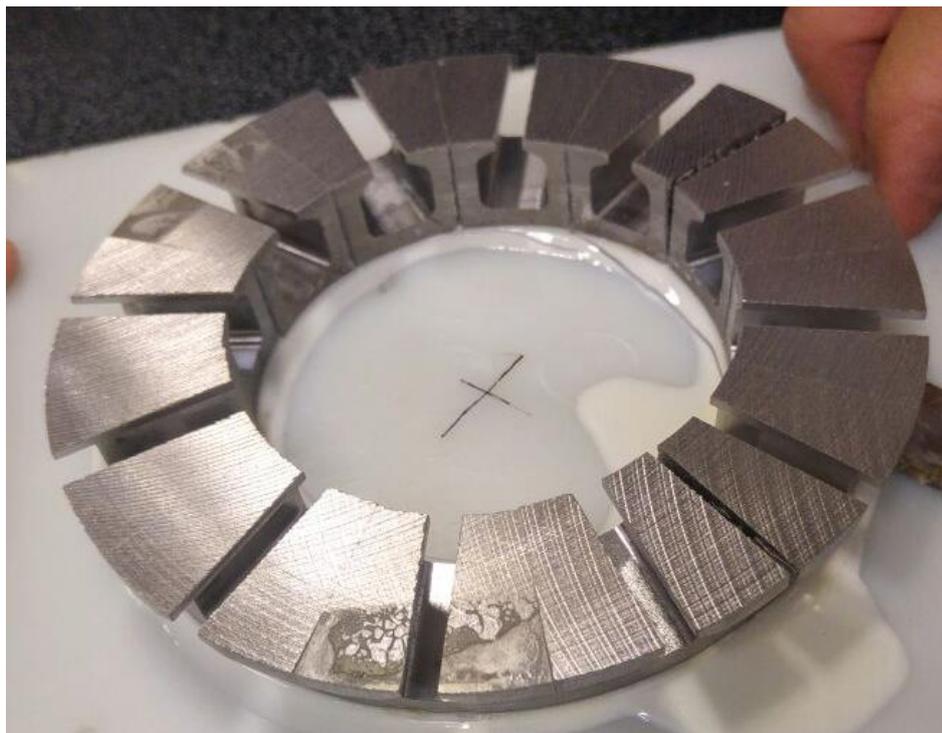


Figura 97 - Deformazione del materiale PA6 incollato su statore

A questo punto, avendo già visto i buoni risultati ottenuti con la colla acrilica e il materiale POM, si è deciso di utilizzare questo materiale. Inoltre i pezzi dello statore sono stati anch'essi incollati con colla acrilica, in quanto ha già dato degli ottimi risultati di incollaggio sul primo statore realizzato. Nelle seguenti immagini è possibile vedere lo statore incollato sul suo supporto in materiale poliacetalico.



Figura 98 - Statore incollato con colla acrilica su supporto di materiale poliacetalico

5.3. Avvolgimenti

Una fase particolarmente delicata è la preparazione dell'isolamento degli avvolgimenti in rame. In questo paragrafo verranno descritte tutte le fasi di preparazione degli avvolgimenti e il processo di isolamento.

Le bandelle vengono innanzitutto ottenute da un rotolo di rame opportunamente tagliato:



Figura 99 - Taglio delle bandelle da rotolo di rame

Le bandelle tagliate presentano le seguenti dimensioni:

- Lunghezza: 1,2 m
- Larghezza: 7,1 mm
- Spessore iniziale: 0,2 mm

I bordi delle bandelle presentano delle irregolarità, ovvero devono essere laminate a freddo mediante una macchina a rullo azionata da un motore asincrono. Calibrando la macchina sono state ottenute con la laminazione a freddo i seguenti spessori, misurati in punti diversi della bandella:

- Spessore al centro: 0,202 mm
- Spessore al bordo: 0,197 mm



Figura 100- Laminazione a freddo delle bandelle

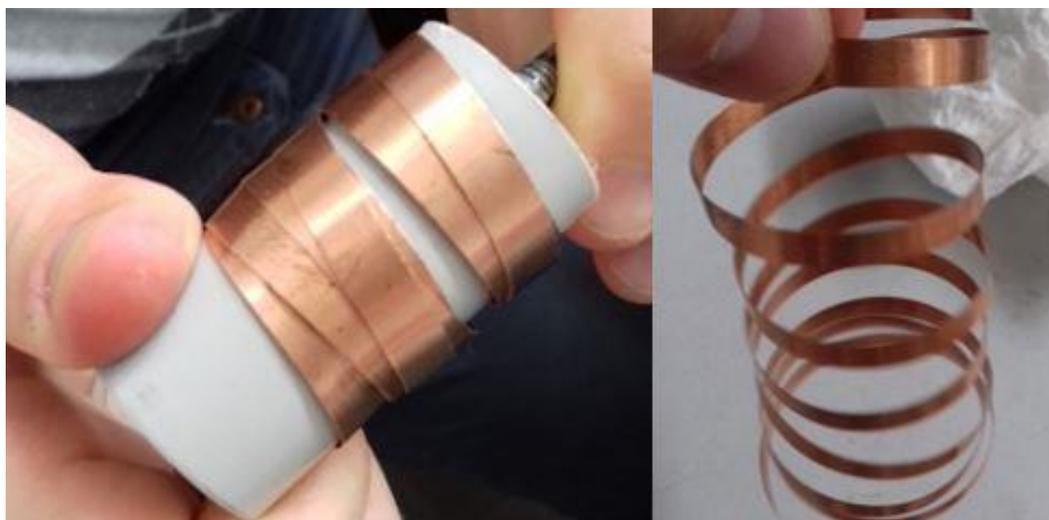


Figura 101 - Bandelle di forma elicoidale

Le bandelle laminate sono state avvolte attorno ad un cilindro, in modo da ottenere una forma elicoidale. Questo passaggio risulta necessario per facilitare il processo di rivestimento, ovvero il bagno nella vernice, e per evitare che le bandelle tocchino le superfici del forno. Si è inoltre effettuato un foro all'estremità della bandella per poterla appendere nel forno. È stato quindi possibile procedere con la fase effettiva di rivestimento: il banco prova presenta:

- Tre becher contenenti: sostanza sgrassante (NaOH), sostanza neutralizzante (H_2SO_4) e vernice commerciale per il rivestimento galvanico
- Tre becher contenenti acqua distillata
- Alimentatore controllato in tensione

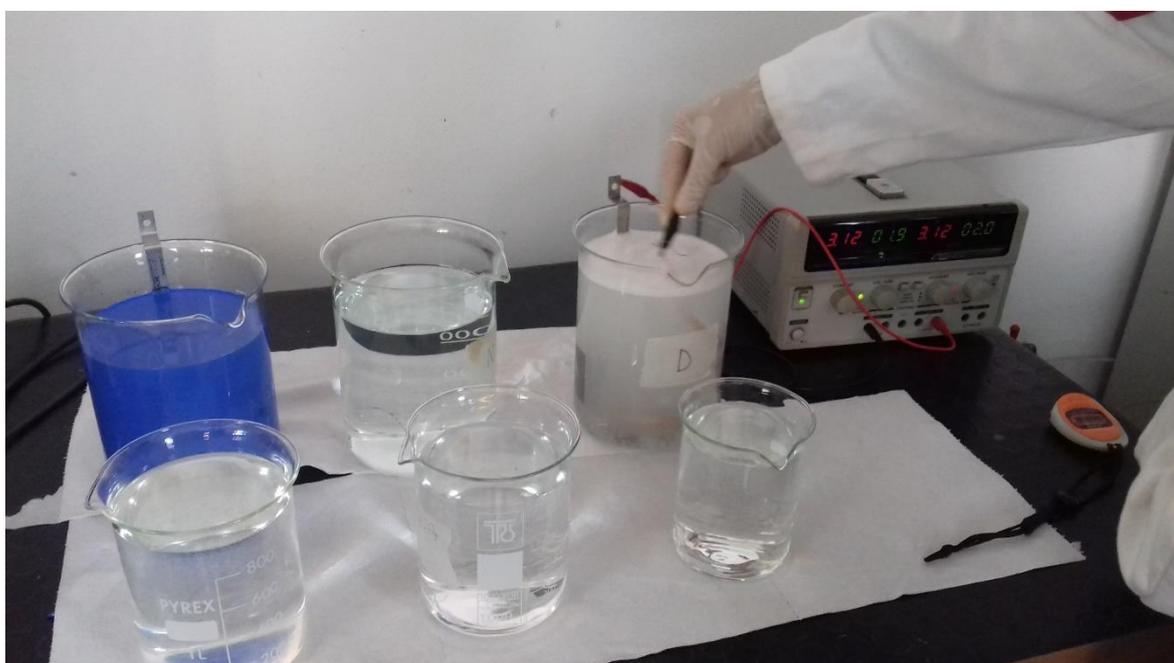


Figura 102 - Banco per il rivestimento di isolante

La preparazione viene effettuata nel modo seguente: la bandella viene collegata all'anodo (morsetto negativo dell'alimentatore), mentre il catodo (morsetto positivo dell'alimentatore) è connesso direttamente alla vaschetta dello sgrassante mediante un elettrodo. Si connettono in serie il master e lo slave del generatore, in modo da ottenere due generatori di tensione in serie e volendo una regolazione in tensione, si pone la manopola della corrente al massimo e si regola soltanto quella della tensione. Regolando la tensione ad un determinato valore otteniamo una tensione doppia, in quanto stiamo regolando due generatori in serie. Il valore

desiderato di tensione di alimentazione è 6V e quindi si regolerà l'alimentatore per 3V (due generatori da 6V in serie). Avviata l'alimentazione si immerge la bandella nello sgrassante per circa 40 secondi e poi la si immerge nell'acqua distillata. Poi si immerge la bandella, senza alimentazione, nella soluzione neutralizzante per circa 30 secondi e poi la si immerge nuovamente nell'acqua distillata. A questo punto è necessario procedere con l'asciugatura mediante aria compressa, per togliere l'eccesso d'acqua e la formazione di bolle d'aria, che impediscono il corretto rivestimento.



Figura 103 - Asciugatura con compressore

Le bandelle vengono quindi inserite nel forno, già caldo, alla temperatura di 80 °C. Dopo aver recuperato le bandelle dal forno si procede con la verniciatura. Per questa fase si è valutato inizialmente un valore di 7 secondi, sulla base di prove precedenti e misure condotte mediante oscilloscopio. Cioè mediante oscilloscopio è stata ottenuta una costante di tempo pari a 3,5 secondi e quindi si è scelto un tempo di deposito pari a due costanti di tempo: 7 secondi. In realtà questo tempo è risultato insufficiente per un corretto rivestimento e quindi

si è prolungato il tempo fino a 9 secondi. In futuri lavori sarà necessario svolgere un calcolo più accurato sulla costante di tempo, in modo da minimizzare la quantità di isolante, che aumenta considerevolmente lo spessore delle bandelle e quindi riduce la quantità di rame da disporre nelle cave.

La fase di rivestimento con la vernice viene effettuata collegando la bandella al morsetto negativo dell'alimentatore e l'elettrodo della vaschetta è connesso al morsetto positivo. Si imposta una tensione di alimentazione di 55V (ovvero due generatori da 27,5V) e si immerge l'elettrodo nella vernice per circa 9 secondi. Le bandelle vengono infine asciugate nuovamente con il compressore e poi poste nel forno, già caldo, a 160 °C per 30 minuti.



Figura 104 - Bandella immersa nella vernice



Figura 105 - Asciugatura delle bandelle con compressore

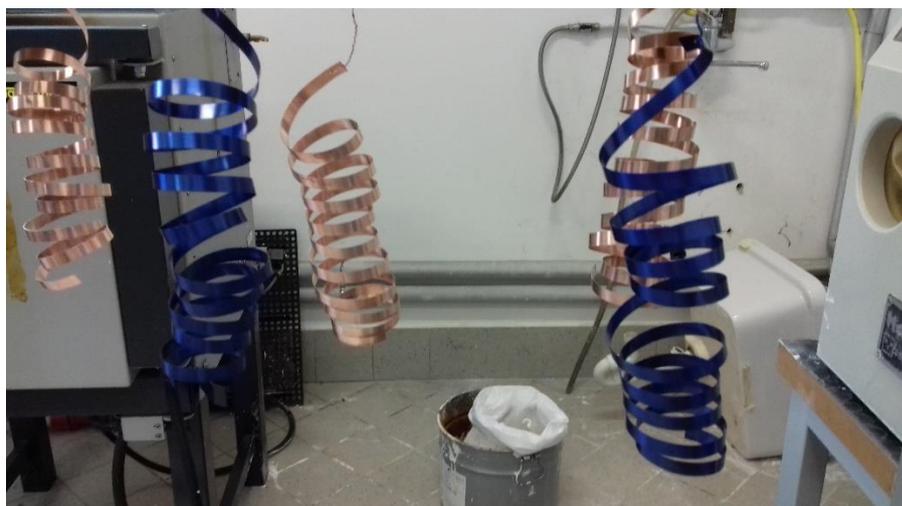


Figura 106 - Bandelle appese per l'asciugatura

Come ultima operazione sono state effettuate le misure di rigidità dielettrica:

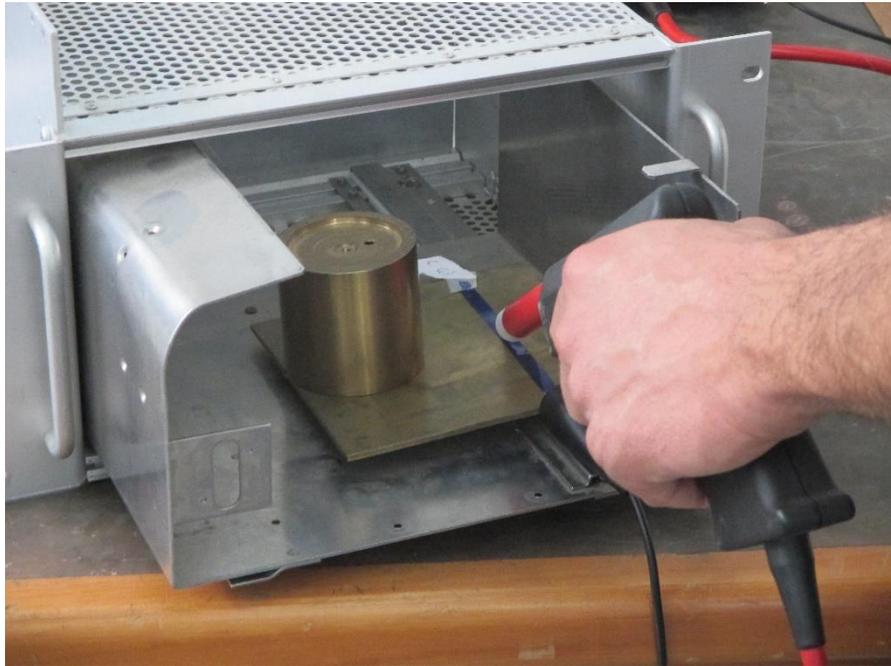


Figura 107 - Misure di rigidità dielettrica

Dalle prove di rigidità dielettrica condotte sulle bandelle, sono stati ottenuti dei valori variabili da un massimo di 330V a un minimo di 20V.

5.4. Avvolgimento e misure

L'ultima fase della realizzazione del prototipo è l'avvolgimento e le misure di induttanza e resistenza condotte su ogni singola bobina. Su ogni singolo dente è stata avvolta una bobina e per migliorare l'isolamento tra la bobina e i denti di statore si è utilizzato del materiale Kapton opportunamente sagomato, come si può vedere nelle seguenti figure:

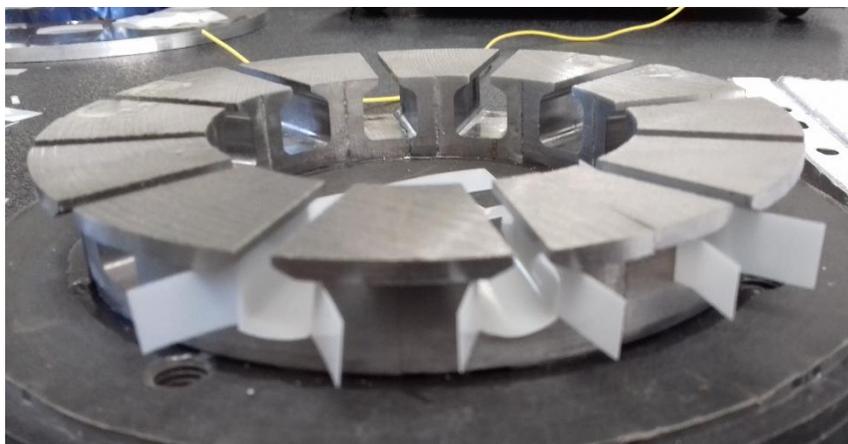


Figura 108 - Kapton per l'isolamento tra bobine e statore



Figura 109 - Avvolgimento bandelle



Figura 110 - Avvolgimento bandelle



Figura 111 - Avvolgimento bandelle

Dopo aver terminato la fase di avvolgimento sono state misurate le resistenze e le induttanze a 1 kHz di ciascuna bobina. Si riportano quindi i risultati ottenuti:

BANDELLA	INDUTTANZA L (μH)	RESISTENZA R (Ω)
	1kHz	1 kHz
1	22,5	0,029
2	23,5	0,023
3	22,6	0,031
4	23,4	0,028
5	23,3	0,026
6	22,4	0,027
7	23,1	0,027
8	23,3	0,024
9	22,8	0,030
10	23,1	0,027
11	23,3	0,034
12	22,5	0,026

Tabella 25- Misure di induttanza e resistenza a 1 kHz

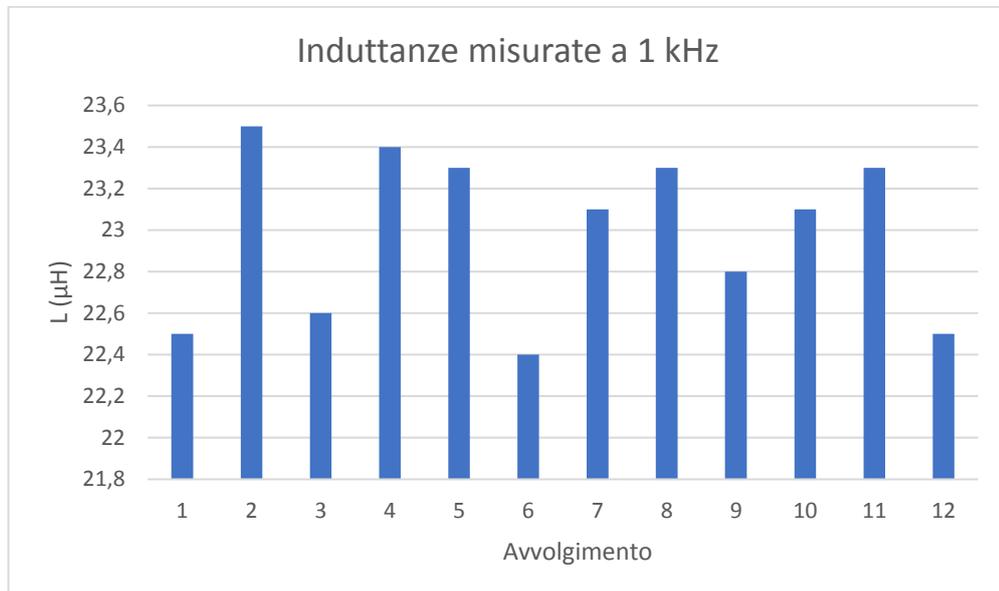


GRAFICO 48 - Induttanze delle bobine misurate a 1 kHz

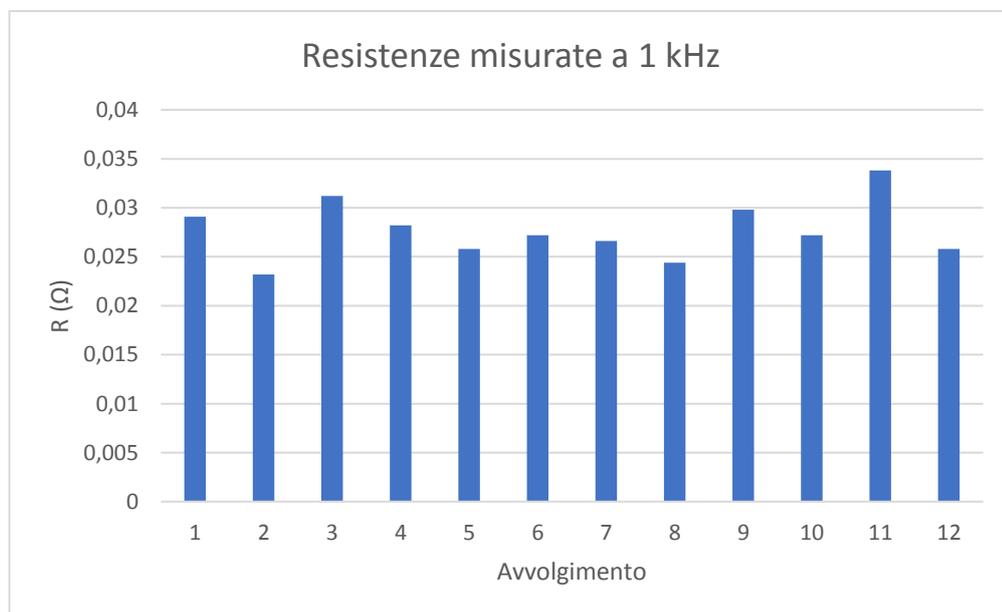


GRAFICO 49 - Resistenze delle bobine misurate a 1 kHz



CAPITOLO 6

In questo capitolo verranno descritte le prove effettuate sul motore, con la descrizione dei diversi banco prova utilizzati e le difficoltà incontrate, dovute sia ai limiti elettrici che meccanici del banco prova. Saranno quindi presentati i risultati di interesse delle misure effettuate.

RISULTATI SPERIMENTALI

6.1. MISURE DI COGGING TORQUE

La prima misura effettuata sul motore è stata la prova di cogging torque. Questa coppia è dovuta al naturale posizionamento del rotore sulle zone di minima riluttanza, ovvero il motore tende naturalmente ad allinearsi in modo da massimizzare le superfici affacciate dei denti di statore con i magneti permanenti. Questo naturale allineamento provoca delle ondulazioni di coppia indesiderate, presenti quindi anche in assenza di alimentazione, e una minimizzazione di questa coppia è fondamentale, al fine di ottenere degli azionamenti per alte prestazioni, con precisione sia nel controllo di posizione che di velocità.

Il banco prova utilizzato per questa misura è costituito da un motore passo-passo calettato su un albero, su cui è connesso il rotore affacciato allo statore. Sull'albero è disposto un torsionometro con valore di fondo scala pari a 200 mNm. L'albero non è unico ma sono più alberi connessi mediante giunti elastici elicoidali. Il motore passo-passo provvede a far ruotare il rotore secondo dei piccoli passi, scelti opportunamente, e la conseguente torsione dei giunti elastici, dovuta ai posizionamenti naturali del rotore sulle posizioni di minima riluttanza, viene tradotta in un segnale elettrico dal torsionometro, il quale invia i segnali a una opportuna scheda di acquisizione dati, ottenendo le misure di coppia su un giro completo del rotore.



Figura 112 - Banco prova per la misura di cogging torque (sinistra), torsionometro e giunto elastico (destra)



Figura 113 - Banco prova per la cogging torque con statore montato

La misura è stata effettuata con diversi valori decrescenti del traferro. Le difficoltà di questa misura sono state causate principalmente dalla forte attrazione tra statore e rotore. Infatti per evitare possibili distruzioni del motore, causate dal forte impatto tra statore e rotore, sono stati inseriti sui denti di statore degli spessori da 2 mm in gomma, in modo da assorbire l'impatto e rendere più semplice il distacco tra le due parti. Inoltre è stato necessario costruire una tazza meccanica, in materiale acetatico, con cuscinetti appositi. In tal modo si è fatta aderire la struttura di statore a quella di rotore con diversi spessori, e quindi con diversi traferri.

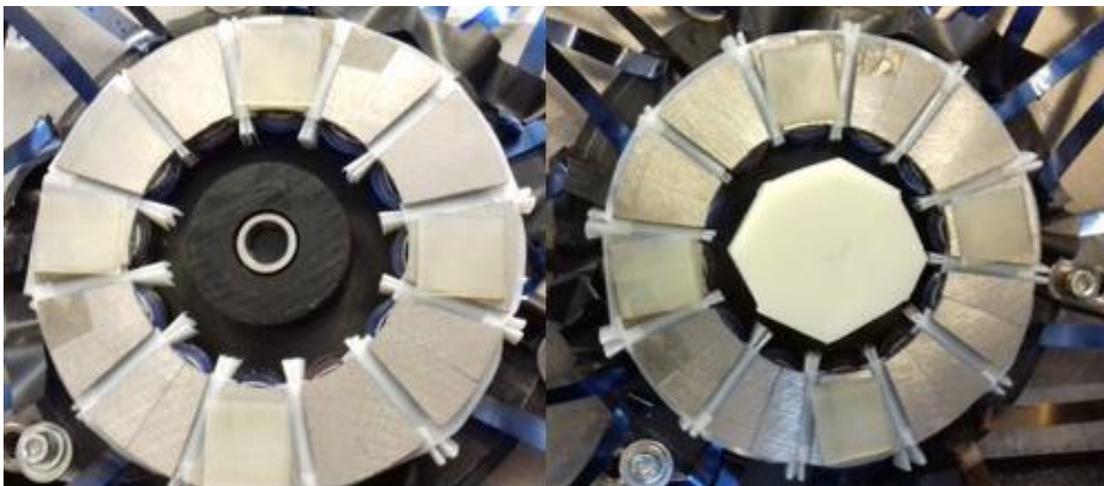


Figura 114 - Tazza centrale e supporti in gomma sui denti di statore (sinistra), supporto per traferro



Le misure di cogging, come detto precedentemente, sono state effettuate per diversi valori di traferro decrescenti. Le misure sono state effettuate prima con un traferro di 7 mm, poi si è scesi ad un traferro di 4,3 mm, ad un traferro di 3,8 mm e infine si è arrivati ad un traferro minimo di 3 mm. In questa prova sono risultati evidenti i limiti del banco prova, infatti per traferri al di sotto dei 3 mm, il rotore si stacca dall'albero e si aggancia allo statore, inoltre, data la leggera flessibilità dell'albero, si creano delle leggere inclinazioni dell'albero stesso che impediscono l'ottenimento di un traferro costante, rendendo quindi inutili le prove condotte.

Nel seguito si riporta esclusivamente la misura di cogging torque più interessante, ovvero quella misurata con un traferro minimo di 3 mm:

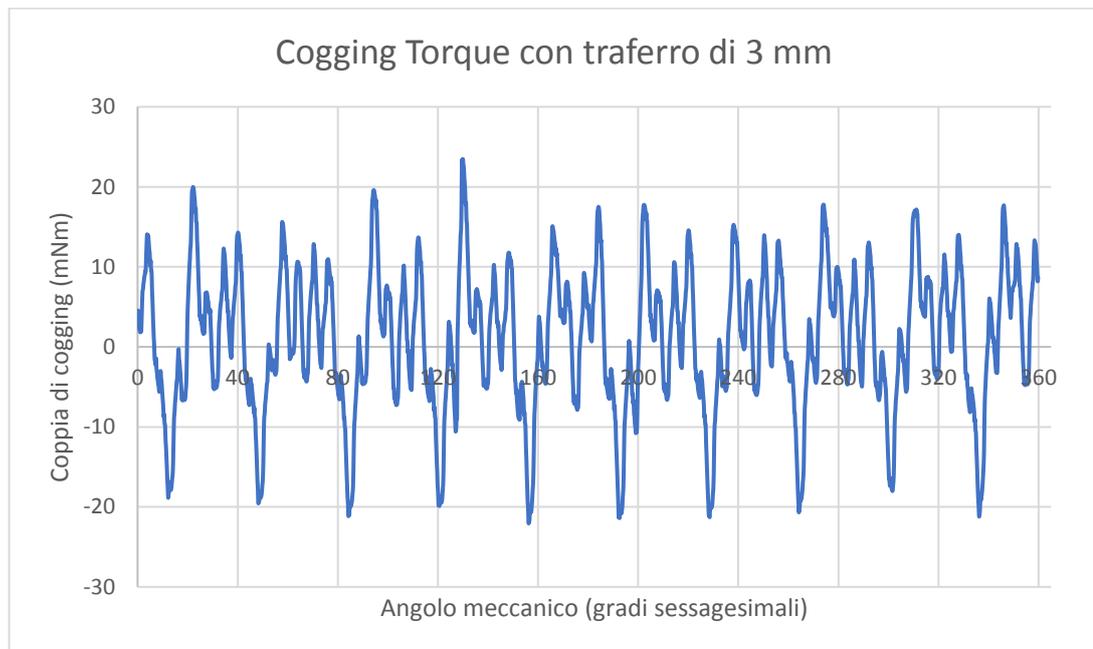


Figura 115 - Coppia di cogging con traferro di 3 mm

La coppia di cogging è stata misurata ogni $0,18^\circ$ meccanici, cioè il motore passo-passo è stato impostato per dare 2000 steps su un giro meccanico completo del rotore. La coppia presenta un valore massimo, leggermente più alto degli altri valori massimi, di 22 mNm in corrispondenza dell'angolo meccanico di 130° , ma complessivamente si ha una buona simmetria della forma d'onda.

6.2. PROVE A VUOTO

La seconda prova effettuata sul motore è stata la prova a vuoto, ovvero la misura delle forze elettromotrici indotte sulle tre fasi dello statore. La prova è stata effettuata sul banco prova utilizzato per la misura della cogging torque, ma in questo caso si è utilizzato un motore primo, per azionare il rotore, in corrente continua. Il torsionmetro, con valore di fondo scala da 200 mNm è stato utilizzato per l'acquisizione dei dati, ovvero per la misura di velocità di rotazione del rotore e di coppia. Le misure vengono inviate ad una scheda di acquisizione dati, e dalle fasi del motore vengono misurati i flussi e le forze elettromotrici indotte. Il controllo di velocità del motore primo è effettuato mediante software di controllo. Nelle seguenti immagini è possibile vedere il banco prova e un esempio di schermata su video del sistema del software utilizzato:

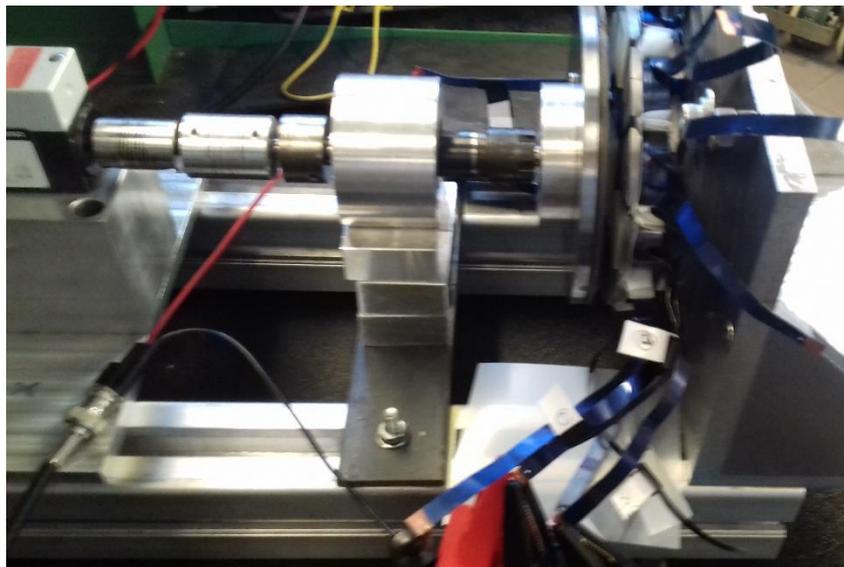


Figura 116 - Particolare del banco prova per la misura delle forze elettromotrici indotte



Figura 117 - Banco prova con alimentatore stabilizzato

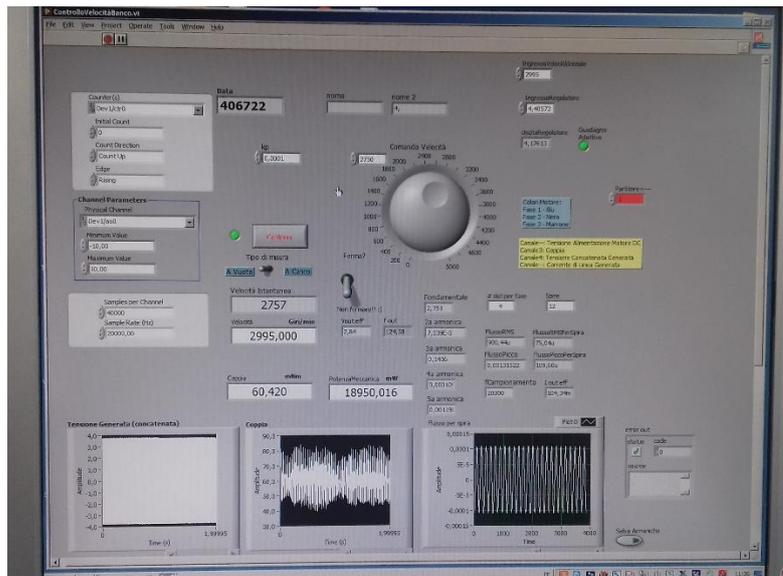


Figura 118 - Esempio di schermata software per la misura delle f.e.m indotte

Come si vede nella Figura 126, il motore primo è alimentato da un alimentatore da banco, il quale può erogare una potenza massima di 85 W. Questo limite, insieme al limite di corrente massima di 10A, non permette di andare ad elevatissimi valori di velocità di rotazione del rotore. Inoltre per questa prova è stato necessario effettuare la saldatura delle fasi, dove ogni fase è avvolta su 4 denti di statore. Le prove sono state effettuate per diversi valori del traferro e si riportano i risultati corrispondenti al minimo traferro raggiunto, ovvero un traferro di 3 mm. Inoltre le misure sono state effettuate partendo da un valore massimo di 3000 rpm fino ad un valore minimo di 500 rpm, seguendo un passo di 250 rpm. Si riportano quindi i principali risultati di interesse:

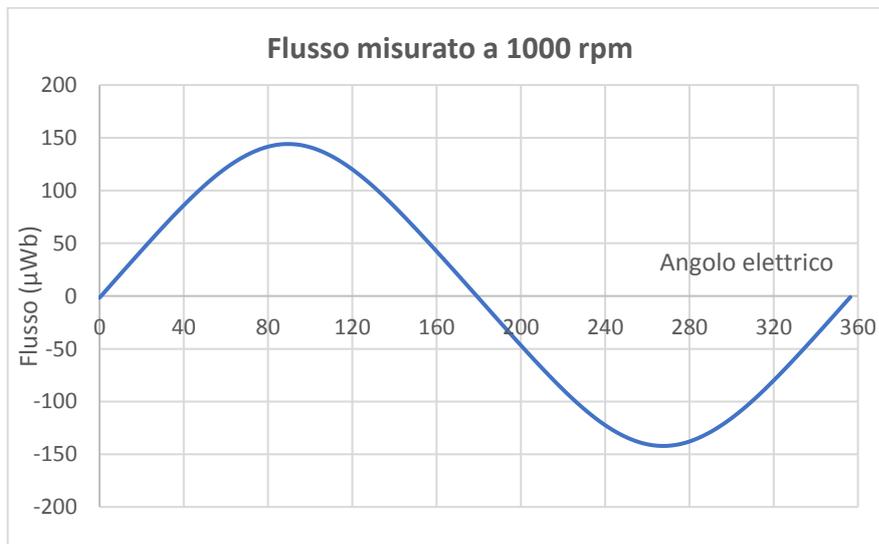


GRAFICO 50 - Misura del flusso a 1000 rpm

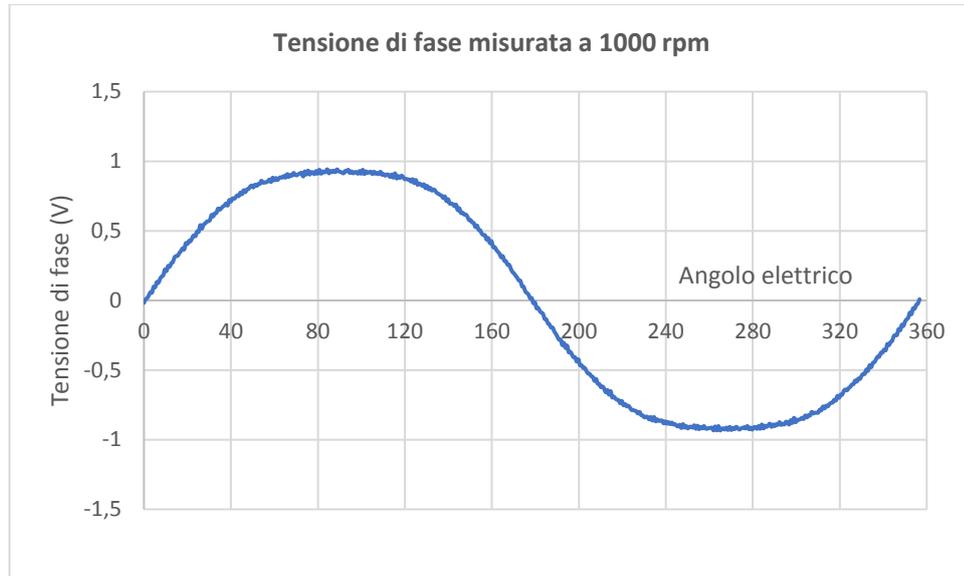


GRAFICO 51 - Tensione di fase misurata a 1000 rpm

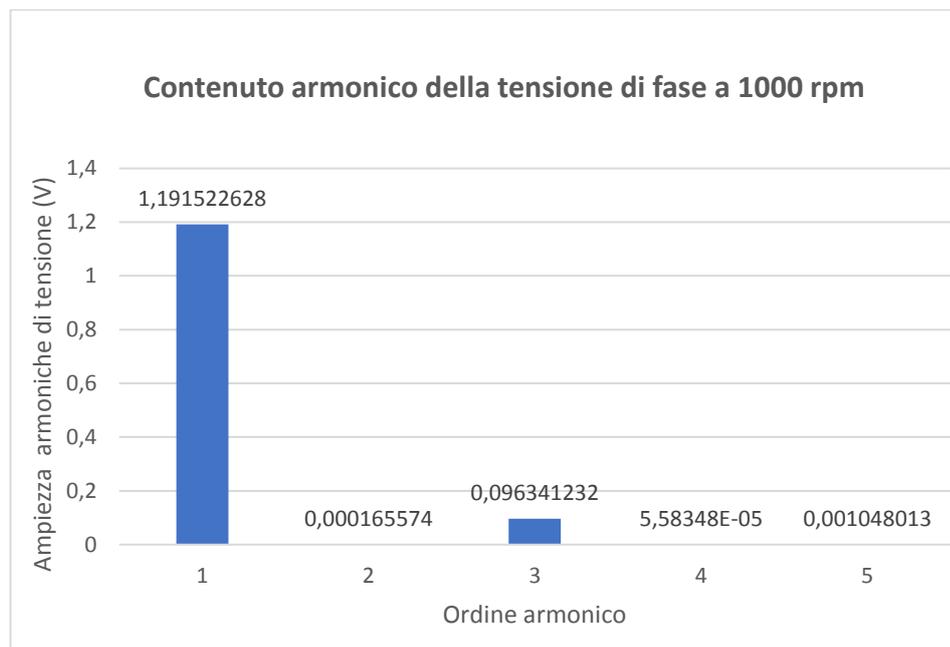


GRAFICO 52 - Ampiezza delle armoniche di tensione di fase

Si è quindi ottenuto un fattore di distorsione armonica totale pari a:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_2^n V_n^2}}{V_1} = 8,1 \%$$

dove il contributo della terza armonica è pari all' 8.08%.



Si riportano quindi le misure delle tensioni concatenate, misurate alle diverse velocità:

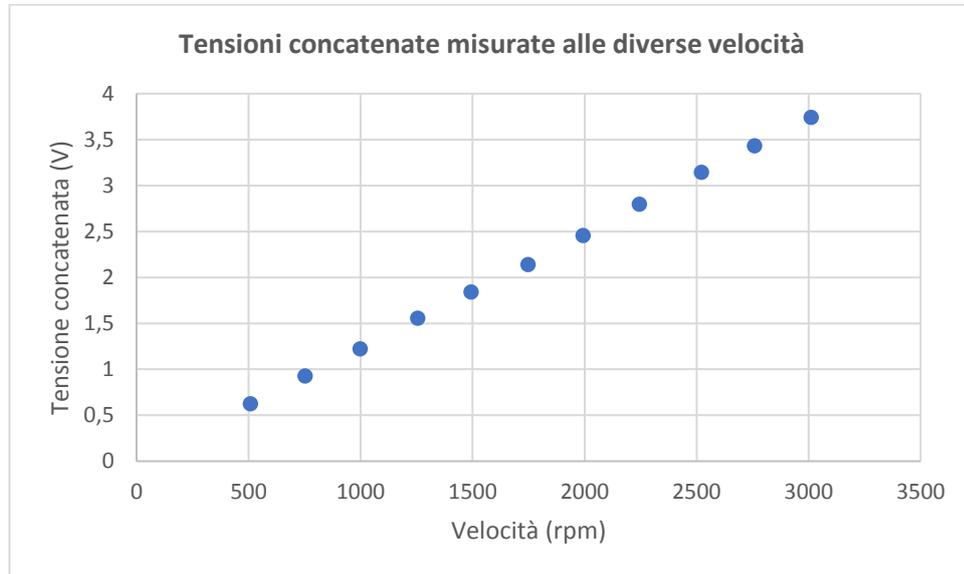


GRAFICO 53 - Misura delle tensioni concatenate alle diverse velocità

Si calcola infine il valore della costante di forza elettromotrice K_E , che risulta pari a:

$$K_E = 0,07 \frac{V}{rps}$$

Dalla prova a vuoto sono state infine valutate le perdite a vuoto della macchina. Mediante il torsiometro sono state effettuate le misure di velocità e coppia resistente, dal cui prodotto è possibile ottenere la potenza persa a vuoto. La coppia misurata a vuoto presenta una forma analitica data da un termine proporzionale alla velocità e un termine noto:

$$C_0 = 0,00656 \omega + 29,5 \text{ mNm}$$

Il termine proporzionale alla velocità è legato alla quota di perdita dovuta alle correnti parassite. Il termine noto invece esprime la quota di perdite dovute all'attrito e ai cuscinetti. Si ottiene quindi:

$$P_{fe} = 0,00656 \omega^2 + 29,5 \omega \text{ mW} = P_{cp} + (P_{attr} + P_{cusc})$$

6.3. PROVE A CARICO

Come terza prova effettuata sul motore si è svolta la prova a carico. Questa prova è stata effettuata sullo stesso banco prova utilizzato per le prime due prove, descritte precedentemente, ed è stata effettuata connettendo le tre fasi del motore alle tre resistenze di carico connesse a stella. La prova è stata effettuata utilizzando tre valori diversi delle resistenze di carico:

- Rcarico di 2 Ω
- Rcarico di 1 Ω
- Rcarico di 0,5 Ω

e le misure sono state effettuate utilizzando un wattmetro trifase con inserzione Aron. Nelle seguenti immagini è possibile vedere il banco prova con il wattmetro e i tre resistori variabili connessi a stella.

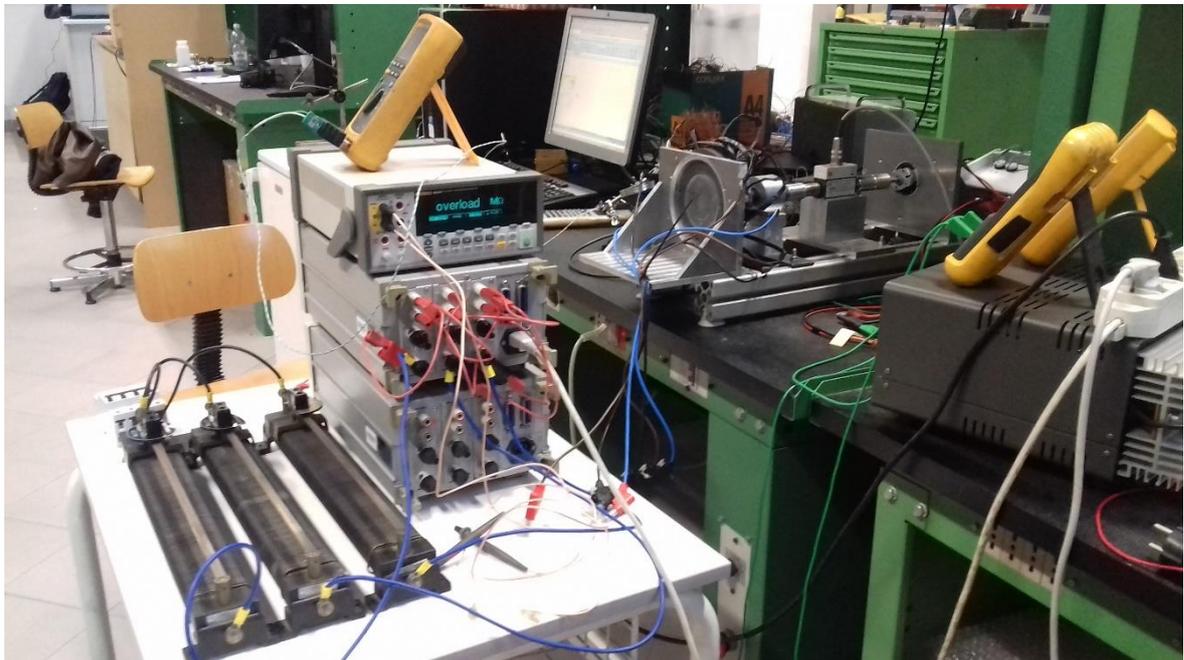


Figura 119 - Banco prova per la prova a carico

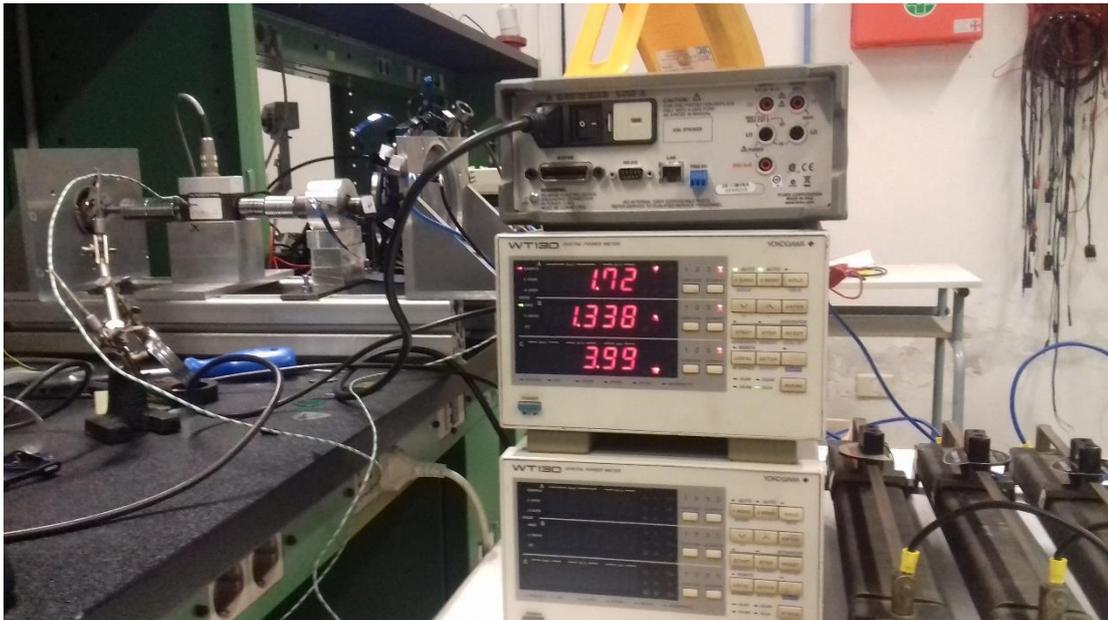


Figura 120 - Banco prova per la prova a carico

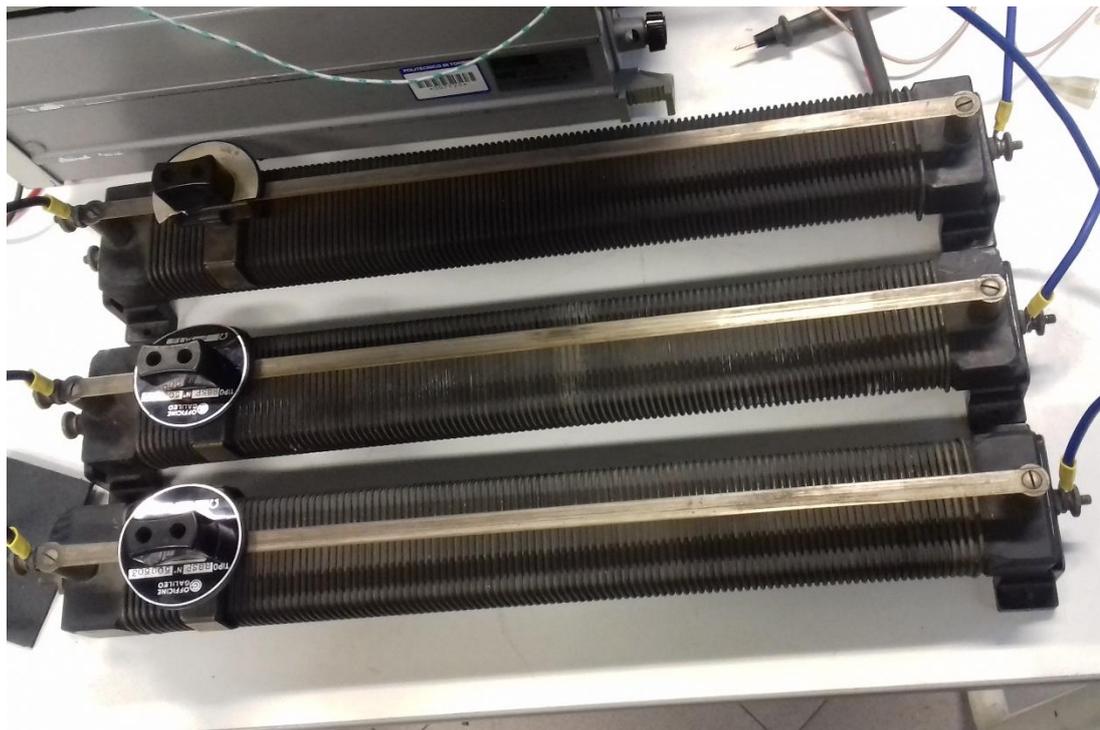


Figura 121 - Resistori di carico

Il problema principale che si è avuto durante questa prova sono state le elevatissime correnti assorbite, molto più alte rispetto a quelle previste. Inoltre si è presentato spesso il problema di perdita di controllo della velocità del motore. Dopo un po' di verifiche si è capito che il

problema è stato causato dal non perfetto isolamento delle bandelle, con conseguente circolazione della corrente nella carcassa del banco prova e conseguenti correnti assorbite molto più elevate. Per questo motivo è stato necessario isolare le testate degli avvolgimenti mediante nastro isolante, come si può vedere nelle seguenti figure:

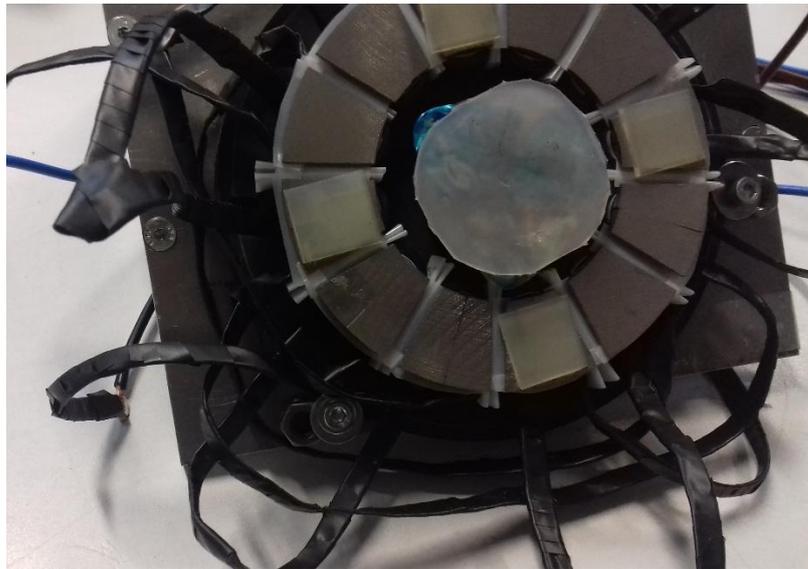


Figura 122 - Isolamento delle testate con nastro isolante

A questo punto si è potuto procedere con le misure, le quali sono state effettuate a velocità differenti, da una velocità minima di 300 rpm fino ad una velocità massima imposta dalla massima corrente raggiunta, quindi in funzione della resistenza di carico connessa.

Si riportano i risultati di interesse delle misure effettuate:

Misure a inizio prova	
Temperatura ambiente (°C)	21,4
Resistenza di fase (Ω)	0,099
Temperatura resistenza (°C)	23,2
Misure a fine prova	
Temperatura ambiente (°C)	22
Resistenza di fase (Ω)	0,106
Temperatura resistenza (°C)	24,5

Tabella 26 - Dati prova con resistenza di carico a 0,5 Ω



Misure a inizio prova	
Temperatura ambiente (°C)	20,5
Resistenza di fase (Ω)	0,097
Temperatura resistenza (°C)	23,2
Misure a fine prova	
Temperatura ambiente (°C)	21,5
Resistenza di fase (Ω)	0,099
Temperatura resistenza (°C)	25,4

Tabella 27 - Dati prova con resistenza di carico a 1 Ω

Misure a inizio prova	
Temperatura ambiente (°C)	20,5
Resistenza di fase (Ω)	0,096
Temperatura resistenza (°C)	21,9
Misure a fine prova	
Temperatura ambiente (°C)	21,5
Resistenza di fase (Ω)	0,102
Temperatura resistenza (°C)	25,6

Tabella 28 - Dati prova con resistenza di carico a 2 Ω

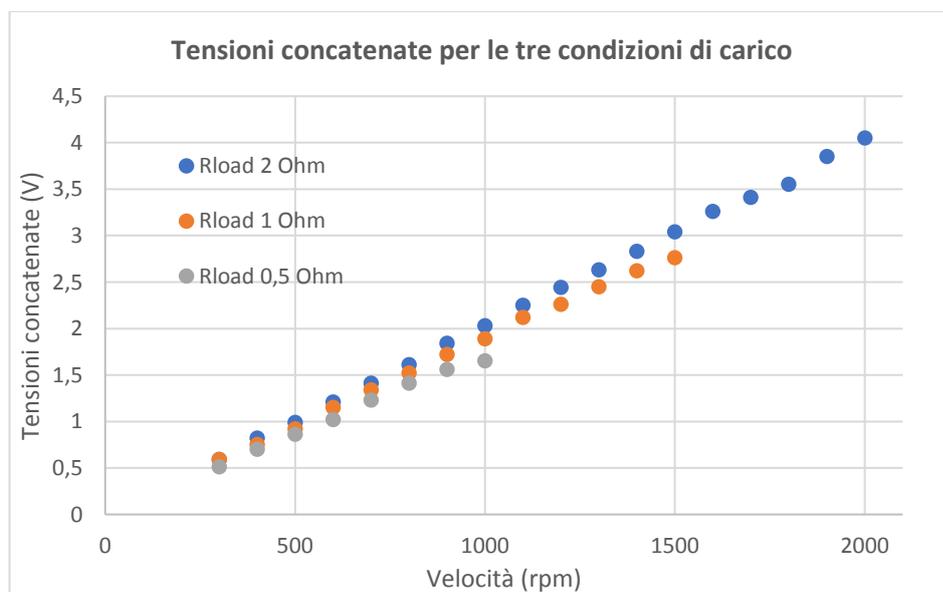


GRAFICO 54 - Tensioni concatenate misurate alle tre condizioni di carico

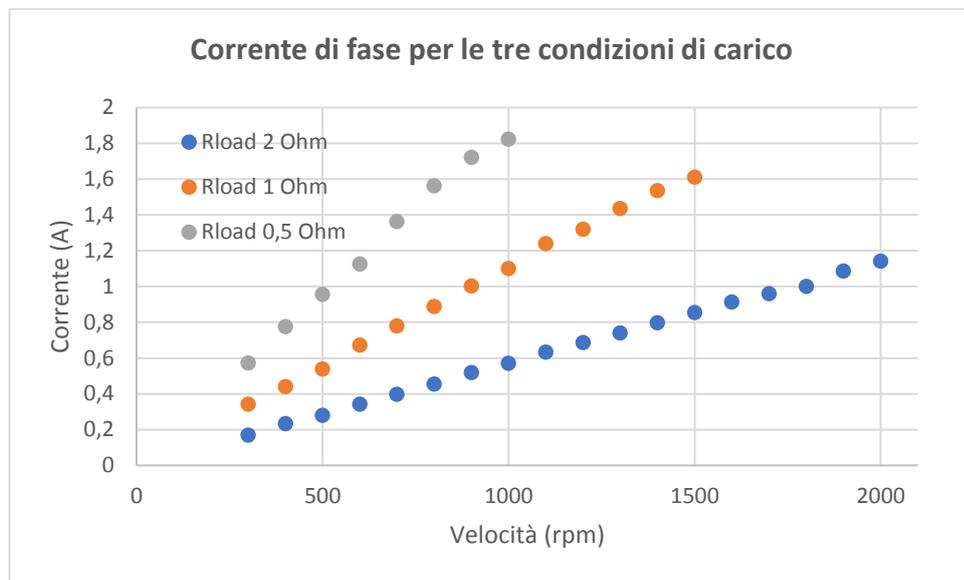


GRAFICO 55 - Corrente di fase per le tre condizioni di carico

6.4. PROVA CORRENTE – COPPIA

La quarta prova svolta è stata la misura della costante di coppia del motore K_T (Nm/A). La prova è stata eseguita sul banco prova con torsionometro con valore di fondo scala pari a 50 Nm. Nella seguente figura è possibile vedere il banco prova utilizzato per questa misura:



Figura 123 - Statore e rotore montati sul banco prova

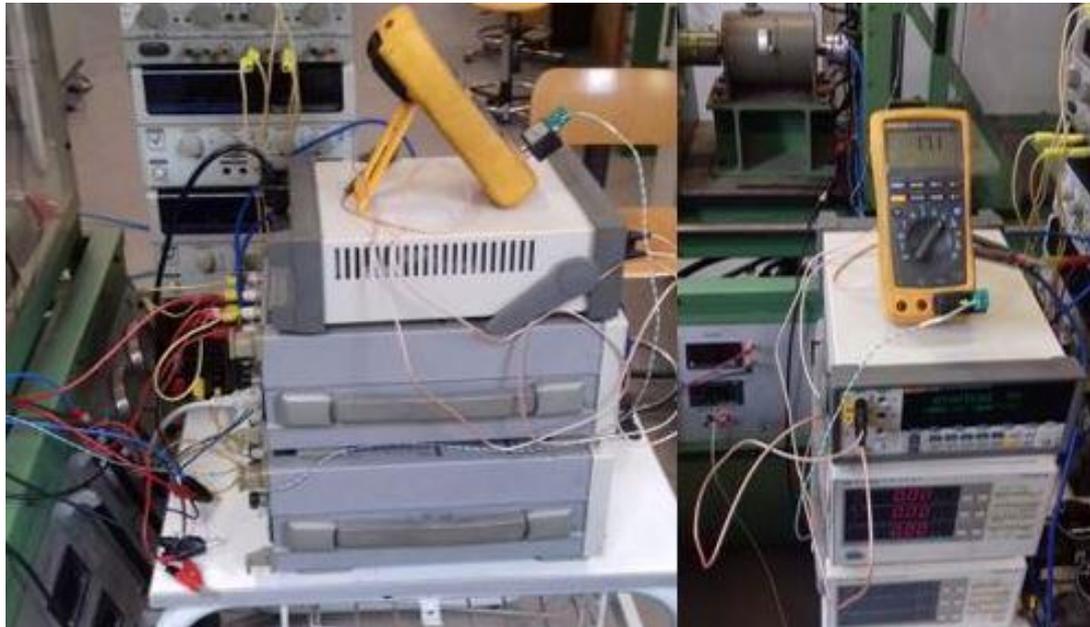


Figura 124 - Banco prova per la misura della costante di coppia



La misura è stata effettuata alimentando il motore in corrente continua e con collegamento opportuno, indicato nella Figura 125, si ottiene un funzionamento equivalente da alimentazione in uno dei sei stati dell'inverter trifase:

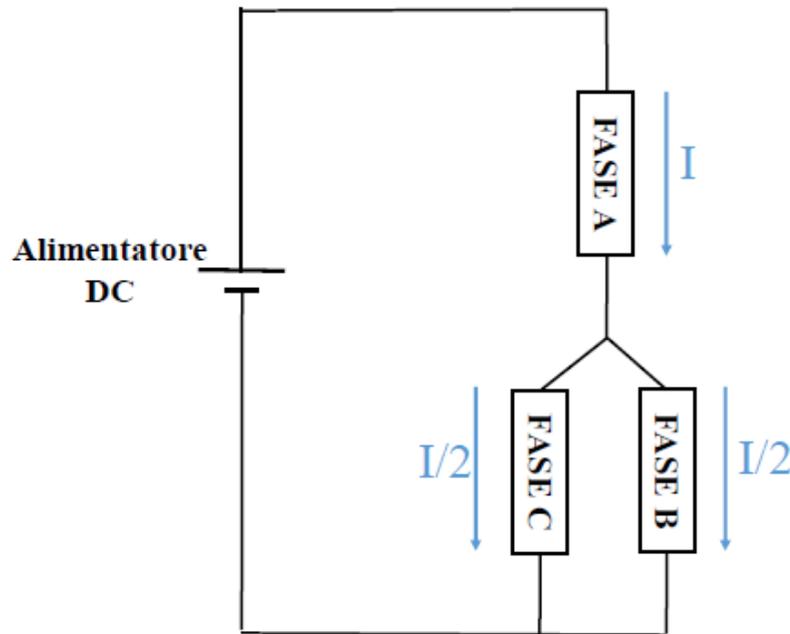


Figura 125 - Schema collegamento fasi per la prova corrente-coppia

Dallo schema si può notare che le tre fasi del motore sono state collegate a stella e il morsetto di una delle tre fasi è stato collegato al morsetto positivo dell'alimentazione, i morsetti rimanenti delle altre due fasi sono stati collegati al morsetto negativo dell'alimentazione. Le tre fasi saranno percorse da una corrente doppia, nella fase collegata al morsetto positivo dell'alimentazione, rispetto alla corrente nelle altre due fasi. La prova quindi viene quindi eseguita monitorando queste proporzioni di corrente e girando manualmente il rotore fino a quando non viene letto il massimo valore di coppia, misurato con il torsionmetro. Questo massimo valore di coppia corrisponde ad una condizione particolare: quando si hanno i vettori di flusso dei magneti e di corrente in quadratura, si ottiene il massimo valore di coppia misurata. La misura è stata condotta per il valore di traferro utilizzato per le altre prove, ovvero un traferro di 3 mm. Sono stati presi i valori di corrente nelle tre fasi e due valori di tensione, corrispondenti ad una rotazione in senso orario e antiorario del rotore. Dei due valori misurati è stata fatta la media, al fine Nel seguito si riportano i principali risultati di interesse.

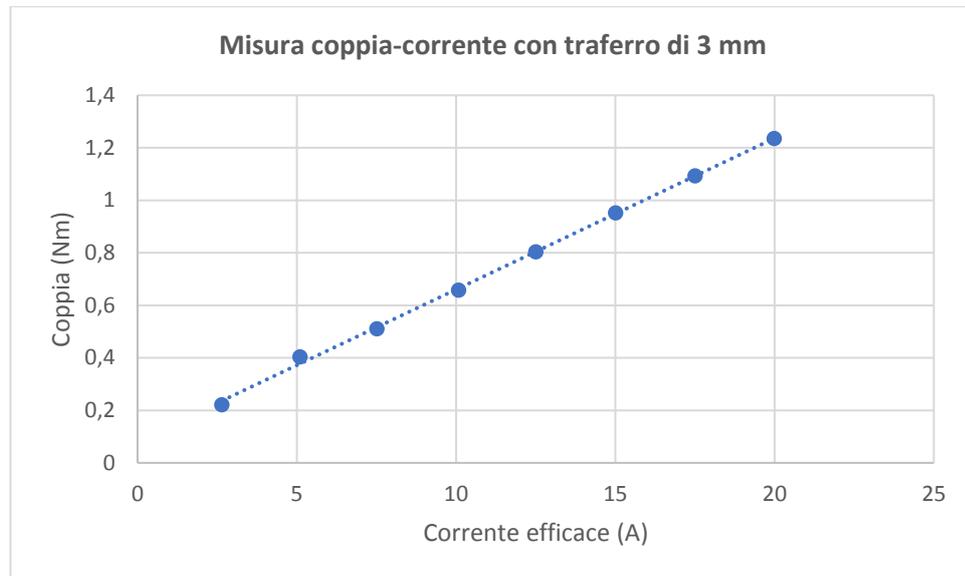


GRAFICO 56 - Misura coppia- corrente traferro 3 mm

Dalle misure si è quindi ottenuta una costante di coppia pari a:

$$K_{T_misurato} = 0,058 \frac{Nm}{A}$$

Il risultato ottenuto dal calcolo analitico è pari a:

$$K_{T_simulazione} = 0,06 \frac{Nm}{A}$$

6.5. MISURA FORZE ASSIALI

L'ultima prova effettuata sul motore è stata la misura della forza assiale di attrazione tra statore e rotore. Questa misura meccanica risulta molto importante in quanto rappresenta uno dei punti più critici di questa tipologia di motore. Infatti la forte attrazione tra statore e rotore può provocare urti dannosi durante il funzionamento del motore e avere dei dati relativi alle forze di attrazione massime, in funzione dei diversi traferri, permette un corretto dimensionamento meccanico dei cuscinetti e del supporto in cui alloggiare il motore. La prova è stata eseguita per ultima in quanto potenzialmente distruttiva per il motore. Questa prova è stata condotta utilizzando il banco prova per le misure di trazione e presenta una cella di carico da 5000N.

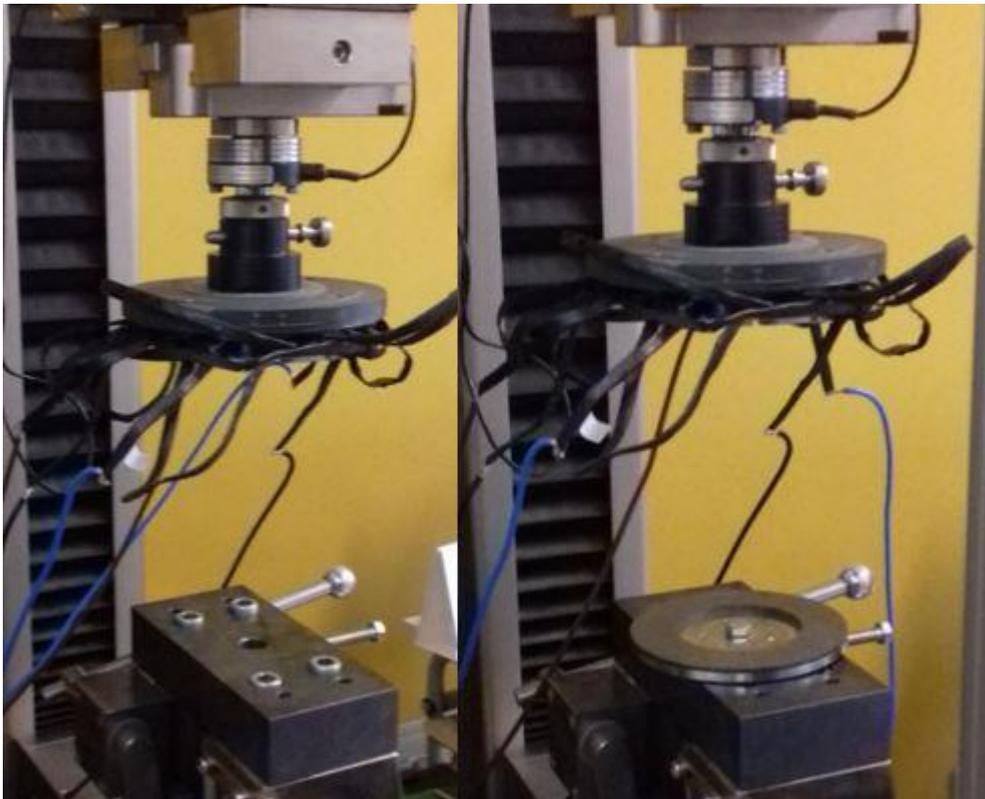


Figura 126 - Banco prova per la misura della forza assiale

Come si può vedere nella Figura 126, lo statore è stato disposto sulla parte superiore del banco prova, mentre il rotore è stato posizionato nella parte inferiore e avvitato ad un mandrino mediante una vite posizionata nel centro del rotore. Per questa misura è stato necessario calibrare la macchina, ovvero valutare una distanza massima nella quale è possibile considerare nulla la forza di attrazione tra statore e rotore, e poi si è partiti da una distanza ottenuta mediante dei blocchetti Johnson in materiale ceramico.



È importante osservare i cavi del motore sono stati avvolti attorno all'albero banco prova, in modo da non misurarne il peso e quindi ottenendo delle misure non valide. Partendo quindi da un valore di 5 mm di traferro sono state prese le misure di forza per traferri decrescenti, misurando in particolare le forze ottenute in corrispondenza dei traferri utilizzati per le prove precedenti di cogging torque e di prove a vuoto e a carico. Il risultato delle misure è riportato nel seguente

Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. Dal grafico è possibile notare che si è riusciti a misurare la forza fino ad un valore di traferro minimo pari a 1mm. Non si è andati al di sotto di questo traferro in quanto valori superiori di forza assiale avrebbero potuto staccare lo statore dal suo supporto, con conseguenze probabilmente distruttive. Da una estrapolazione dei risultati misurati, mediante una linea di tendenza polinomiale di terzo grado, si è ottenuto un valore di forza, corrispondente al traferro nominale pari a:

Traferro di progetto (mm)	Forza assiale F (N)
0,8	498

Tabella 29 - Forza assiale di progetto



CAPITOLO 7

CONSIDERAZIONI FINALI

7.1. Problematiche riscontrate

La realizzazione del prototipo ha presentato una serie di difficoltà di tipo tecnico: la prima grossa difficoltà è stata la fresatura dei singoli denti del rotore. Infatti si è utilizzato un metodo di fresatura dei dodici denti già incollati anziché lavorare il singolo pezzo. Questa scelta è legata alle velocità di lavorazione della fresa e anche alla difficoltà nel trovare dei piani di riferimento su cui fresare i singoli denti. Sicuramente in un'ottica di produzione industriale si seguirebbe la lavorazione per singoli pezzi, in quanto meno laboriosa e meno rischiosa in caso di errori durante la fase di lavorazione. Il secondo aspetto critico è stata la preparazione dell'isolamento degli avvolgimenti. Infatti la scelta delle bandelle sicuramente ha permesso un risparmio degli spazi e quindi delle maggiori occupazioni di rame nella cava con risparmio dei tratti attivi, sede di perdite Joule, ma l'isolamento non sempre è risultato ottimale, soprattutto a causa dei bordi, su cui è molto difficile far depositare la vernice isolante. Nel corso delle prove queste problematiche sono state tutte risolte con nuovi isolamenti fatti direttamente sulle testate, e nei casi peggiori le bandelle sono state del tutto sostituite. Infine si sono presentati una serie di problemi dovuti al banco prova. Infatti il banco prova non ha permesso di ottenere dei traferri inferiori ai 3 mm, questo proprio a causa della forte attrazione tra statore e rotore, che causa flessioni con conseguente incollaggio delle due parti di macchina. Inoltre è stato anche molto difficile ottenere un traferro perfettamente costante, a causa sia delle vibrazioni che della non perfetta altezza dei denti.

7.2. Sviluppi futuri

Utilizzare le polveri pressate apre interessanti scenari per la realizzazione di macchine elettriche. Tra i possibili miglioramenti sicuramente c'è lo studio di materiali con percentuali di resina ancora inferiori allo 0,2% senza compromettere le proprietà meccaniche del motore. Oltre alla ricerca di nuove resine e quindi nuove ricette più prestanti, sia meccanicamente che magneticamente, si potrebbe pensare a nuove tecniche di pressatura, ovvero pressare le polveri orientando i granuli di materiale mediante l'applicazione di un campo magnetico.



Quindi si potrebbe studiare lo stesso prototipo utilizzando questi materiali o svilupparne altri di geometria diversa, incollando più corone e aumentando quindi le superfici di affaccio tra statore e rotore.



BIBLIOGRAFIA

Bibliografia

- [1] F. Ervas, *Realizzazione di un motore brushless a flusso assiale per applicazioni automotive a 48 V*, Politecnico di Torino, 2017.
- [2] M. Chiampi, *Elettrotecnica dai campi ai circuiti*, Torino: Politeko Edizioni, 2012.
- [3] J. H. William F. Smith, *Scienza e tecnologia dei materiali*, Milano: McGraw-Hill, 2008.
- [4] M. Cristino, *Tesi di laurea magistrale in ingegneria elettrica "Identificazione dei parametri dei motori sincroni a magneti permanenti: Macchina anisotropa a flusso assiale"*, Politecnico di Torino.
- [5] P. Guglielmi, *Appunti del corso "Propulsione di veicoli elettrici e ibridi"*, Politecnico di Torino, 2015.
- [6] F. C. a. H. O. F. Caricchi, «Low-cost Compact Permanent Magnet Machine for adjustable_Speed pump Application,» *IEEE Transiction on Industy Appliction*, vol. Vol. 34, n. N.1, January/February 1998.
- [7] F. P. a. A. T. A. Cavagnino M. Lazzari, «A Comparison Between the Axial Flux and the Radial Flux Structures for PM Synchronous motors,» *IEEE Transiction of Industy Applicatons*, vol. Vol. 38, n. N. 6, Novembre/Dicembre 2002.
- [8] A. Conti, *Design, Finite Element Analisys and Prototyping of an Axial Flux PM Brushless Motor for automotive Applicaions*, Torino: Master of science Thesis Politecnico di Torino, Aprile 2015.
- [9] L. Piglione, *ELETTROTECNICA Filtri-Linee-Campi*, Torino: Levrotto&Bella, 1985.
- [10] P. Mazzoldi, *Fisica - Vol. II Seconda edizione*, Napoli: EdiSES, 2007.
- [11] L. Ferraris, *Macchine Elettriche*, Torino: CLUT, 2003.
- [12] K. J. H. Shokrollahi, «Soft magnetic composite materials (SMC's),» 20 Febbraio 2007.