

# **POLITECNICO DI TORINO**

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRICA



TESI DI LAUREA

## **Studio dei materiali magnetici soft composite con layer in Silicio: composizione e processi**

Relatori:

Prof. Luca Ferraris

Prof. Marco Actis Grande

Ing. Dott. Emir Poskovic

Ing. Fausto Franchini

Candidato:

Silvio Garofalo

## Sommario

INTRODUZIONE .....	4
1. MATERIALI MAGNETICI.....	5
1.1 GRANDEZZE MAGNETICHE .....	5
1.2 MATERIALI MAGNETICI SOFT E HARD.....	10
1.3 PERDITE NEI MATERIALI MAGNETICI .....	11
2. MATERIALI MAGNETICI SOFT .....	14
2.1 LAMIERINO MAGNETICO .....	14
2.2 SMC .....	16
2.3 APPLICAZIONI DEGLI SMC.....	19
3. SVILUPPO DI NUOVI SMC IN LABORATORIO.....	22
3.1 OBIETTIVI E PROBLEMATICHE .....	22
3.2 STUDI PRECEDENTEMENTE SVOLTI .....	23
3.3 SMC CON LAYER INORGANICO Fe-Si.....	25
4. REALIZZAZIONE SMC IN LABORATORIO .....	26
4.1 PROCESSI UTILIZZATI .....	27
4.2 PRESSIONI.....	29
4.3 TRATTAMENTI TERMICI.....	32
5. TIPOLOGIE DI PROVE EFFETTUATE .....	34
5.1 COERCITIVITÀ.....	34
5.2 RESISTIVITÀ.....	36
5.3 CARATTERIZZAZIONE MAGNETICA.....	37
5.4 PROVE MECCANICHE .....	42
6. ANALISI E VALUTAZIONE DEI RISULTATI.....	43
6.1 PROVE PRELIMINARI.....	43
6.2 PROVE INTERMEDIE .....	44
6.3 PROVE FINALI.....	45
6.4 CONFRONTO RISULTATI.....	46
6.4.1 CONFRONTO SILICIO .....	47
6.4.2 CONFRONTO PROCESSI .....	56
6.4.3 CONFRONTO PERCENTUALI DI SILICIO .....	62
6.4.4 CONFRONTO PRESSATURA .....	69
6.4.5 CONFRONTO TRATTAMENTI TERMICI .....	78
6.5 TOROIDI .....	115
6.6 PROVE MECCANICHE .....	121

6.7	CONFRONTO RESISTIVITÀ ELETTRICHE.....	123
6.8	CONFRONTO CAMPO COERCITIVO.....	126
7.	CONCLUSIONI.....	128
	BIBLIOGRAFIA .....	135



# INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, lo sviluppo di nuove macchine elettriche a flusso assiale e a flusso trasversale, ed in generale l'esigenza di una visione tridimensionale di flusso magnetico, ha contribuito all'intensificarsi della ricerca di nuovi materiali magnetici in sostituzione al tradizionale lamierino ferromagnetico, inadatto a tali applicazioni. Questi nuovi materiali magnetici vengono denominati Soft Magnetic Composite (SMC). Tali SMC sono composti da polveri a base di ferro, rivestite da un secondo materiale (layer) che isola tra loro le polveri ferrose, successivamente compattate per ottenere un materiale massivo.

Il rivestimento, che può essere un rivestimento organico o inorganico, ha lo scopo di conferire al composito delle caratteristiche maggiormente resistive rispetto al lamierino, in modo da avere delle buone permeabilità e basse perdite a frequenze elevate.

La tesi svolta si pone l'obiettivo di studiare SMC con rivestimento inorganico, nello specifico un layer composto da Silicio.

Al fine di ottenere dei risultati finali il più possibile competitivi, sono state utilizzate due polveri di Silicio, differenti per grado di purezza, creando più composti con percentuali in peso variabili dallo 0,1% al 2 % di silicio, ed effettuando la miscelazione con due diversi processi denominati miscelazione standard ed ibridizzazione.

I composti in esame sono stati compattati inizialmente alla sola pressione di 700MPa, e trattati termicamente per conferire al materiale delle proprietà meccaniche migliori, in un range di temperatura che va dai 400°C ai 900°C, in due ambienti differenti, aria e vuoto.

Successivamente sono state fatte anche delle prove di compattazione a pressioni maggiori (800MPa e 900MPa) in modo da avere un quadro più vasto sul comportamento di tali materiali.

Le misure di permeabilità magnetica effettuate in questa prima parte dell'attività, sono state eseguite tramite un test denominato Single Sheet Test (SST), su campioni di forma parallelepipedica a sezione rettangolare.

L'attività si conclude infine con la preparazione di toroidi e parallelepipedi a sezione quadrata di una miscela, risultata essere la migliore secondo i parametri di permeabilità magnetica e cifra di perdita, a cui seguono delle prove di permeabilità sui toroidi, e prove meccaniche a flessione sui parallelepipedi, dopo aver effettuato un trattamento termico in vuoto alla temperatura di 400°C.

# 1. MATERIALI MAGNETICI

I materiali magnetici hanno assunto nel corso degli anni un ruolo fondamentale nella società, in quanto indispensabili per la generazione, distribuzione e conversione dell'energia.

Come è noto (nella storia europea), la scoperta dei primi materiali magnetici risale già al VII secolo A.C., dove nei pressi della città di Magnesia vennero scoperti i primi giacimenti di magnetite. I fenomeni legati a questi materiali, denominati appunto magnetici, sono stati importanti non solo per le prime applicazioni come la bussola, ma sono stati anche da musa per trattati filosofici dei primi studiosi greci come Talete, Platone o Empedocle. Spiegare il perché ed il come questi materiali presentassero delle caratteristiche di repulsione e attrazione, è stato argomento di discussione per svariate centinaia di anni, ed inizialmente a questi fenomeni erano attribuite spiegazioni metafisiche, alchemiche e persino di magia oscura, fino a quando dagli inizi del XVII secolo, innumerevoli studi sulla interazione magnetica dei materiali, hanno portato alla formulazione delle prime teorie basate sul metodo scientifico, culminate nella metà del XIX secolo con le equazioni di Maxwell che unificavano in quattro equazioni la teoria elettro-magnetica.

## 1.1 GRANDEZZE MAGNETICHE

I fenomeni magnetici vengono descritti con l'introduzione di due grandezze, definiti campo magnetico  $\mathbf{H}$  [A/m] e induzione magnetica  $\mathbf{B}$  [T]. La relazione che lega le due grandezze viene denominata caratteristica costitutiva del mezzo, ed ha espressione:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1)$$

Dove  $\mu$  rappresenta la permeabilità magnetica del mezzo. In generale essa può essere scritta come:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2)$$

Con  $\mu_0$  permeabilità magnetica del vuoto, di valore:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} [H/m] \quad (3)$$

Mentre  $\mu_r$  rappresenta la permeabilità relativa, che dipende dal materiale considerato.

Considerando un solenoide di lunghezza unitaria ed ideale, percorso da una corrente  $I$ , il campo magnetico prodotto da tale corrente può essere definito come:

$$H = NI \quad (4)$$

Dove  $N$  rappresenta il numero di spire.

Se all'interno del solenoide è presente il vuoto, otteniamo un'induzione magnetica:

$$B_0 = \mu_0 H \quad (5)$$

Se a questo punto immaginiamo di inserire nel solenoide un mezzo omogeneo, a parità di campo magnetico  $H$  prodotto, otteniamo:

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (6)$$

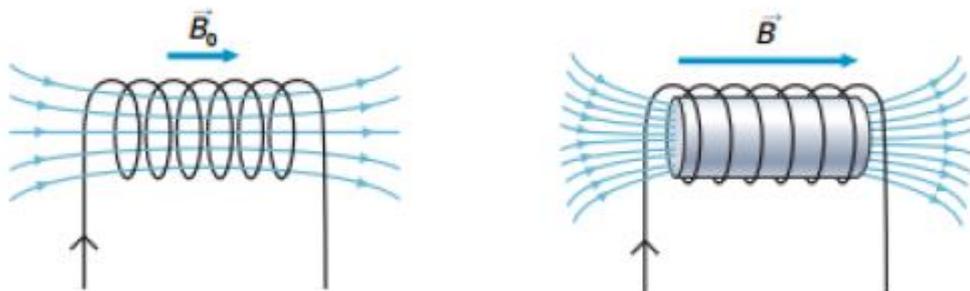


Figura 1-1: Rappresentazione schematica di un campo magnetico nel vuoto (sinistra) e nel mezzo (destra)

Dove la variazione dell'induzione magnetica dovuta alla presenza del mezzo, risulta:

$$B_m = B - B_0 = (\mu_r - 1)\mu_0 H = \chi_m \mu_0 H \quad (7)$$

Con  $\chi_m$  denominata suscettività magnetica, che ha il significato di variazione relativa dell'induzione magnetica.

Definiamo a questo punto il vettore magnetizzazione, come:

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad (8)$$

E sostituendo:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_m + \mathbf{B}_0 = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (9)$$

Dipendentemente dal valore di  $\chi_m$  i materiali vengono classificati in diamagnetici, paramagnetici e ferromagnetici.

**I materiali diamagnetici**, presentano un valore di permeabilità relativa che rimane costante al variare del campo magnetico, e possiedono:

$$\mu_r < 1 \Rightarrow \chi_m < 0 \quad (10)$$

Dunque presentano una magnetizzazione  $\mathbf{M}$  opposta al campo magnetico  $\mathbf{H}$  applicato

MATERIALE	$\chi_m$
Acquai	$-0.90 * 10^{-5}$
Argento	$-2.39 * 10^{-5}$
Bismuto	$-16.4 * 10^{-5}$
Germanio	$-0.82 * 10^{-5}$
Mercurio	$-2.8 * 10^{-5}$
Rame	$-0.98 * 10^{-5}$
Silicio	$-0.42 * 10^{-5}$
Zinco	$-1.4 * 10^{-5}$

*Tabella 1: Valori di suscettività magnetica di alcuni materiali diamagnetici*

**I materiali paramagnetici** presentano un valore di permeabilità magnetica costante al variare del campo magnetico applicato, e possiedono

$$\mu_r > 1 \Rightarrow \chi_m > 0 \quad (11)$$

Presentando dunque una magnetizzazione  $\mathbf{M}$  concorde al campo magnetico applicato  $\mathbf{H}$

MATERIALE	$\chi_m$
Alluminio	$2.08 * 10^{-5}$
Calcio	$1.94 * 10^{-5}$
Uranio	$40.92 * 10^{-5}$
Magnesio	$1.17 * 10^{-5}$
Ossigeno	$0.39 * 10^{-5}$
Platino	$27.91 * 10^{-5}$
Sodio	$0.85 * 10^{-5}$
Titanio	$18.22 * 10^{-5}$
Tungsteno	$7.92 * 10^{-5}$

Tabella 2: Valori di suscettività magnetica di alcuni materiali paramagnetici

I materiali paramagnetici, presentano inoltre un valore di suscettività dipendente dalla temperatura, secondo la relazione denominata prima legge di Curie:

$$\chi_m = \frac{C\rho}{T} \quad (12)$$

Dove C rappresenta una costante denominata costante di Curie,  $\rho$  è la densità del materiale e T è la temperatura espressa in Kelvin.

**I materiali ferromagnetici**, presentano dei valori di permeabilità relativa, e quindi suscettività magnetica, molto maggiori rispetto ai materiali paramagnetici, nonché variabili in funzione del campo magnetico applicato, ed inoltre tale permeabilità dipende da come viene raggiunto il valore di campo magnetico. Non potendo attribuire un valore univoco, le grandezze di permeabilità (o suscettività) vengono espresse tramite rappresentazione grafica. Considerando un materiale ferromagnetico non magnetizzato, in presenza di un campo magnetico H applicato, esso si magnetizza descrivendo la caratteristica di prima magnetizzazione. Aumentando ulteriormente **H**, viene raggiunta una zona denominata di saturazione, dove il valore di permeabilità rimane pressoché costante. In seguito ad una smagnetizzazione (valore di **H** di segno opposto rispetto la magnetizzazione) fino al valore di H=0, esso non presenta una induzione magnetica nulla, ma bensì una induzione residua **B<sub>r</sub>**. Per annullare tale magnetizzazione residua, occorre applicare un campo magnetico negativo al materiale, fino ad un valore denominato campo coercitivo **H<sub>c</sub>**. Diminuendo ulteriormente il valore di H, si raggiunge una seconda zona di saturazione, questa volta nel terzo quadrante. Se a questo punto, il materiale viene nuovamente magnetizzato con un

campo magnetico positivo, le curve che descrivono il comportamento, percorrono dei cicli, denominati cicli di isteresi.

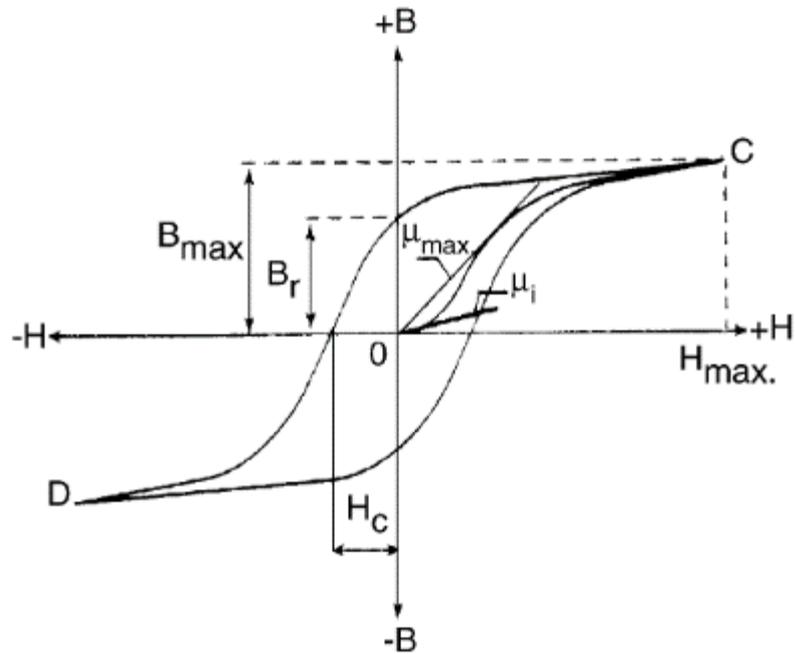


Figura 1-2: Ciclo di isteresi e curva di prima magnetizzazione di un materiale ferromagnetico

Tali materiali presentano una dipendenza dalla temperatura, secondo la così detta seconda legge di Curie

$$\chi_m = \frac{C\rho}{T - T_c} \quad (13)$$

Dove  $T_c$  è una temperatura critica caratteristica del materiale, sopra il quale il comportamento diventa di tipo paramagnetico.

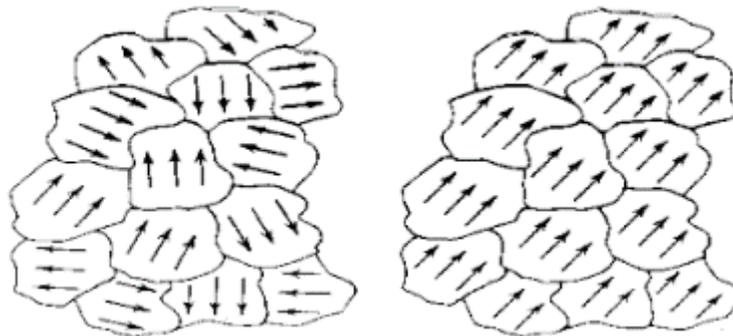
## 1.2 MATERIALI MAGNETICI SOFT E HARD

I materiali ferromagnetici, vengono classificati ulteriormente in:

**-materiali magnetici hard (duri)**

**-materiali magnetici soft (dolci)**

Un materiale ferromagnetico non magnetizzato, secondo le ipotesi formulate da Pierre-Ernest Weiss, è un materiale in cui sono presenti diverse regioni denominate domini magnetici, ognuno dei quali possiede un numero elevato di molecole che presentano tutte un momento magnetico di eguale direzione, detta magnetizzazione spontanea, con i vari domini magnetici disposti in modo casuale tali da conferire al materiale una magnetizzazione complessiva nulla. Se sottoposto ad un campo magnetico esterno, i momenti magnetici dei diversi domini tendono ad allinearsi nella direzione in cui è applicato il campo magnetico, fino a che i domini scompaiono quando risultano tutti allineati, arrivando così in saturazione.



*Figura 1-3: Domini magnetici non orientati (a sinistra) e domini magnetici che si orientano in presenza di campo magnetico applicato (a destra)*

Quando le pareti del dominio si allineano per effetto di un campo magnetico non elevato, allora si parla di materiali soft. Essi presentano un basso valore sia di campo coercitivo  $H_c$ , sia di induzione residua  $B_r$ .

Quando invece è necessario applicare un elevato valore di campo magnetico si parla di materiali magnetici hard, che presentano appunto alti valori di  $H_c$  e  $B_r$ , e le loro applicazioni principali sono i magneti permanenti.

### 1.3 PERDITE NEI MATERIALI MAGNETICI

Ogni macchina elettrica, usata sia come generatore o come motore, presenta un rendimento sempre inferiore all'unità, questo a causa delle perdite che vengono dissipate sotto forma di calore negli avvolgimenti in rame e nel ferro che la compongono. Le perdite nel ferro, possono essere suddivise come somma di tre componenti, perdite per isteresi, perdite per correnti parassite e perdite eccedenti, ognuno dei quali merita di essere discusso.

Le **perdite per isteresi**, sono dovute alle non linearità dei materiali ferromagnetici. Come descritto nel capitolo precedente, i cicli di magnetizzazione e smagnetizzazione descrivono nel piano delle curve che prendono nome di cicli di isteresi, e l'area che viene a formarsi rappresenta proprio l'energia persa per unità di massa (o volume). La potenza persa per isteresi, fu modellizzata empiricamente da Charles Proteus Steinmetz secondo la formula:

$$P_{ist} = A_1 B^n f \quad (14)$$

Dove  $A_1$  è una costante che dipende dal tipo di materiale, e in che unità di misura si vuole esprimere la potenza persa (watt al chilogrammo o in watt al metro cubo) mentre l'esponente  $n$ , è un valore che dipende dall'induzione considerata:

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

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

La seconda voce di perdita sono **le perdite per correnti parassite**. Se immaginiamo un materiale ferromagnetico massivo di forma cilindrica, attraversato assialmente da un flusso magnetico alternato, essendo un materiale ferromagnetico anche un materiale conduttivo, sarà sede di un campo di densità di correnti. Tale cilindro può essere visto come una serie di gusci concentrici di spessore infinitesimo, assimilabili a delle spire, nelle quali a causa del passaggio del flusso alternato, vengono indotte delle forze elettromotrici e quindi delle correnti, che riscaldano il materiale influenzando così sulle perdite complessive

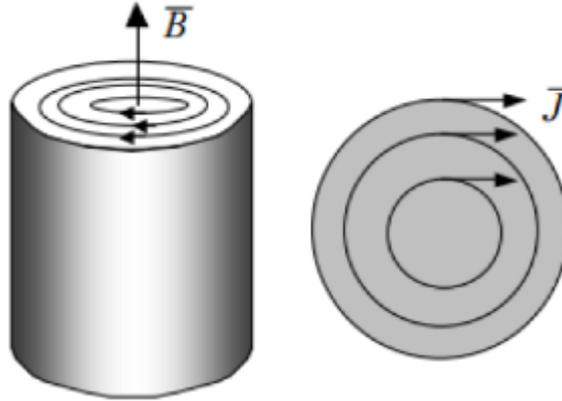


Figura 1-4: Materiale ferromagnetico sede di densità di correnti indotte

Possono essere modellizzate tramite la seguente formula:

$$P_{cp} = A_2 B^2 f^2 \quad (15)$$

Dove  $A_2$  è una costante che dipende dalla forma dell'oggetto e dal materiale considerato.

Per un conduttore cilindrico:

$$A_2 = \frac{\pi^2 r^2}{4\rho} \quad (16)$$

Dove  $r$  è il raggio della sezione circolare del cilindro, e  $\rho$  la resistività del materiale

La terza voce di perdita sono le **perdite eccedenti**. Sono un tipo di perdita di difficile modellizzazione, e vengono spesso trascurate e inglobate nelle perdite parassite. Esse sono dovute alla presenza dei domini magnetici, già accennati in precedenza, che sottoposti a campo magnetico esterno tendono a allineare la loro magnetizzazione con esso; Il movimento delle pareti dei domini magnetici, provoca un aumento locale delle perdite parassite.

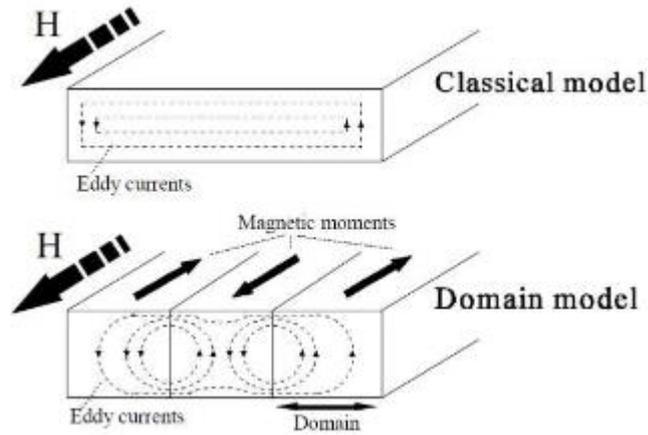


Figura 1-5: Modello classico (sopra) e modello con domini magnetici (sotto)

Sperimentalmente possono essere calcolate come:

$$P_{ecc} = A_3 B^{3/2} f^{3/2} \quad (17)$$

Dove  $A_3$  è una costante che dipende da molti fattori, e può essere espressa come:

$$A_3 = \sqrt[8]{\sigma G S V_0} \quad (18)$$

Con  $\sigma$  conducibilità elettrica e  $G$  fattore di smorzamento, che dipendono dal materiale,  $S$  area trasversale del lamierino, e  $V_0$  che è un parametro che descrive gli effetti microstrutturali dovuti al movimento delle pareti del dominio

## 2. MATERIALI MAGNETICI SOFT

I circuiti magnetici delle macchine elettriche sono formati da materiali ferromagnetici soft, le cui caratteristiche sono mirate ad ottenere alti valori di permeabilità ed alti valori di induzione massima, pur presentando induzioni residue e campo coercitivo piccoli, in modo da presentare basse perdite. Lo stato dell'arte delle classiche macchine a flusso radiale, prevede che tali circuiti siano formati dall'impacchettamento di materiale ferromagnetico laminato, i così detti lamierini. Tali lamierini non sono però adatti a più recenti macchine a flusso assiale ed a flusso trasversale dove occorrono materiali ferromagnetici massivi, chiamati soft magnetic composites (SMC). Inoltre i lamierini non sono adatti alle applicazioni ad alta frequenza, infatti presentano sì delle perdite ridotte alle frequenze di rete (50Hz o 60Hz), ma aumentano drasticamente all'aumentare della frequenza di esercizio, mentre gli SMC hanno delle proprietà che peggiorano in modo minore all'aumentare della stessa, quindi pensando in generale a tutte le applicazioni in cui è richiesto lavorare ad alta frequenza, gli SMC possono risultare vincenti.

### 2.1 LAMIERINO MAGNETICO

Il ferro "pieno" è sede di alte perdite dovute alla circolazione di correnti parassite, e per ridurre questa voce di perdita esso viene laminato e successivamente impilato con altri lamierini, interponendo tra loro delle sostanze isolanti che conferiscono maggiore resistività al passaggio delle correnti.

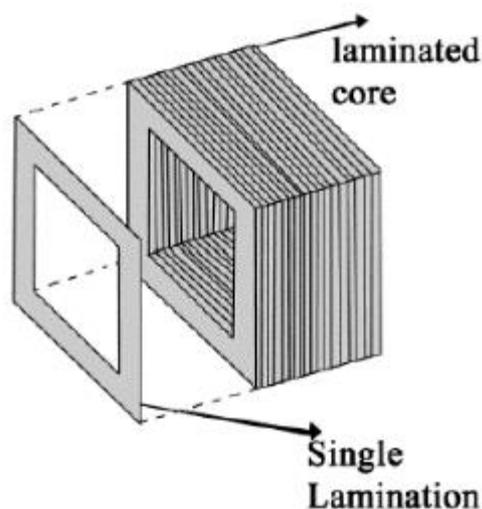


Figura 2-1: Rappresentazione di un pacco di lamierini

Il processo produttivo dei lamierini si compone fondamentalmente di alcuni passaggi: compattazione delle polveri in lastra, trattamenti termici a temperature elevate (fino a 1400°C) in atmosfera ossidante, ed infine lavorazione meccanica (punzonatura, taglio laser, taglio ad acqua ecc...) per ottenere forme e spessori richiesti. Lo spessore del lamierino così ottenuto varia di norma tra lo 0,35mm e lo 0,65mm, e presentano perdite specifiche molto ridotte.

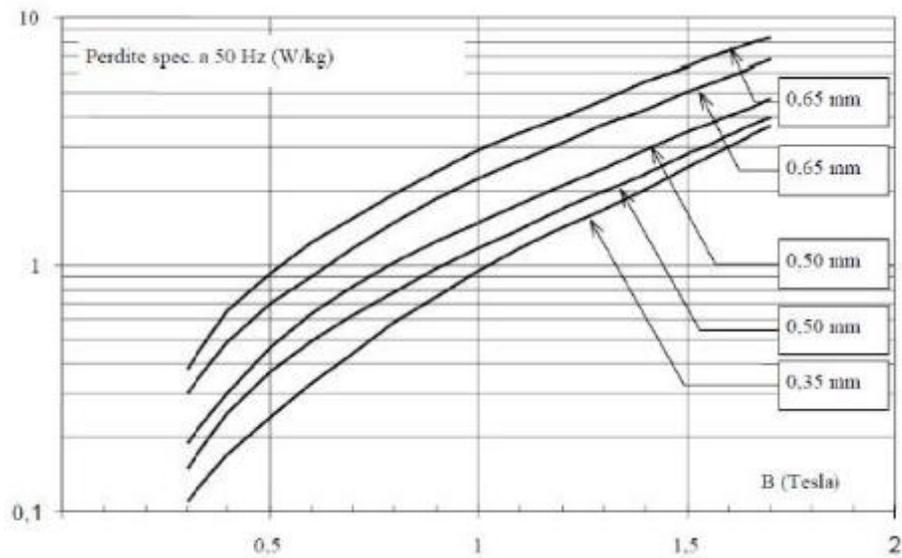
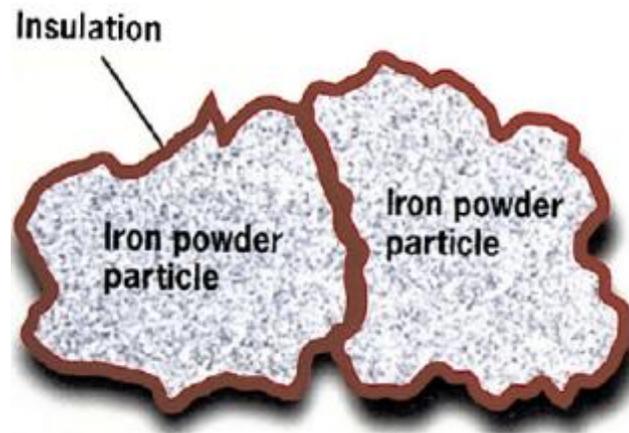


Figura 2-2: Perdite specifiche in funzione dello spessore di laminazione

I materiali utilizzati nella produzione di lamierini sono acciai o ferro a basso tenore di ossigeno e carbonio, leghe ferro-silicio, leghe ferro-nichel, leghe ferro-cobalto, leghe nano-cristalline e amorfe, ferriti dolci.

## 2.2 SMC

Gli SMC sono composti da polveri a base di ferro, rivestite da un secondo materiale (layer) che isola tra loro le polveri ferrose, di dimensioni comprese tra i 50 $\mu$ m e i 400 $\mu$ m, successivamente compattate per ottenere un materiale massivo.



*Figura 2-3: Rappresentazione schematica di un SMC*

Il materiale finito, deve essere successivamente trattato termicamente, e deve presentare caratteristiche di compromesso tra:

- perdite per isteresi magnetiche
- perdite per correnti parassite ed eccedenti
- permeabilità magnetica massima
- induzione magnetica di saturazione
- resistenza meccanica

Il ferro utilizzato deve presentare un basso contenuto di impurità quali carbonio e ossigeno, in quanto la presenza di tali impurità incide in modo negativo sulle prestazioni magnetiche e di perdita del materiale elencate precedentemente.

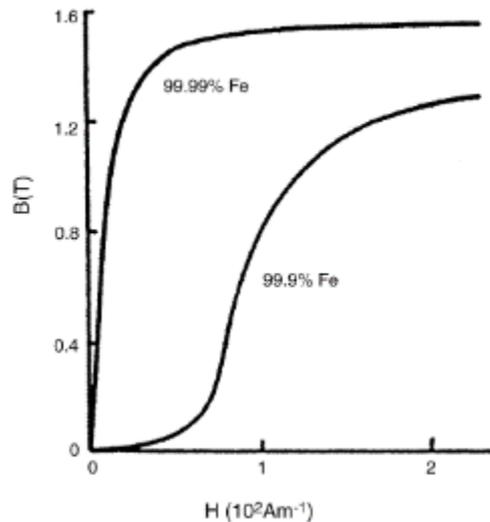


Figura 2-4: effetto della purezza del ferro sulle caratteristiche magnetiche

Il layer utilizzato deve conferire al materiale una maggiore resistività elettrica, così da diminuire le perdite dovute alle correnti parassite a frequenze elevate, ed inoltre diminuire i valori di campo coercitivo. I layer che vengono utilizzati nella progettazione di SMC, sono suddivisi in layer organici e layer inorganici.

I **layer organici** sono classificati principalmente in resine termoindurenti e polimeri termoplastici, materiale plastico non reticolato che si lega successivamente ad un trattamento termico. Le resine termoindurenti si presentano allo stato liquido o pastoso, e diventano irreversibilmente solide dopo trattamento termico. I termoplastici si presentano solidi, e dopo trattamento termico si liquefanno, ritornando solidi a temperatura ambiente, ma con l'inconveniente di ridurre le proprietà all'aumentare dei cicli di fusione-solidificazione. Negli SMC rivestiti con layer organico, la percentuale di polimero utilizzata non può superare il 6,5% in peso, in quanto le caratteristiche magnetiche e di perdita crollano ad alte frequenze (aumentando notevolmente la componente eccedente).

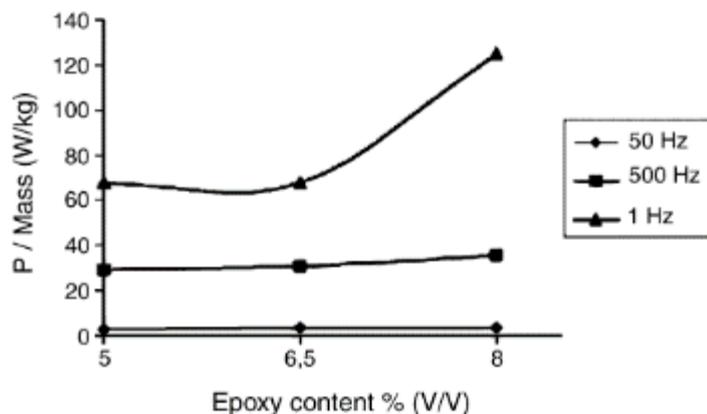


Figura 2-5: Perdite SMC in layer organico in funzione di resina utilizzata a diverse frequenze

Altresì un contenuto di resina basso sfavorisce la meccanica, ed il materiale risulta troppo fragile.

Negli SMC con **layer inorganico**, i grani di ferro vengono miscelati con altri elementi meno conduttivi. La compattazione può avvenire o a caldo, o a freddo con successivo trattamento termico ad alta temperatura in modo eliminare gli stress meccanici dovuti alla pressatura a freddo e permettendo al layer di diffondersi tra le particelle ferrose. Le principali miscele utilizzate sono Ferro-Nichel, Ferro-Fosforo, Ferro-Cobalto, Ferro-Silicio, ma soprattutto sono composti da ossidi metallici.

I vantaggi, più volte accennati durante la stesura dei capitoli, risiedono nella possibilità di:

- ottenere un materiale che presenta resistività maggiori rispetto al lamierino, senza dover ricorrere all'uso di materiale isolante per ridurre le perdite dovute alle correnti parassite.
- ottenere un materiale massivo in cui gli scarti i volumi ed il peso complessivo sono notevolmente ridotti, e che presenta meno fasi di lavorazione rispetto ai lamierini.
- ottenere un materiale che non solo può lavorare in modo più efficiente ad alte frequenze, ma che permette di ottenere un'isotropia magnetica nelle tre dimensioni.

Gli svantaggi invece, riguardano le prestazioni magnetiche; le permeabilità massime e le induzioni di saturazione sono minori negli SMC che nel lamierino, che risulta in ogni caso vincenti alle basse frequenze, là dove non è richiesta una isotropia 3D del flusso magnetico. Un altro svantaggio è la resistenza meccanica, dove i pacchi di lamierini risultano avere una resistenza maggiore.

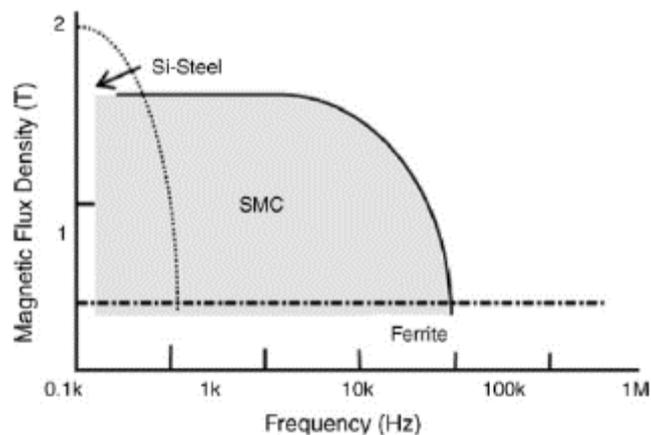
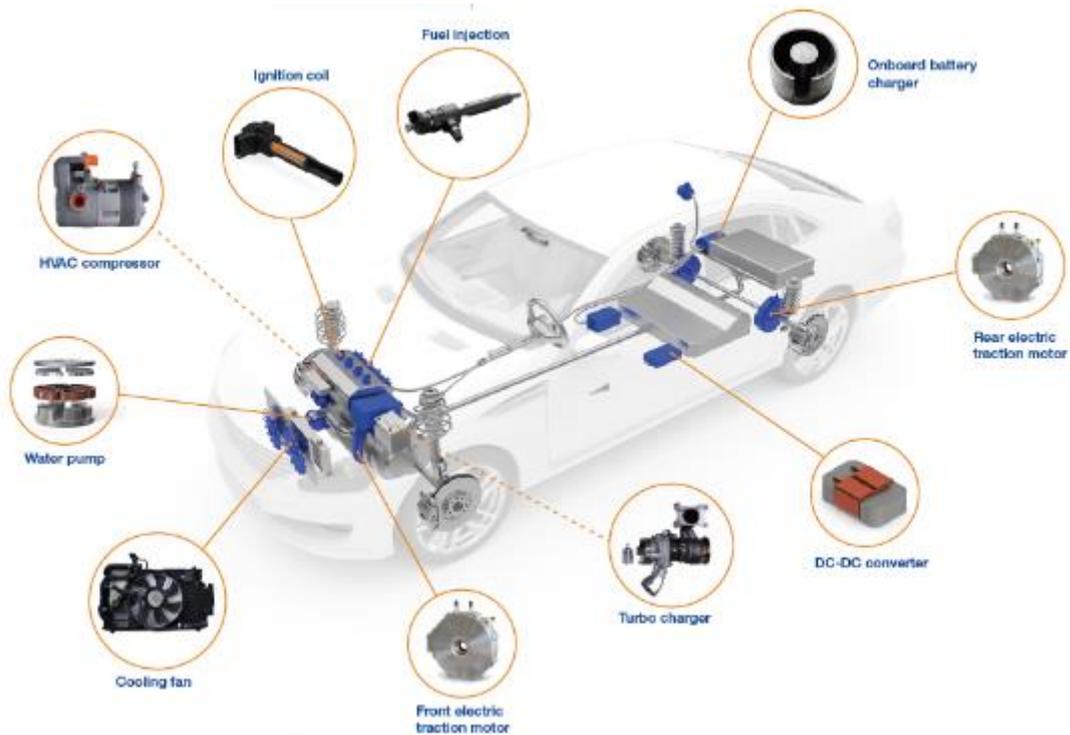


Figura 2-6: Campo di applicazione di materiali ferromagnetici dolci in funzione della frequenza

### 2.3 APPLICAZIONI DEGLI SMC

Gli SMC trovano impiego in una larga fascia di prodotti soprattutto per applicazioni automotive come ad esempio motori elettrici, bobine di accensione, iniettori di carburante, convertitori DC/DC, carica batteria, ma anche pompe e compressori per aria condizionata.



*Figura 2-7: Parti di un'automobile progettate con tecnologia SMC*

Come accennato, tipologie di macchine elettriche già progettate in anni non recenti, stanno trovando spazio nel panorama automotive proprio grazie alla tecnologia degli SMC. Ne sono un esempio le macchine a flusso assiale e a flusso trasversale.

Le macchine a flusso assiale, sono delle macchine a magneti permanenti in cui il flusso magnetico anziché richiudersi radialmente, si richiude assialmente.

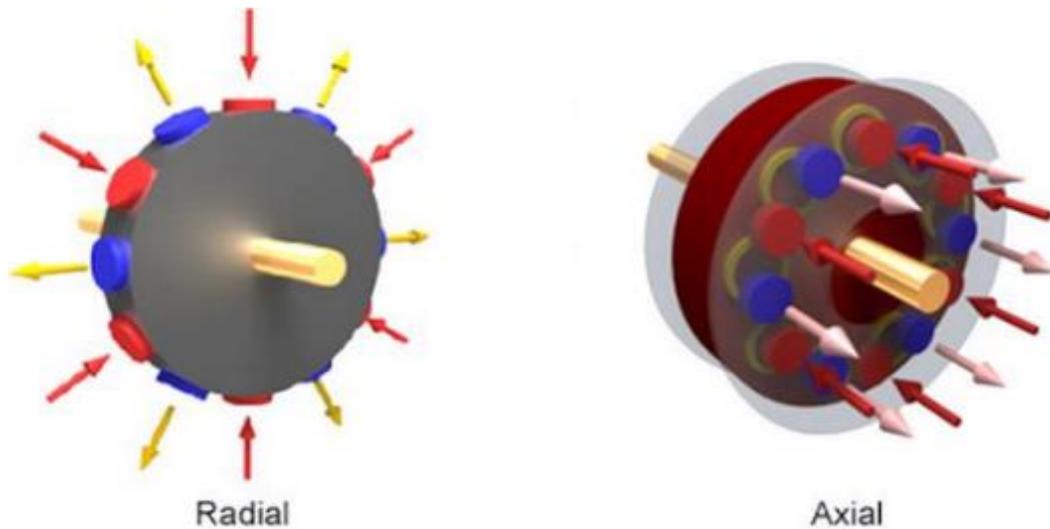


Figura 2-8: Differenza schematica tra macchina a flusso radiale (sinistra) e flusso assiale (destra)

A differenza delle macchine radiali presentano dimensioni assiali ridotte, nonché un'alta densità di coppia con possibile sfruttamento senza l'impiego di un riduttore di velocità. Costruttivamente possono essere realizzate sia in struttura monostadio (un rotore ed uno statore), sia in struttura doppio strato (due rotori ed uno statore o viceversa).

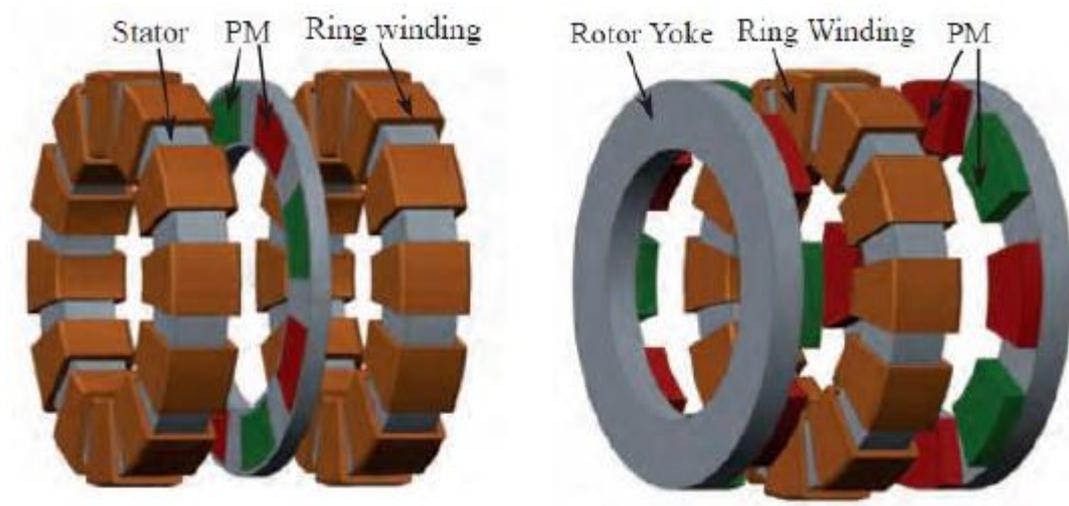
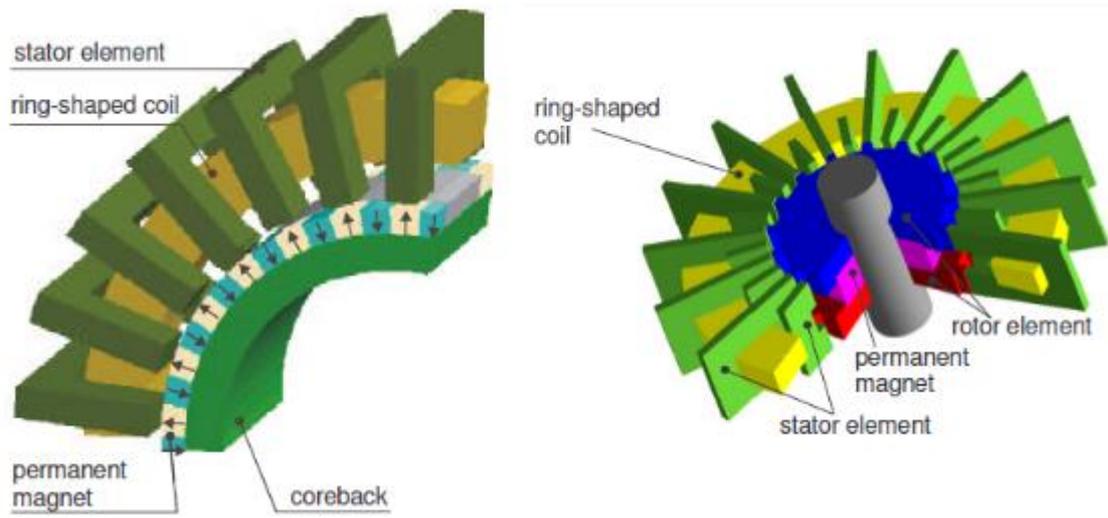


Figura 2-9: Macchina a flusso assiale con doppio statore (a sinistra) e doppio rotore (a destra)

Le macchine a flusso trasversale invece, sono delle macchine ancora meno tradizionali rispetto le macchine a flusso assiale, e sfruttano una particolare struttura dello statore in cui avviene la richiusura del flusso magnetico.



*Figura 2-10: Struttura di una macchina a flusso trasversale*

### **3. SVILUPPO DI NUOVI SMC IN LABORATORIO**

L'attività di studio e ricerca di nuovi SMC che possano essere utilizzati come materiali ferromagnetici dolci, è stata svolta presso i laboratori di Alessandria, sede distaccata del Politecnico di Torino. In questo capitolo si tenterà di dare un panorama degli obiettivi preposti e delle problematiche connesse, nonché un accenno degli studi precedentemente svolti e dei materiali usati per lo sviluppo di SMC inorganici

#### **3.1 OBIETTIVI E PROBLEMATICHE**

Gli obiettivi preposti sono quelli ottenere degli SMC con rivestimento inorganico che presentino proprietà magnetiche, meccaniche e di perdita migliori o quantomeno comparabili agli SMC con rivestimento organico precedentemente sviluppati da altri tesisti [4], [7] - [9] presso il laboratorio dove è stata effettuata l'attività di ricerca. La differenza sostanziale tra un layer organico ed uno inorganico, sta nel processo che serve a conferire una adeguata meccanica al composito. Negli SMC con layer organico, il rivestimento avviene con resine termoindurenti, polimeri non reticolati alla temperatura ambiente che dopo trattamento termico a bassa temperatura (150°C-300°C) diffondono tra i grani di ferro, legandosi e migliorando di conseguenza la meccanica del materiale. I trattamenti termici con resine non possono però eccedere determinate temperature, in quanto incorre il rischio di far "bruciare" lo strato isolante. Con un layer inorganico invece, la possibilità di trattare il campione a temperature maggiori senza il rischio di bruciare l'isolante, apre alla possibilità di ottenere materiali con resistenza meccaniche maggiori.

Le problematiche connesse al trattamento termico ad alta temperatura in aria, sono quelle di formazione di ossidi che incidono negativamente sui parametri magnetici e di perdita ad alta frequenza. A questo proposito si è intrapresa la strada di trattare il campione in vuoto per evitare la formazione di tali ossidi.

### 3.2 STUDI PRECEDENTEMENTE SVOLTI

Gli studi effettuati precedentemente su layer organici accennati precedentemente, riguardano miscele a base di polveri di ferro dove i polimeri utilizzati sono una resina fenolica ed una resina epossidica, entrambe resine termoindurenti.

Il campione con layer in resina epossidica presenta un percentuale in peso di polimero del 0,2% ed è indicato col nome A8.5, mentre il campione con layer in resina fenolica presenta una percentuale in peso di polimero dello 0,1% ed è indicato col nome B9.5. Entrambi i campioni sono realizzati alla pressione di compattazione di 800MPa. Di seguito vengono rappresentati gli istogrammi relativi alle permeabilità massime, induzione a valori di campo magnetico di 5000 [A/m] e le cifre di perdita a 50Hz, e successivamente la cifra di perdita a 500Hz.

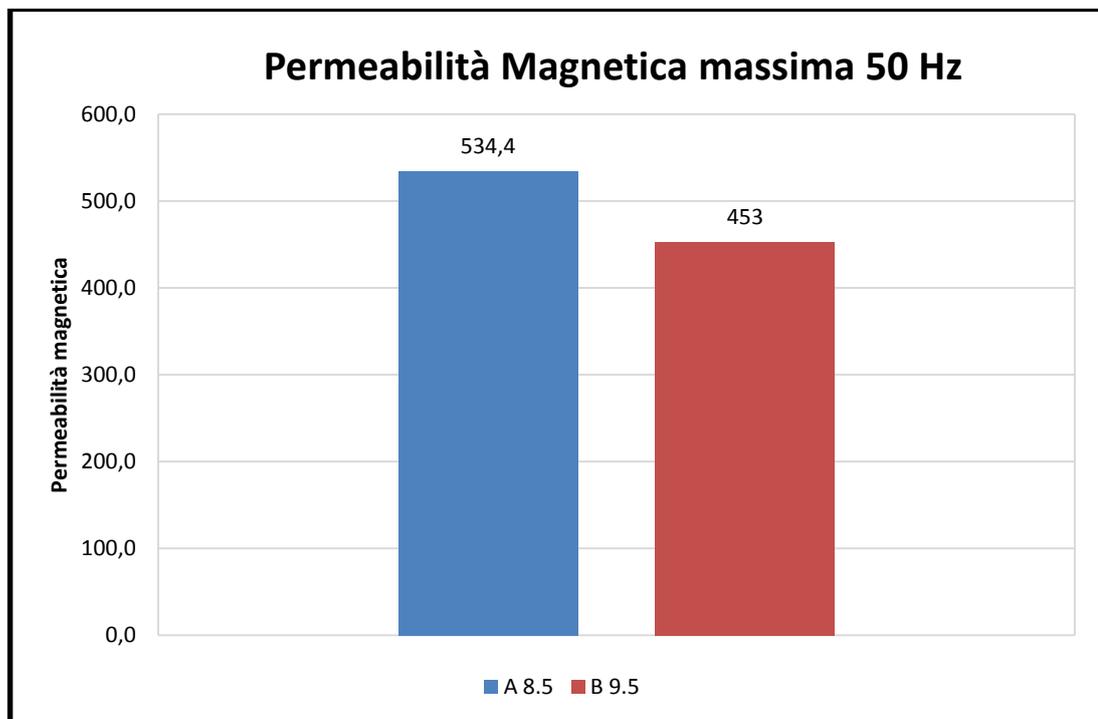


Figura 3-1: Confronto permeabilità massima tra i migliori materiali epossidico e fenolico

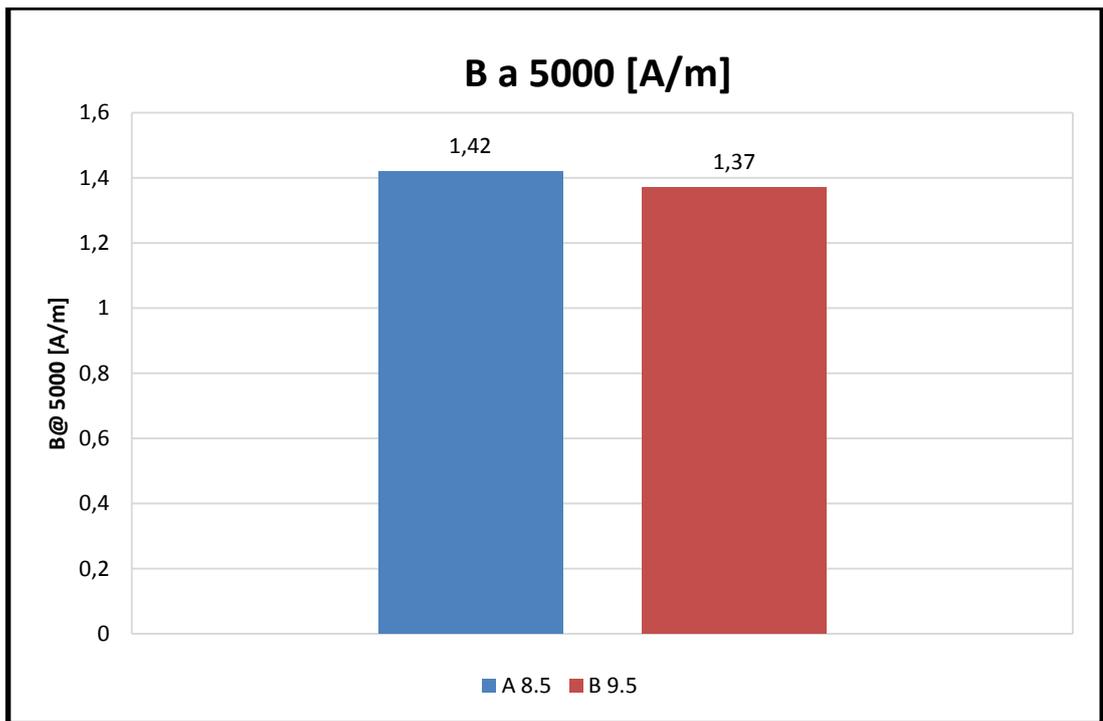


Figura 3-2: Confronto induzione a 5000A/m tra i migliori materiali epossidico e fenolico

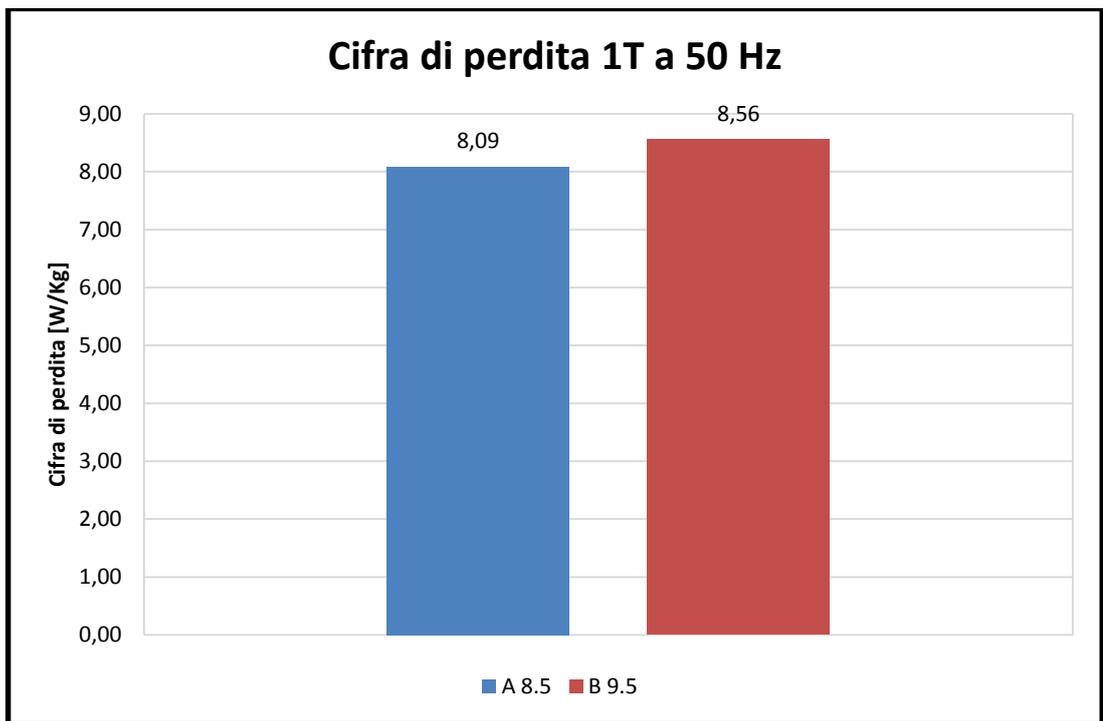


Figura 3-3: Confronto cifra di perdita ad 1T a 50Hz tra i migliori materiali epossidico e fenolico

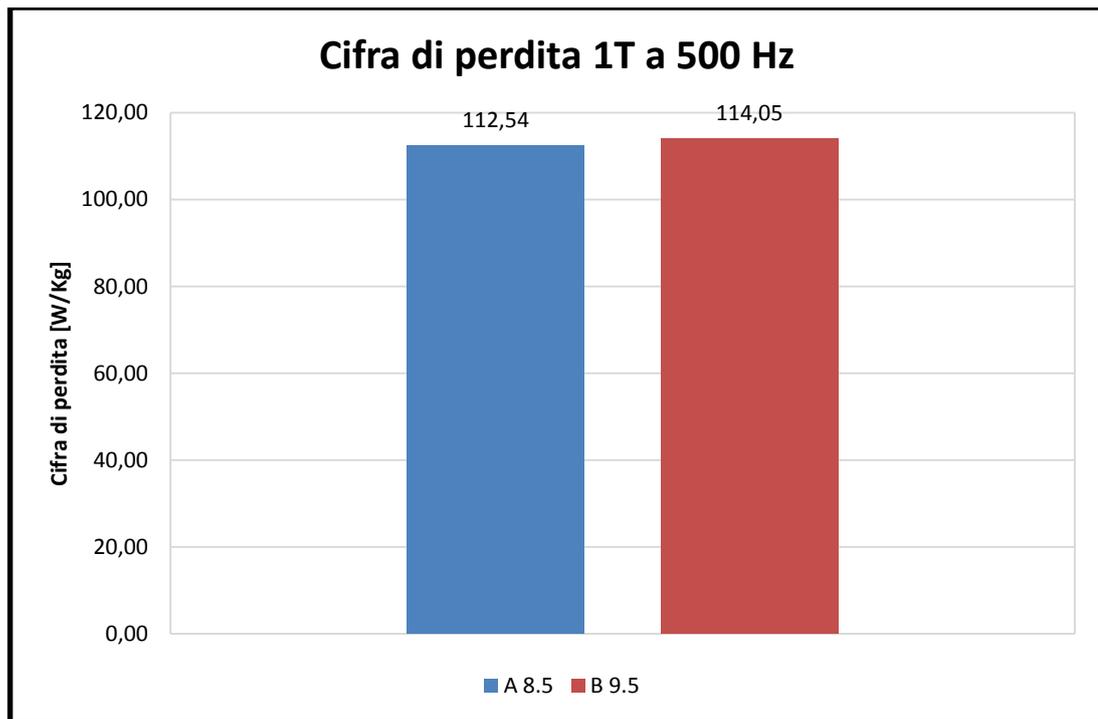


Figura 3-4: Confronto cifra di perdita ad 1T a 500Hz tra i migliori materiali epossidico e fenolico

### 3.3 SMC CON LAYER INORGANICO Fe-Si

Il layer inorganico sulla quale si sviluppa la tesi è il silicio, in quanto questo elemento della tavola periodica presenta un valore di conducibilità molto basso ( $2.52 * 10^{-4} [m\Omega]^{-1}$ ), quindi si presta bene ad essere utilizzato come rivestimento dei grani di ferro, che invece presentano una alta conducibilità ( $9.96 * 10^6 [m\Omega]^{-1}$ ).

Durante l'attività sono stati realizzati campioni con 3 diverse polveri di silicio, denominate silicio1, silicio2 e silicio3. I primi due sono due diverse granulometrie di un silicio che presenta una grado di purezza 4N il cui nome commerciale è silicio solar. Nello specifico il silicio1 presenta una granulometria inferiore ai  $45\mu m$ , mentre il silicio2 maggiore ai  $45\mu m$ . Per quanto riguarda il silicio3, è un silicio con grado di purezza 9N, con granulometria inferiore ai  $45\mu m$ . Anche per quanto riguarda le polveri di ferro, sono state utilizzate polveri di due diversi produttori. Le polveri originali, presentano una granulometria sparsa, quindi vengono suddivise in base alla granulometria in polveri S1, S2 ed S3. Le percentuali utilizzate per la creazione dei campioni sono state scelte in base agli studi precedentemente effettuati da altri tesisti, in particolare sono state scelte delle percentuali che presentassero le minori perdite ad alta frequenza. La scelta è ricaduta su una percentuale composta dal 50% di S1, 30% di S2 e 20% di S3.

## 4. REALIZZAZIONE SMC IN LABORATORIO

In questo capitolo verranno spiegati tutti i procedimenti che stanno alla base della realizzazione degli SMC sviluppati durante l'attività di tesi.

La preparazione dei campioni incomincia con il setacciamento sia del ferro che del silicio (separatamente), in modo da ottenere delle polveri di granulometria desiderata. Per quanto riguarda il ferro, esso viene diviso in 3 polveri denominate S1 ( $>125\mu\text{m}$ ), S2( $63\mu\text{m}<x<125\mu\text{m}$ ), ed S3( $<63\mu\text{m}$ ). Il silicio invece viene setacciato per ottenere una granulometria minore di  $45\mu\text{m}$ .



*Figura 4-1: setacci impilati per ottenere le polveri di ferro S1, S2 ed S3*

## 4.1 PROCESSI UTILIZZATI

Ottenute le polveri, inizia la fase di miscelazione del silicio con il ferro. I processi utilizzati per miscelare le polveri sono fondamentalmente due, più un terzo processo combinazione delle prime due:

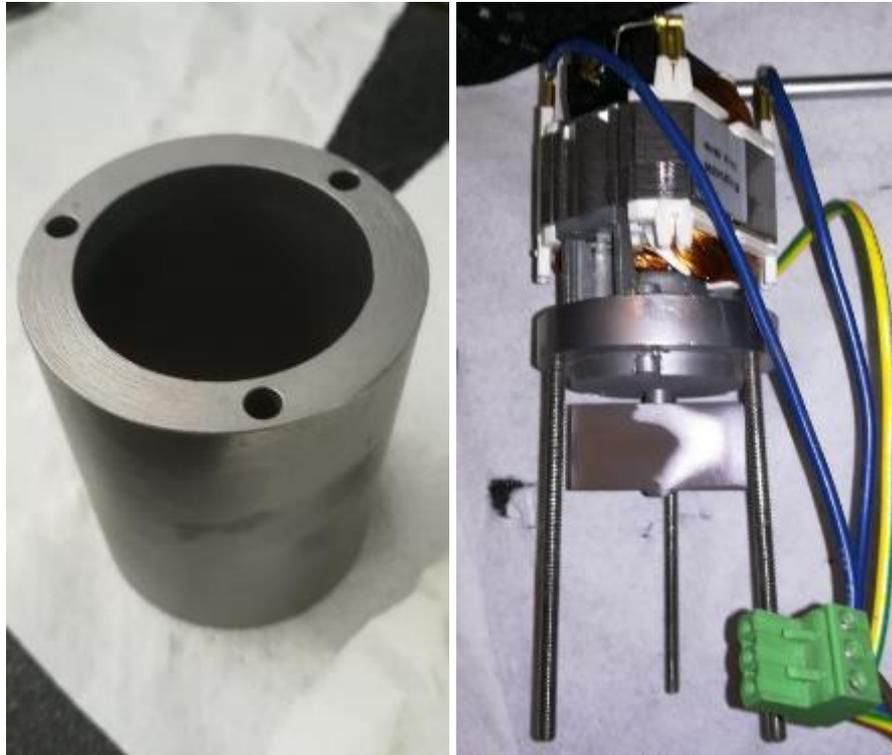
**-miscelazione standard:** Le polveri di ferro e silicio, vengono inserite tutte insieme in un contenitore di materiale plastico, e miscelate tramite l'utilizzo di una turbula per la durata di 30 minuti.



*Figura 4-2: Turbula*

**-ibridizzazione:** Il rivestimento delle polveri di ferro con quelle di silicio avviene tramite un mulino a palette. Vengono per prima cosa inserite le polveri in un cestello metallico di sezione circolare a cui viene applicato un coperchio in cui è presente una paletta anch'essa metallica che viene azionata da un motorino elettrico in c.c. alimentata a 230 volt. La paletta "schiaffeggia" violentemente le polveri, facendole rimbalzare nelle pareti del

cestello con un angolo approssimativamente di 45°. Il risultato che si ottiene è quello di far aderire le polveri di silicio sui grani di ferro, infatti il composito che si ottiene con questo processo presenta una densità maggiore che con miscelazione standard.



*Figura 4-3: Cestello metallico (a sinistra) e paletta metallica con motorino in c.c. (a destra)*

**Ibridizzazione + miscelazione standard:** L'ibridizzazione viene fatta senza polvere di ferro S3, che viene successivamente miscelata col composito tramite turbula per la durata di 30 minuti. In questo modo si cerca di ottenere dei grani più isolati, in quanto la granulometria dell'S3 risulta simile a quella del silicio, e questo provoca l'assenza di isolamento su alcuni punti della superficie dei grani di S1 ed S2.

Le percentuali in peso di silicio utilizzate durante tutta l'attività di ricerca sono molteplici, questo per avere più informazioni di come questo layer influisse sulle grandezze di interesse, ed in quanto non ci fossero dati precedentemente sviluppati da altri testisti. In particolare sono state realizzate miscele allo 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1% e 2% in peso di silicio. In realtà non tutti i processi sono stati applicati a tutte le percentuali, questo perché quali fossero le percentuali che mostravano i risultati migliori, e che la miscelazione standard fosse il processo più adeguato, lo si era intuito già nelle prime settimane di attività.

## 4.2 PRESSIONI

Una volta ottenuta la miscela, inizia la fase di realizzazione vera e propria dei campioni su cui svolgere le misure. Le polveri vengono compattate tramite una pressa idraulica azionata tramite un controllo sviluppato su ambiente di lavoro LabView.



*Figura 4-4: Pressa idraulica*

Tramite il software vengono impostati alcuni dati tra cui l'altezza della camera, la pressione da esercitare e la pressione di mantenimento. L'altezza della camera, non è altro che l'altezza dello stampo che accoglierà le polveri. Dipendentemente dalle pressioni che si dovranno esercitare, vengono impostate delle altezze della camera in modo da ottenere il campione finale dell'altezza desiderata, ovviamente con qualche margine di errore. Esse vengono scelte in base all'esperienza acquisita dai responsabili dell'attività durante gli ultimi anni di ricerca. La pressione da esercitare viene inserita come input nell'interfaccia grafica del software in [bar]. Dipendentemente dalla forma dello stampo dovrà infatti essere inserita una pressione in bar diversa per ottenere la stessa pressatura in [MPa]. Ad esempio per ottenere un campione di forma parallelepipedica pressato a 700MPa bisogna impostare una pressione esercitata di 58bar, mentre per ottenere un dischetto bisogna impostare una pressione esercitata di 133bar.



*Figura 4-5: Immagine di uno stampo a forma di dischetto*

La maggior parte dei campioni è stata compattata proprio alla pressione di 700MPa, in quanto questo valore rappresenta uno standard commerciale. Inoltre sono state effettuate anche pressature a 800MPa e 900MPa, per avere un quadro più vasto di come questo parametro influenzasse le caratteristiche di interesse.

Per prima cosa viene spruzzato nello stampo un liquido lubrificante in modo da evitare che l'eccessiva pressione esercitata faccia aderire il campione al fondo dello stesso, dopo si procede al riempimento dello stampo con le polveri, ed infine si aziona la pressa. Una volta ottenuti i campioni, essi vengono siglati e misurati tramite calibro digitale, dopodiché vengono carteggiati per rimuovere le bavette di materiale in eccesso dai bordi in quanto influiscono negativamente sulle misure di permeabilità magnetica poiché tendono a saturare, e successivamente vengono pesati.

Per quanto riguarda il campione di forma parallelepipedica, esso è già pronto per essere caratterizzato, mentre per quanto riguarda il toroide bisogna ancora passare dalla fresa, che inciderà il dischetto per ottenere la forma desiderata.



*Figura 4-6: Fresa (a sinistra) e computer a controllo numerico (destra)*

### 4.3 TRATTAMENTI TERMICI

Il campione non trattato termicamente viene chiamato in gergo “campione al verde”, e se bensì presenti delle buone caratteristiche magnetiche e di perdita, un materiale del genere non presenta delle proprietà meccaniche adeguate per essere utilizzato su una macchina elettrica. A questo scopo è fondamentale trattare termicamente il campione, in modo da eliminare gli stress meccanici e fornire resistenza meccanica. In questo ambito si sono provati trattamenti termici in due ambienti differenti, aria e vuoto. Il trattamento in aria è uno standard commerciale nonché il trattamento più economico ma che comporta la formazione di ossidi nel campione. La presenza di ossidi però incide in modo molto negativo sulle prestazioni del materiale, presentando permeabilità massime migliori a bassa frequenza rispetto il provino al verde, ma che crollano all’aumentare della stessa, mentre in generale si assiste ad un aumento delle perdite a tutte le frequenze, fino a valori decisamente inaccettabili.



*Figura 4-7: Forno per trattamenti in ambiente ossidante*

. A questo scopo si sono trattati i campioni in vuoto per evitare la formazione di ossidi.

Le variabili durante questi processi sono state:

**-temperatura di trattamento:** sono state provate diverse temperature di trattamento. Per quanto riguarda l’ambiente aria, le temperature di riferimento sono 300°C, 400°C, 500°C, 600°C e 700°C. Per quanto riguarda l’ambiente vuoto, si è provata una prima cottura di alcuni campioni a 900°C dalle cui misure si è rilevato che già alla frequenza di 50Hz non mostrassero più delle caratteristiche da SMC, e successivamente sono state provate temperature di 400°C, 500°C e 600°C.

**-tempo di trattamento:** sono stati effettuati trattamenti per tempistiche differenti. Inizialmente i campioni in aria sono stati trattati per 30 minuti a temperatura costante, con rampe di temperatura di 30 minuti per le temperature di 300°C, 400°C e 500°C e rampe di 60 minuti per le temperature di 600°C, e 700°C. Successivamente si sono realizzati dei campioni trattati sia in vuoto che in aria, al fine di avere dei dati di confronto tra i due metodi, e si è optato per un trattamento termico a temperatura costante per la durata di 120 minuti.



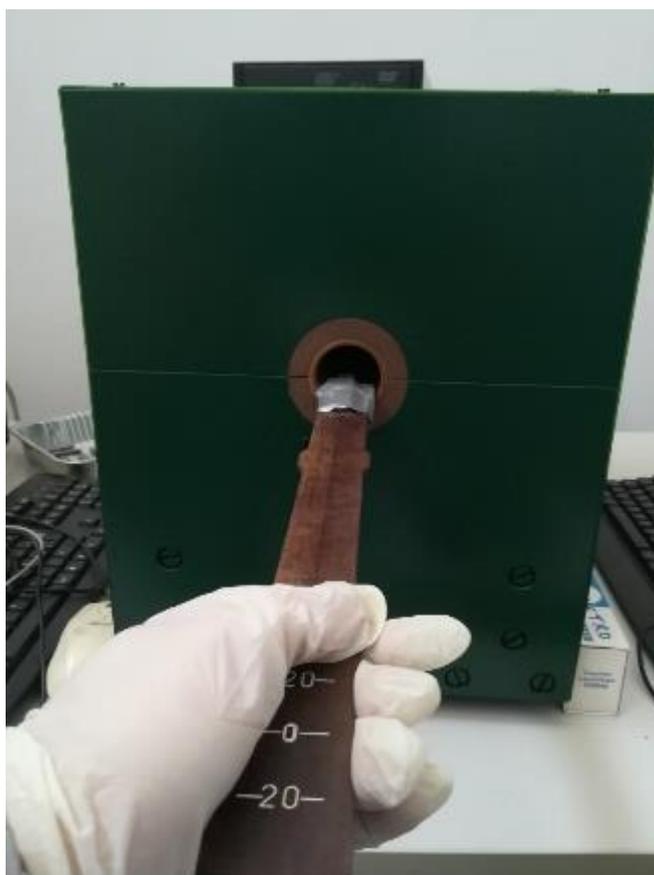
*Figura 4-8: Forno TAV (Tecnologie Alto Vuoto)*

## 5. TIPOLOGIE DI PROVE EFFETTUATE

Le prove effettuate mirano ad ottenere misure di permeabilità magnetica, induzione in funzione del campo magnetico applicato, cifra di perdita e ciclo di isteresi tramite la caratterizzazione magnetica, oltre che a misure di resistività e campo coercitivo per avere studi più estesi ed analisi future più veloci. A queste vanno aggiunte anche delle prove meccaniche a flessione.

### 5.1 COERCITIVITÀ

La misura di campo coercitivo è ottenuta tramite uno strumento analogico denominato coercimetro, che si compone di due parti. Il campione di forma parallelepipedica viene fissato ad un'asta di legno tramite nastro isolante ed inserito nel primo strumento, dentro la quale sono presenti degli avvolgimenti che producono un campo magnetico stazionario.



*Figura 5-1: Coercimetro*

Attraverso il secondo strumento viene impostata l'intensità di tale campo, e viene scelta la scala con la quale leggere i risultati, mostrati da un interfaccia digitale. Nello specifico la scala scelta è in [kA/m], e il campo magnetico ha intensità di 20 kA/m.



*Figura 5-2: Coercimetro*

La procedura è semplice, il campo magnetico viene portato da 0 a 20kA/m con una certa velocità, dopodiché (presumendo che il campione sia arrivato in saturazione), viene smagnetizzato fino ad ottenere un valore di induzione residua nulla. Il campo magnetico (negativo) applicato per ottenere tale induzione residua nulla rappresenta appunto il campo coercitivo del materiale.

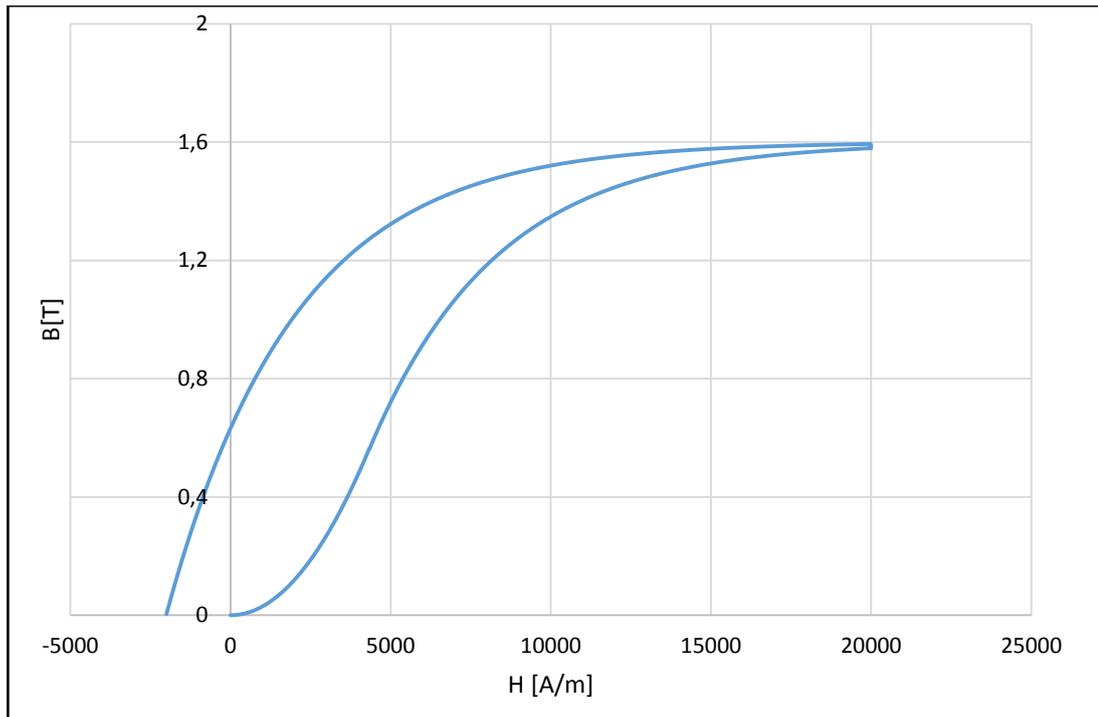


Figura 5-3: Esempio curva di prima magnetizzazione, e smagnetizzazione successiva

## 5.2 RESISTIVITÀ

La misura di resistività è stata ricavata alimentando il campione in corrente continua, impostata con un multimetro digitale, e leggendo tramite un secondo multimetro digitale la tensione tra due punti del campione.

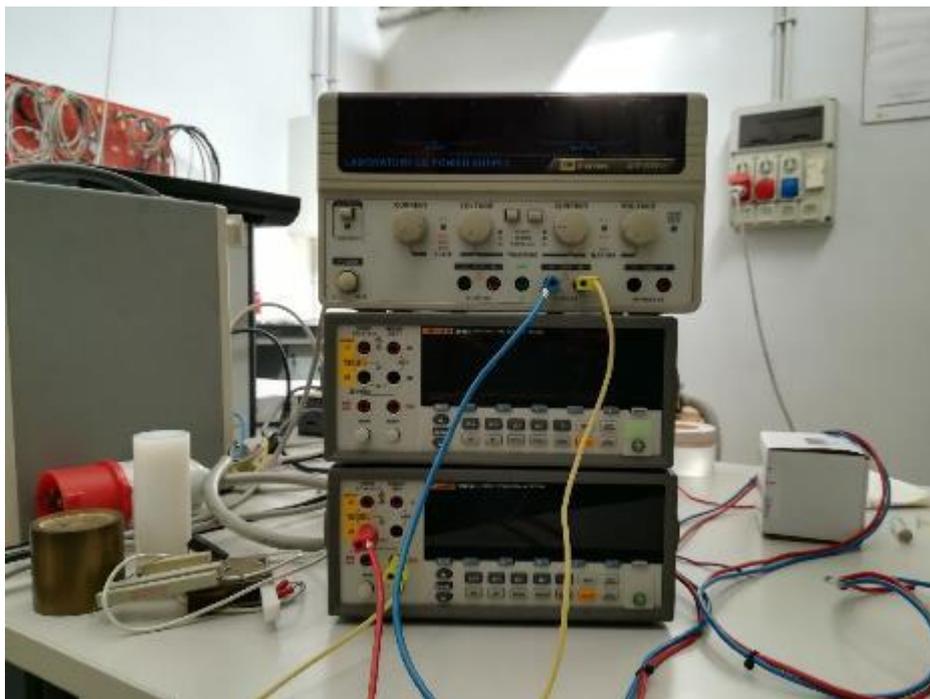
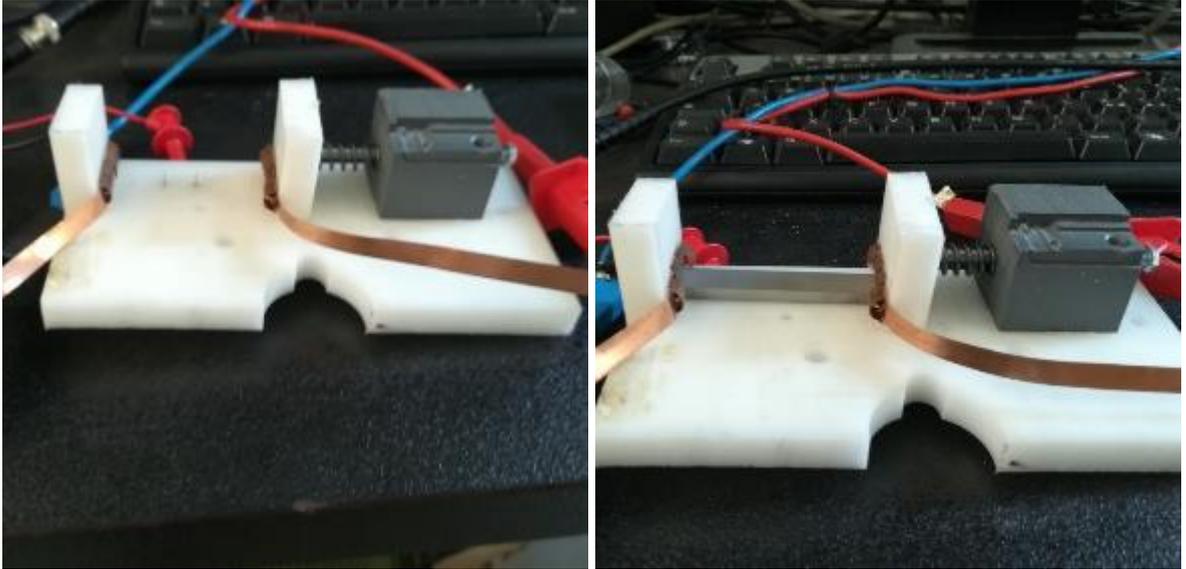


Figura 5-4: Alimentatore (sopra) ed i due multimetri digitali (sotto)

Il campione viene appoggiato su un piano di materiale plastico, dove sono stati applicati due fori da cui vengono fatti passare gli elettrodi del voltmetro. Il campione viene bloccato tramite un sistema a molla.



*Figura 5-5: Sistema per la misura di resistività*

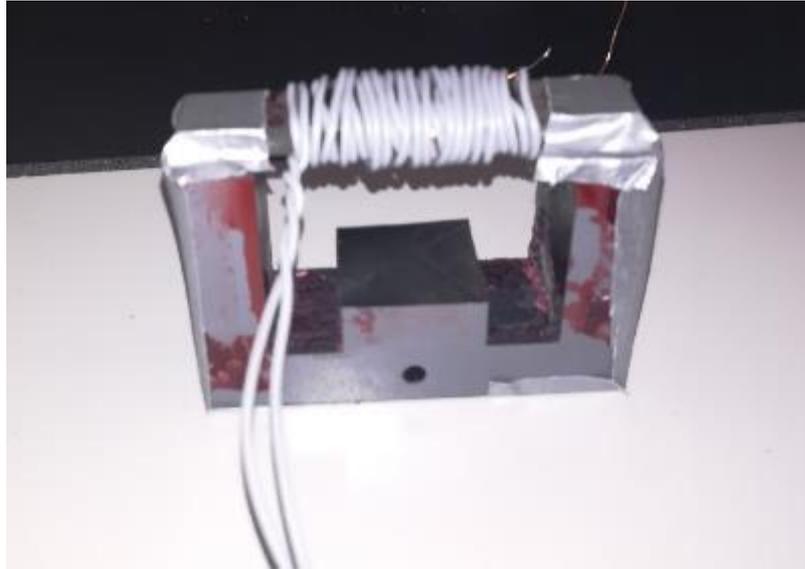
Ottenute le letture di corrente ( $I$ ) e tensione ( $V$ ), tramite un foglio di calcolo Excel si è proceduto alla valutazione della resistività ( $\rho$ ) dei materiali espressa in  $[\mu\Omega m]$  tramite la formula:

$$\rho = \frac{V}{I} * \frac{S_c}{d_e} * 10^{-6} [\mu\Omega m] \quad (19)$$

Dove  $S_c$  rappresenta la sezione rettangolare del campione, mentre  $d_e$  rappresenta la distanza tra gli elettrodi.

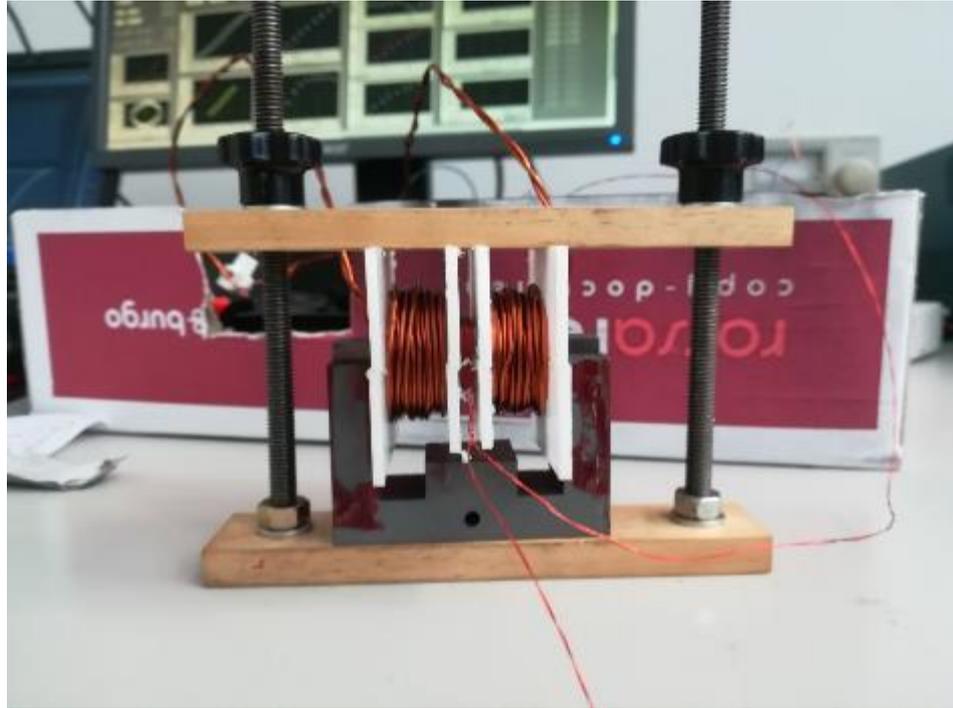
### **5.3 CARATTERIZZAZIONE MAGNETICA**

La caratterizzazione magnetica è stata effettuata tramite una misura denominata single sheet test (SST) sui campioni di forma parallelepipedica. Gli estremi del campione, sul quale venivano realizzati gli avvolgimenti primario e secondario, vengono fissati sugli estremi di un nucleo a U di un trasformatore audio. Inizialmente gli avvolgimenti venivano realizzati manualmente ed il fissaggio avveniva con nastro isolante.



*Figura 5-6: Sistema iniziale per caratterizzazione magnetica con SST*

Solo successivamente si è realizzato un sistema che velocizzava tale caratterizzazione. È stato infatti creato un supporto in materiale plastico di lunghezza inferiore rispetto al campione, sul quale erano già stati pre-realizzati un avvolgimento primario ed un avvolgimento secondario, con un foro nella parte centrale in modo da inserire il campione che presentava dunque gli estremi liberi tali da poter essere appoggiati sugli estremi del nucleo ad U. Il fissaggio avviene tramite due aste di legno compresse tramite un sistema vite-bullone.



*Figura 5-7: Sistema usato successivamente per caratterizzazione magnetica con SST*

Solo nella parte finale si sono realizzate delle caratterizzazioni magnetiche su toroidi, sulla quale viene realizzato un isolamento in nastro isolante sopra il quale vengono realizzati gli avvolgimenti.



*Figura 5-8: Toroide avvolto per caratterizzazione magnetica*

Il primario viene alimentato in tensione alle frequenze di interesse, con il secondario a vuoto collegato ad una scheda di acquisizione dati, a cui è collegata anche una sonda di corrente per la misura di corrente al primario. I dati vengono inviati ad un computer, ed elaborati su un programma sviluppato in ambiente LabView, che permette di ottenere le grandezze di

interesse (caratteristica permeabilità, caratteristica induzione, cifra di perdita ad 1T, ciclo di isteresi ad 1T) sotto forma di grafici e/o valori numerici.

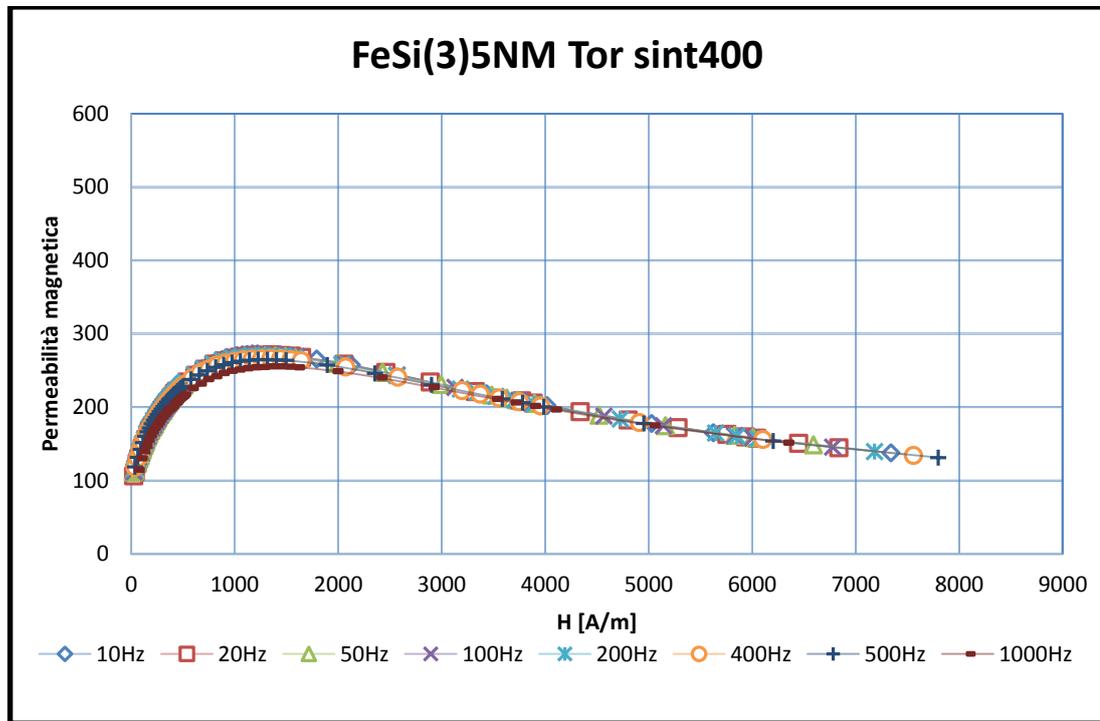


Figura 5-9: Permeabilità magnetica relativa

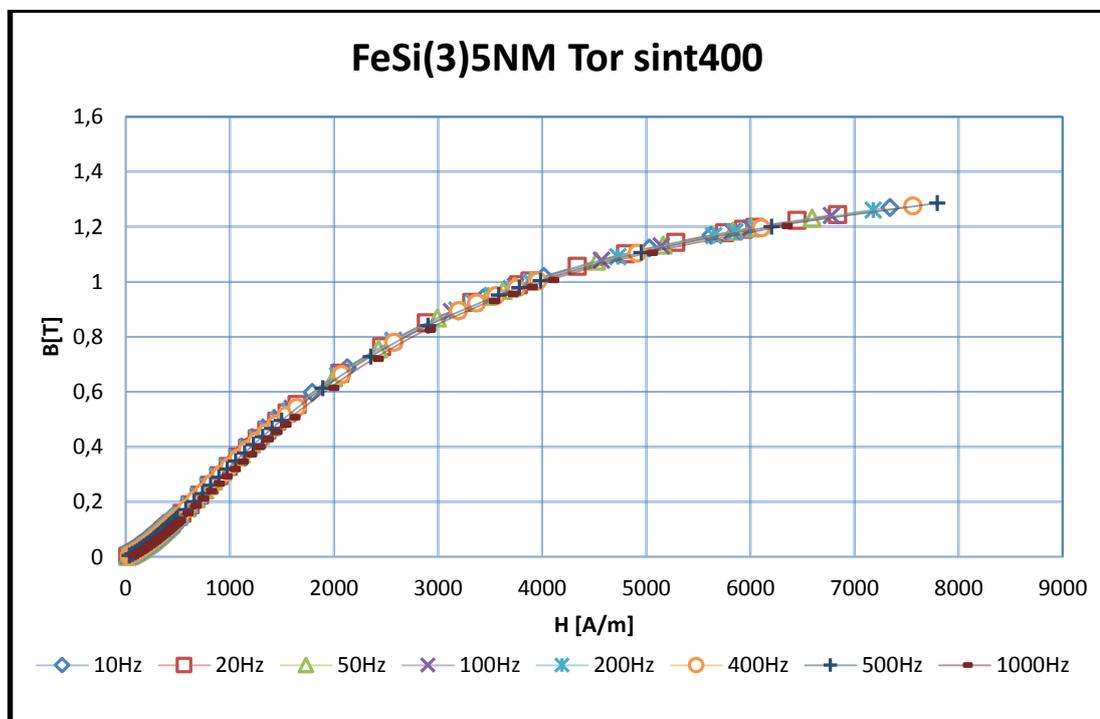


Figura 5-10: Induzione magnetica

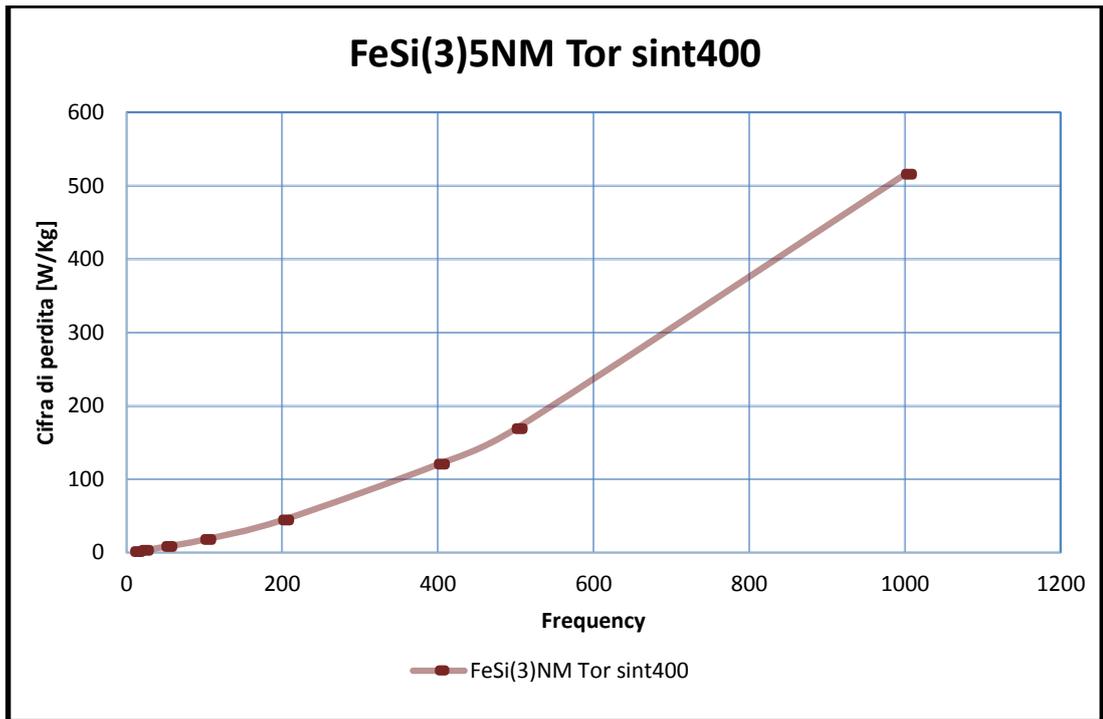


Figura 5-11: Cifra di perdita ad 1 Tesla

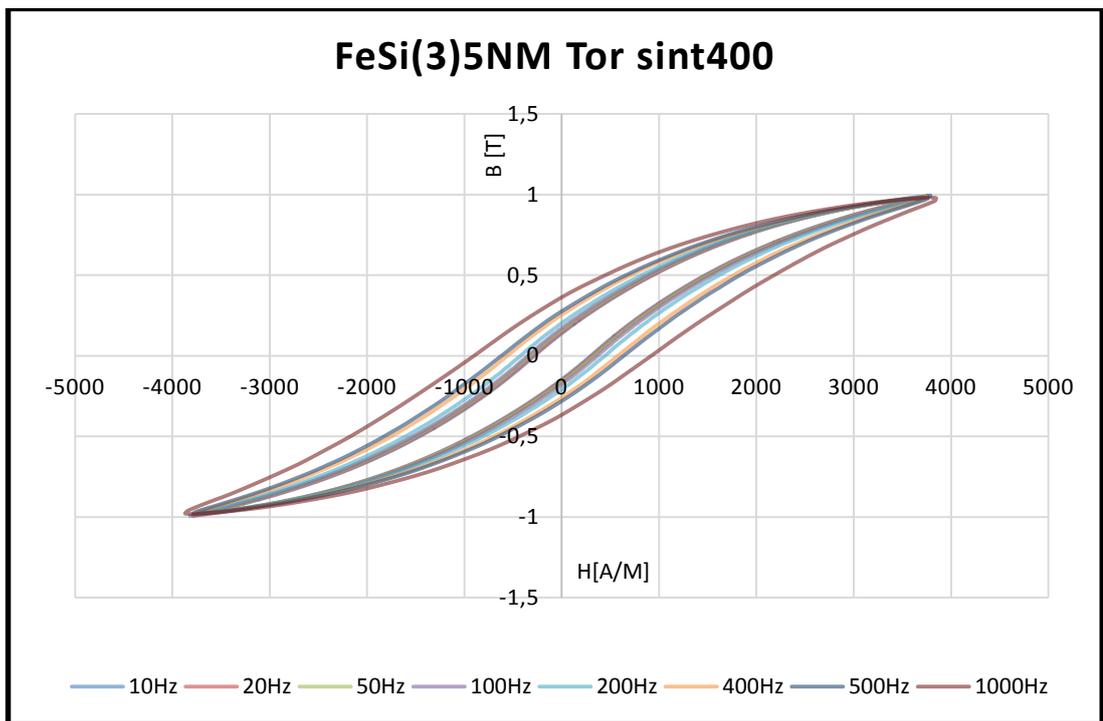


Figura 5-12: Ciclo di isteresi ad 1 Tesla

## 5.4 PROVE MECCANICHE

Le prove meccaniche, sono prove flessione a tre punti e sono state effettuate tramite un macchinario dell'azienda Zwick Roell.



*Figura 5-13: Macchinario per prova a flessione a tre punti*

I dati ottenuti vengono processati da pc con un software della stessa casa produttrice, che permette di identificare la tensione di rottura [MPa] ed il modulo di Young del materiale [GPa]. I risultati vengono salvati tramite file Word in forma tabellare.

## 6. ANALISI E VALUTAZIONE DEI RISULTATI

In questo capitolo verranno presentati i dati ottenuti dalle tipologie di prove già discusse nel capitolo precedente.

In quanto l'argomento non era ancora stato trattato da precedenti tesisti, l'attività di ricerca è iniziata senza alcun dato a disposizione, se non le percentuali di ferro da utilizzare, si è scelto di suddividere le prove in prove "preliminari", prove "intermedie" e prove "finali", così come effettivamente si sono susseguite temporalmente.

### 6.1 PROVE PRELIMINARI

Preliminarmente sono state effettuate delle prove alla sola frequenza di 50Hz, su un numero molto elevato di campioni, in cui le variabili sono state

**-polveri di ferro e percentuali utilizzate:** sono state utilizzate due differenti polveri, provenienti da due aziende differenti. La maggior parte dei campioni sono stati fatti con percentuali standard (50%S1,30%S2, 20% S3), mentre per alcuni campioni sono state provate altre percentuali senza l'uso di S3 (30% S1, 70%S2, 0%S3) che in precedenti tesi avevano mostrato dei buoni risultati ad alta frequenza, e un campione con percentuali di ferro uguali alla polvere originale (25%S1, 43%S2, 32%S3).

**-polveri di silicio e percentuali utilizzate:** I campioni sono stati realizzati tutti con silicio1, e un solo campione con silicio2, che differiscono tra loro solo per la granulometria (nome commerciale silicio solar). Le percentuali in peso di silicio dei campioni realizzati durante questa prima fase, sono 0.2%, 0.5%, 1%, 2%.

**-processi utilizzati:** In questa fase si sono utilizzati tutti i processi descritti precedentemente, quindi miscelazione standard, ibridizzazione e ibridizzazione + miscelazione standard. Inoltre sono stati realizzati dei campioni con ibridizzazione senza l'uso di ferro S3.

**-trattamenti termici:** inizialmente è stato provato un trattamento in vuoto alla temperatura di 900°C, che ha dato risultati non adeguati, infatti le prove sui campioni già a 50Hz non mostravano più dei valori caratteristici di un SMC. Successivamente allora si sono provati solo trattamenti termici in aria a temperature di 300°C, 400°C, 500°C, 600°C e 700°C.

L'obiettivo principale di questa prima fase è stata quella di avere delle indicazioni di massima su quali fossero le migliori polveri da usare e in che percentuali, sia per quanto riguarda le polveri di ferro sia per quanto riguarda le polveri di silicio, nonché come i differenti processi di miscelazione potessero incidere sulle proprietà magnetiche e cifra di

perdita, e come la temperatura influenzasse tali valori alla frequenza di 50Hz. In generale a quella frequenza si otteneva sempre un miglioramento della permeabilità massima, ma anche un incremento considerevole delle perdite.

Inoltre in questa fase, le prove sono state effettuate tutte con SST con i campioni avvolti manualmente, questo non ha permesso di fare prove su tutta la mole di campioni realizzati per una questione di tempistiche e spesso la scelta su quali campioni trattare è stata fatta in base ai valori di campo coercitivo e resistività.

## 6.2 PROVE INTERMEDIE

In questo secondo periodo di ricerca, i campioni sono stati realizzati tutti con la medesima polvere di ferro nelle percentuali che hanno mostrato i risultati più interessanti. Inoltre si è passati dall'utilizzare il silicio solar, ad utilizzare un silicio di purezza maggiore (9N) denominato silicio3, che ha mostrato risultati migliori per quanto riguarda la cifra di perdita. Le prove sono state effettuate con SST, tramite un apposito oggetto di materiale plastico, di lunghezza minore rispetto al campione, sulla quale sono stati eseguiti un avvolgimento primario ed un avvolgimento secondario. Questo ha permesso di ottenere misure in modo rapido su tutti i campioni realizzati. Inoltre le prove sono state effettuate, non solo alla frequenza di 50Hz, ma anche alle frequenze di 10Hz, 20Hz, 100Hz, 200Hz, 400Hz, 500Hz ed 1kHz. Avendo ottenuto dalle prove preliminari dei dati sulla quale basare le ricerche successive, si sono ridotte le variabili sulle quali lavorare, che risultano essere:

**-percentuali polveri:** di silicio: le percentuali in peso di silicio utilizzate in questa fase sono dello 0.1%, 0.2%, 0.5% e 1%

**-processi utilizzati:** sono stati utilizzati tutti e tre i processi discussi nei precedenti capitoli, miscelazione standard, ibridizzazione e ibridizzazione + miscelazione standard, per confermare che la bontà dei processi non dipendesse dalla purezza di silicio utilizzato

**-trattamenti termici:** sono stati realizzati dei trattamenti termici a temperature di 400°C, 500°C e 600°C, in entrambi gli ambienti aria e vuoto, in modo da valutare come il differente ambiente influisse sulle prestazioni del materiale.

**-pressione di compattazione:** per avere un quadro più vasto del comportamento di tali materiali, sono state anche realizzate delle compattazioni a pressioni maggiori. Infatti fin ora la pressione di compattazione utilizzata era stata unicamente quella di 700MPa, in quanto rappresenta uno standard commerciale. Successivamente si provate anche delle pressature a 800MPa e 900MPa di alcuni campioni.

### **6.3 PROVE FINALI**

Conclusa l'attività di ricerca, si sono realizzate delle misure su toroidi preparati con le miscele che avevano ottenuto i risultati migliori come compromesso tra caratteristiche magnetiche e cifra di perdita, dopo trattamento termico a 400°C in vuoto. Nello specifico tali miscele risultano essere miscele allo 0.5% e 0.2% in peso di silicio<sup>3</sup> ottenute tramite miscelazione standard. In seguito sono stati preparati anche dei campioni di forma parallelepipedica a sezione quadrata per realizzare delle prove meccaniche a flessione.

Nel capitolo successivo vengono realizzati tutti i confronti di interesse.

## 6.4 CONFRONTO RISULTATI

Al fine di rendere più agevole la lettura dei grafici, viene riportata in forma tabellare la nomenclatura utilizzata per indicare i campioni:

	SIMBOLO	RIFERIMENTO
Tipologia di ferro utilizzata	Fe	Ferro azienda 1
	At	Ferro azienda 2
Processo	NM	Miscelazione standard
	HyALL	Ibridizzazione
	Hy	Ibridizzazione + miscelazione standard
Tipologia di silicio utilizzata	Si	Silicio1
	Si(2)	Silicio2
	Si(3)	Silicio3
Percentuale di silicio utilizzata	9	0,1%
	8	0,2%
	5	0,5%
	3	1%
	1	2%
Forma	"	Parallelepipedo a sezione rettangolare
	Tor	Toroide
	CH	Parallelepipedo a sezione quadrata
Ambiente trattamento termico	"	In aria
	sint	In vuoto
Temperatura di trattamento	400	400°C
	500	500°C
	ecc..	
Pressione di compattazione	"	700MPa
	800	800MPa
	900	900MPa

Tabella 3: Nomenclatura utilizzata

### 6.4.1 CONFRONTO SILICIO

Per confrontare i due Silici utilizzati, si sono presi in esame 3 campioni per silicio, ognuno rivestito con un processo diverso, ma tutti con la stessa percentuale di silicio, pari allo 0,5% peso. Per tutti i campioni sono presentati in ordine:

- curva permeabilità magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- curva induzione magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- istogramma permeabilità massima
- istogramma cifra di perdita ad 1 T
- ciclo di isteresi ad 1 T

Tutti i grafici si riferiscono alla frequenza di 50 Hz, e le prove sono esclusivamente su campioni non trattati termicamente.

Il primo campione preso in esame è un campione ottenuto con miscelazione standard.

Come si può notare dai grafici di  $\mu(H)$  e  $B(H)$ , con questo tipo di miscelazione non vi è molta differenza tra l'uno e l'altro silicio. Il silicio1 tende ad avere una permeabilità massima maggiore, ma tende a diminuire più velocemente all'aumentare del campo magnetico, mostrando dei valori leggermente inferiori per valori di campo magnetico applicato attorno i 5000 A/m

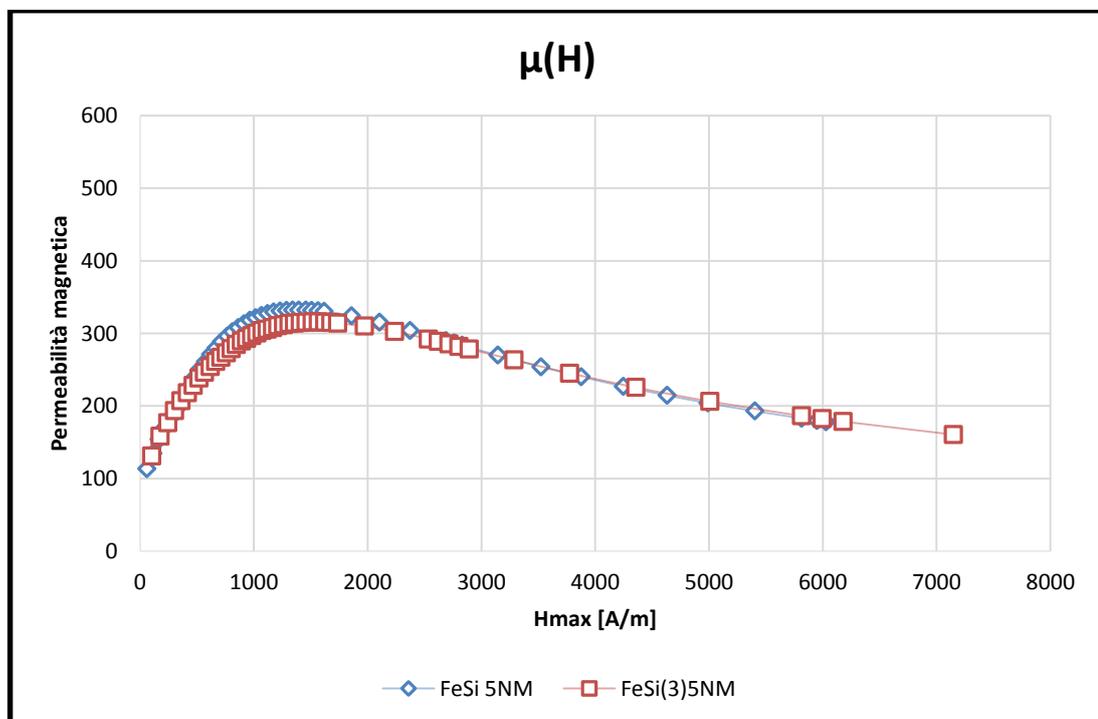


Figura 6-1: Permeabilità magnetica a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con miscelazione standard

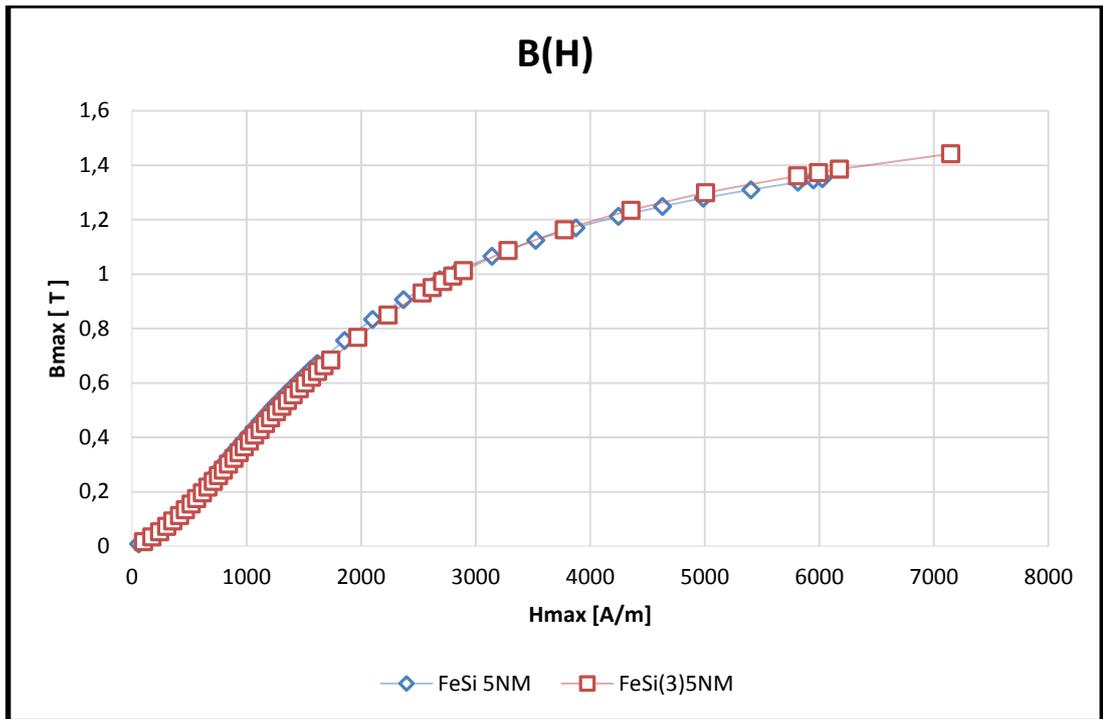


Figura 6-2: Induzione magnetica a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con miscelazione standard

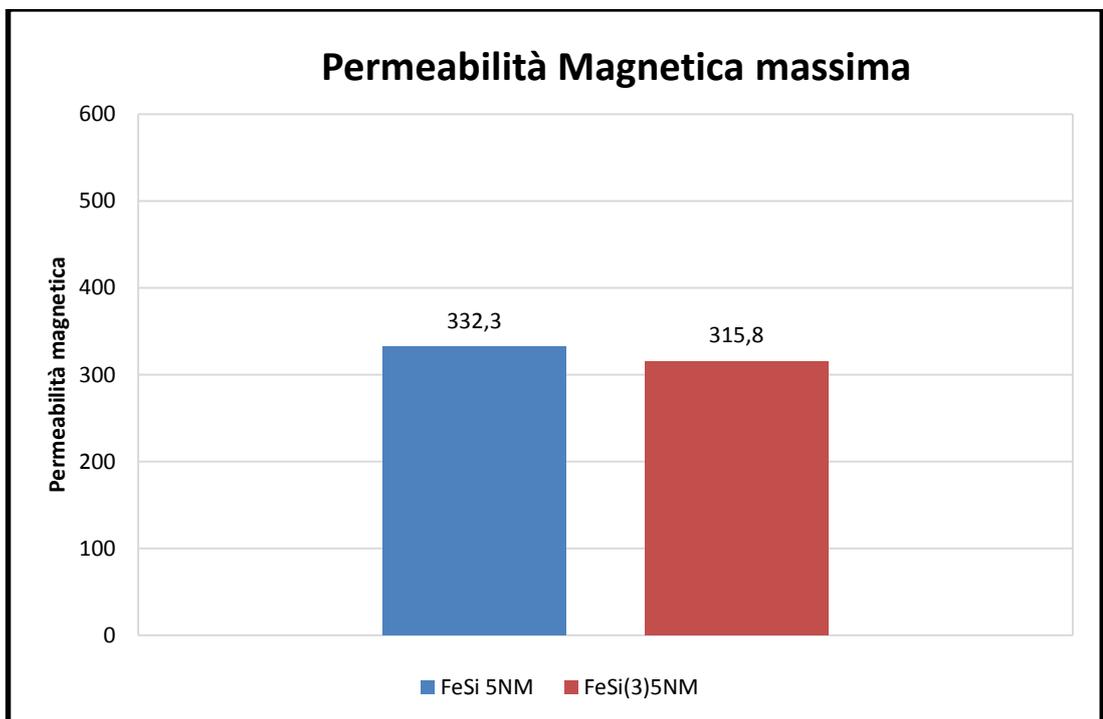


Figura 6-3: Istogramma permeabilità magnetica massima a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con miscelazione standard

Discorso diverso invece per quanto riguarda la cifra di perdita ad 1T, dove invece il Silicio3 risulta avere delle perdite inferiori.

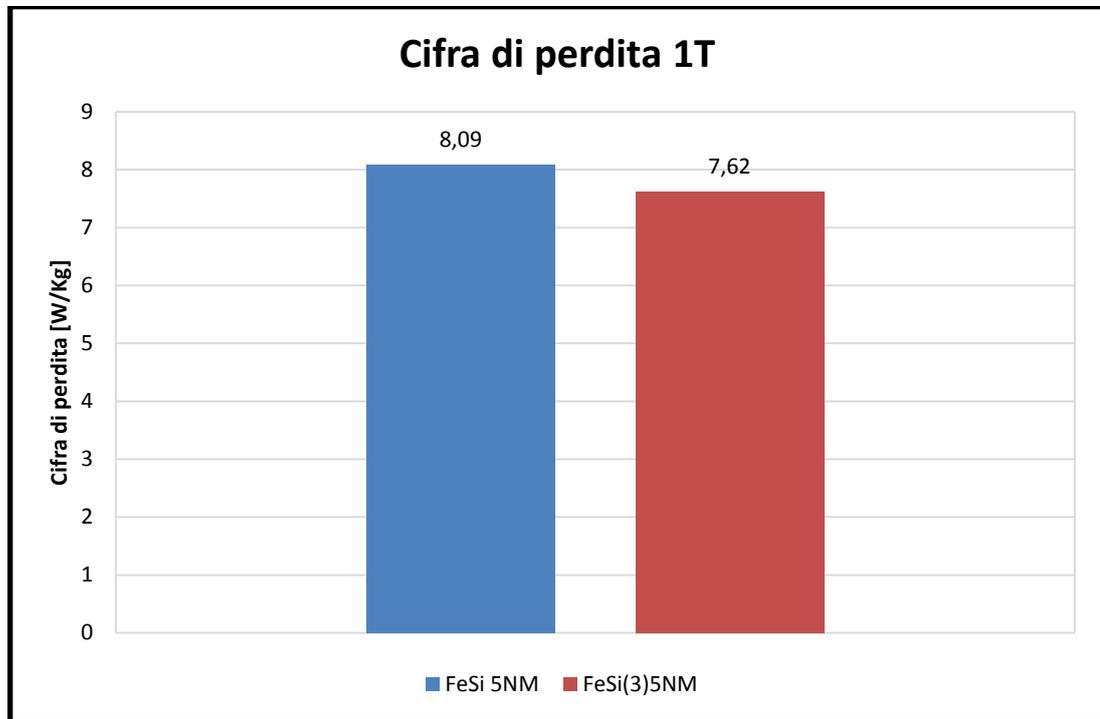


Figura 6-4: Cifra di perdita a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con miscelazione standard

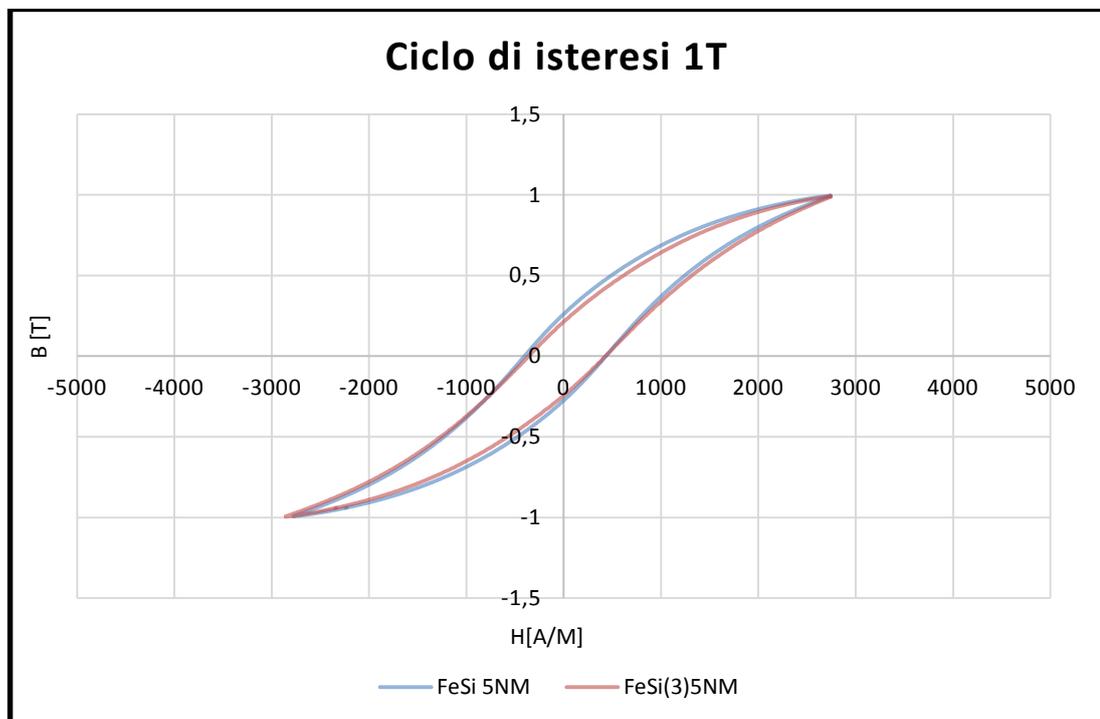


Figura 6-5: Ciclo di isteresi a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con miscelazione standard

I secondi campioni presi in esame, sono campioni ibridizzati. Come si può vedere, nel campione ibridizzato la differenza di permeabilità massima è molto maggiore che nei campione a miscelazione standard, questo in virtù del maggior isolamento ottenuto dal grano di ferro ibridizzato con silicio<sup>3</sup>, in cui sono presenti meno impurità. Anche in questo caso, la permeabilità del campione con silicio<sup>1</sup> diminuisce più velocemente che il campione con silicio<sup>3</sup>, per cui ad alti valori di campo magnetico applicato i valori di induzione sono pressoché uguali. In ogni caso, anche per questa serie di campioni risultano minori le perdite per il campione ibridizzato con silicio<sup>3</sup>.

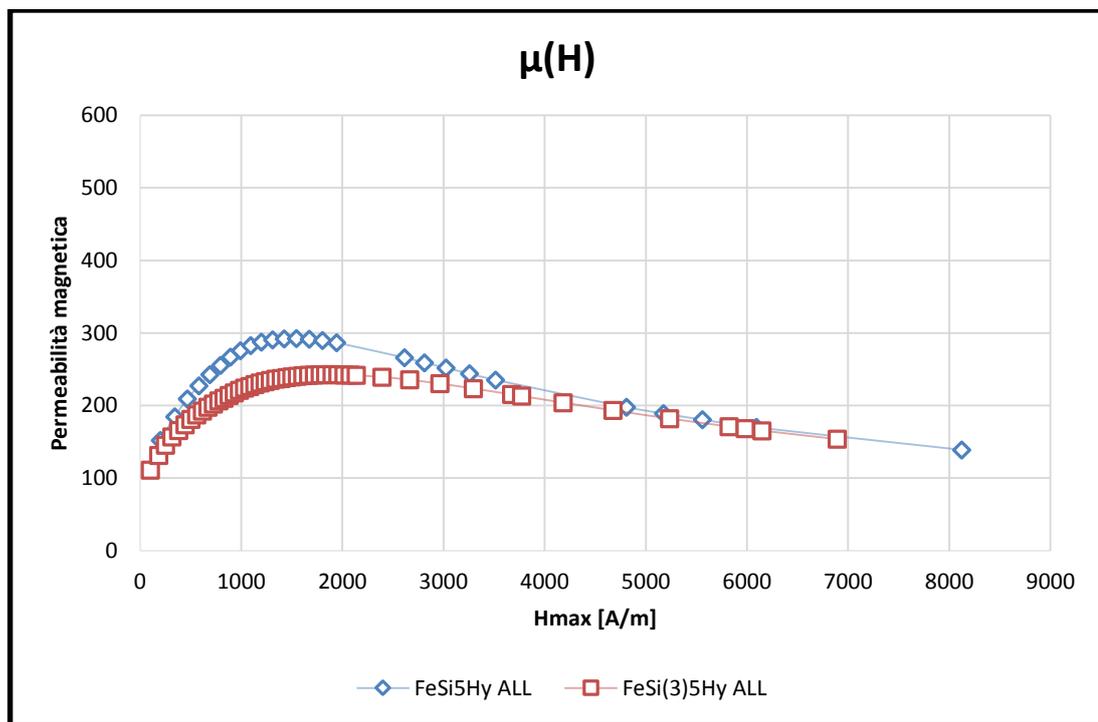


Figura 6-6: Permeabilità magnetica a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con ibridizzazione

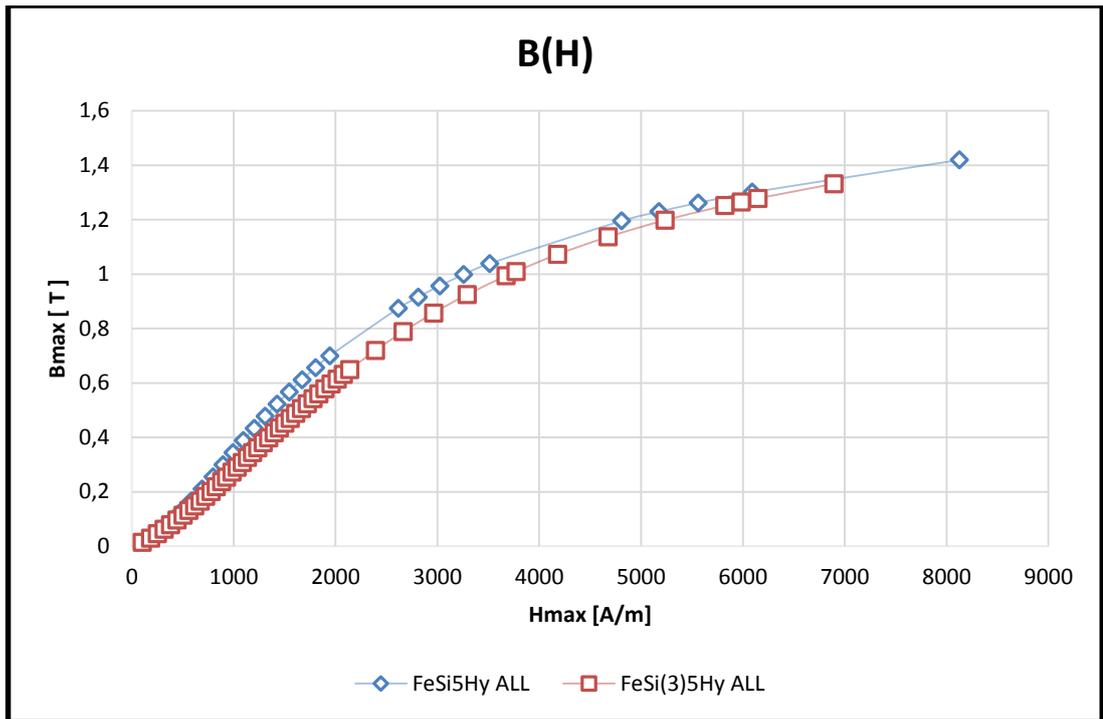


Figura 6-7: Induzione magnetica a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con ibridizzazione

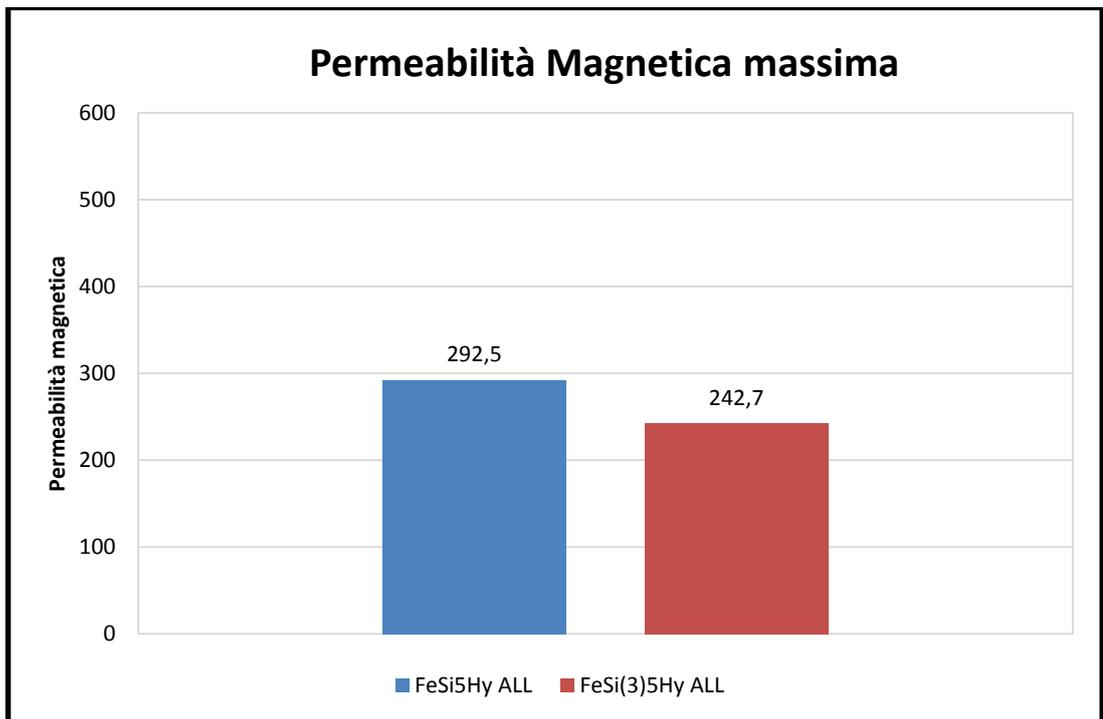


Figura 6-8: Istogramma permeabilità magnetica massima a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con ibridizzazione

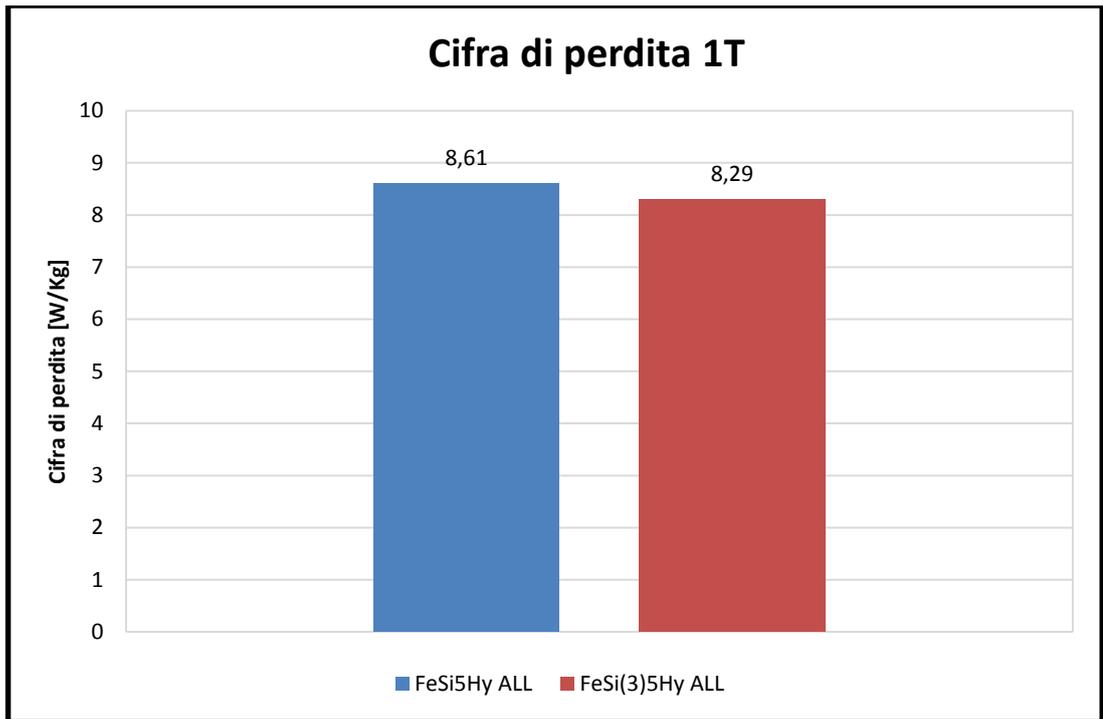


Figura 6-9: Cifra di perdita a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con ibridizzazione

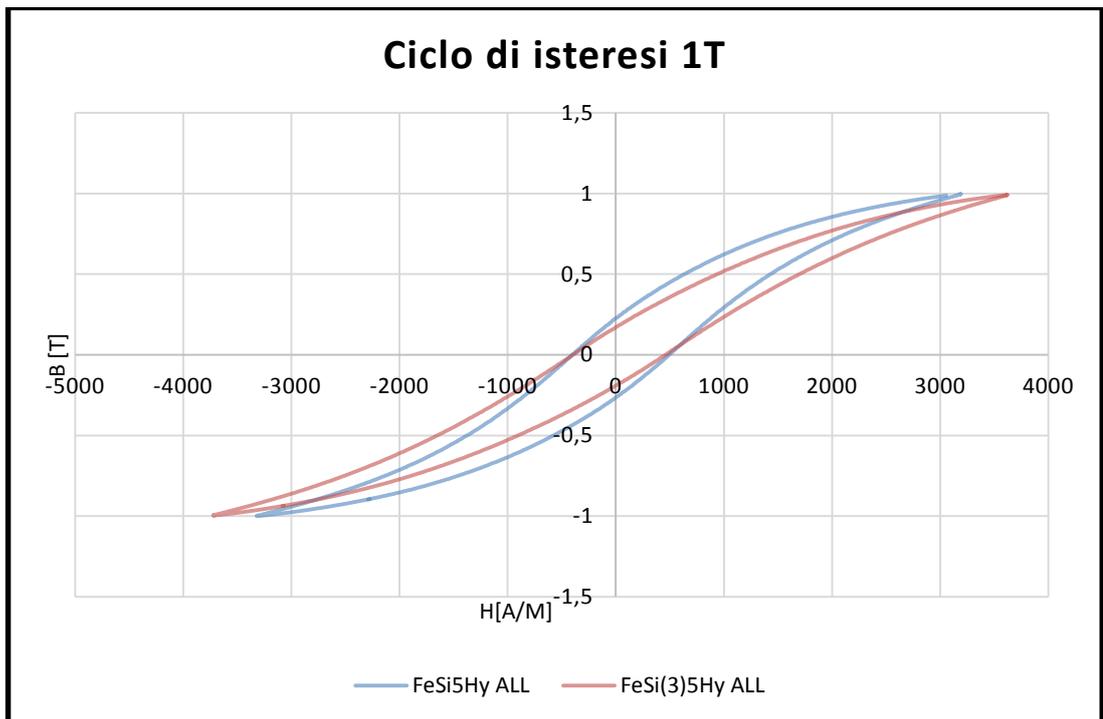


Figura 6-10: Ciclo di isteresi a 1 T 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con ibridizzazione

Il terzo confronto, viene fatto invece tra due campioni che hanno subito trattamento di ibridizzazione + miscelazione standard. In questo tipo di miscelazione, il grano dovrebbe risultare più isolato rispetto al precedente, conferendo al materiale un comportamento più resistivo, quindi permeabilità minori, ma anche perdite minori per correnti parassite. Per il silicio1 si possono notare si delle permeabilità minore, ma risultano anche delle perdite maggiori, probabilmente correlate con un aumento delle eccedenti o un aumento delle parassite a causa di maggiore contatto elettrico tra i grani non completamente isolati. Per il silicio3 invece, diminuiscono le permeabilità, ma le perdite rimangono circa inalterate.

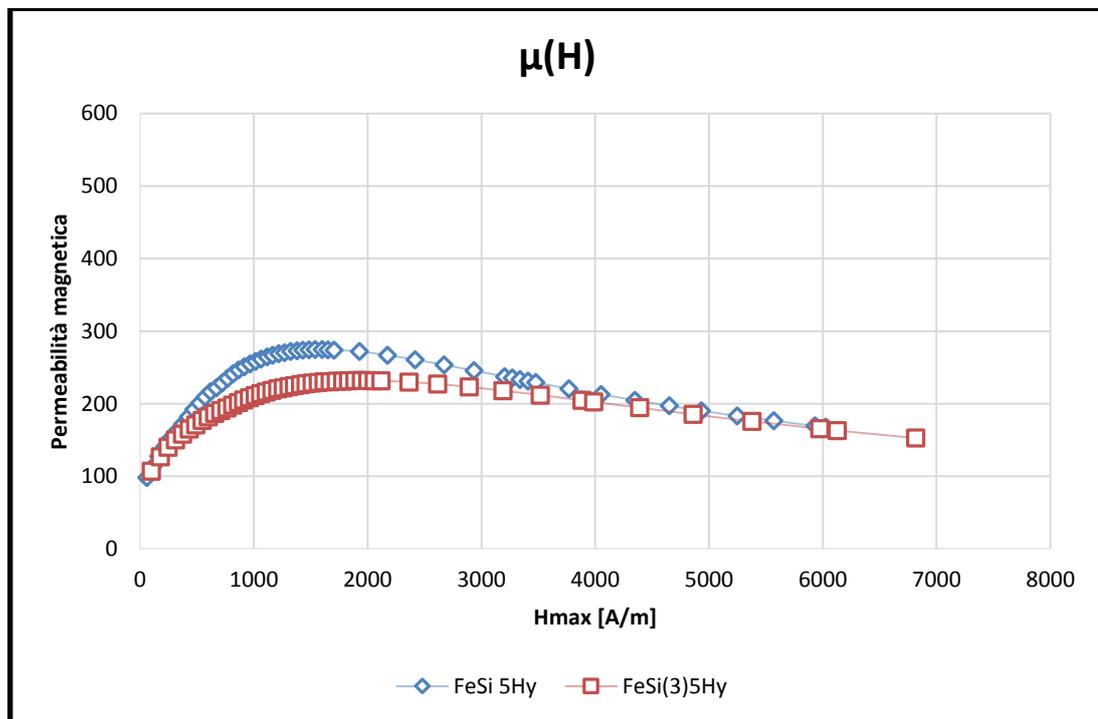


Figura 6-11: Permeabilità magnetica a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con ibridizzazione + miscelazione standard

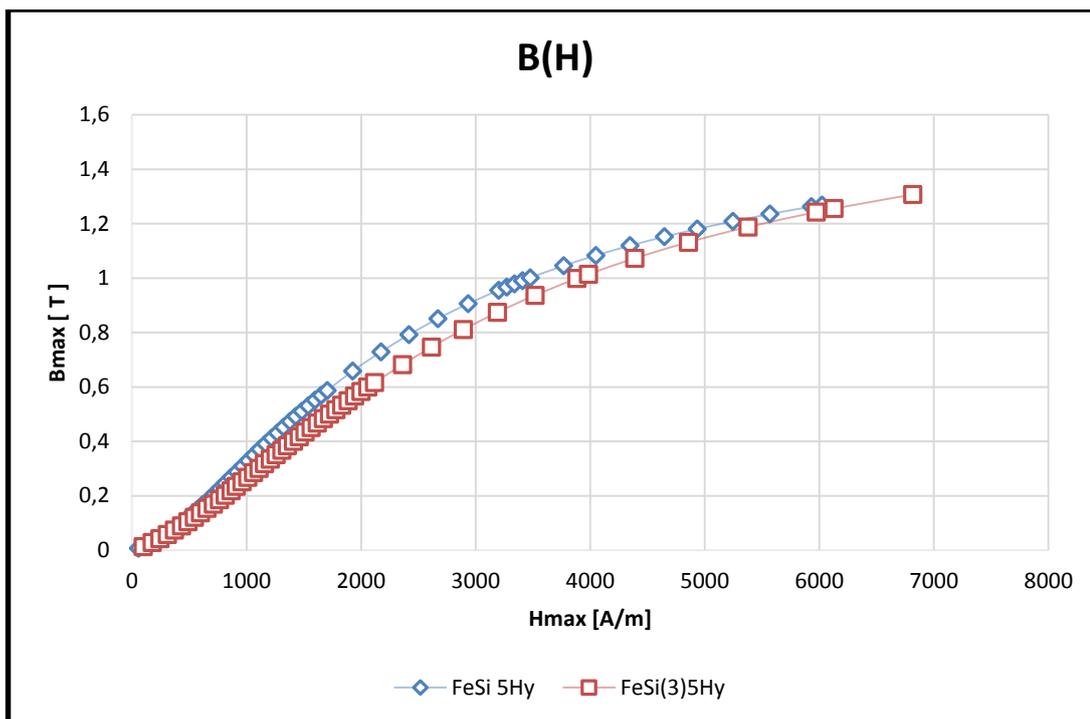


Figura 6-12: Induzione magnetica a 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con ibridizzazione + miscelazione standard

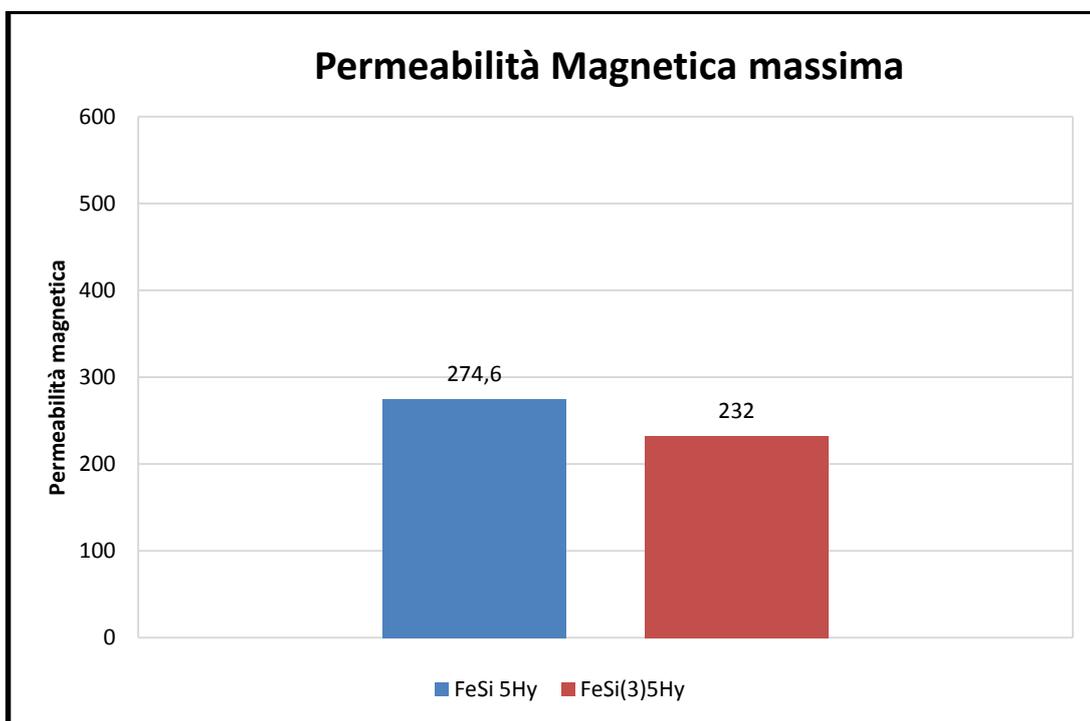


Figura 6-13: Istogramma permeabilità magnetica massima 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con ibridizzazione + miscelazione standard

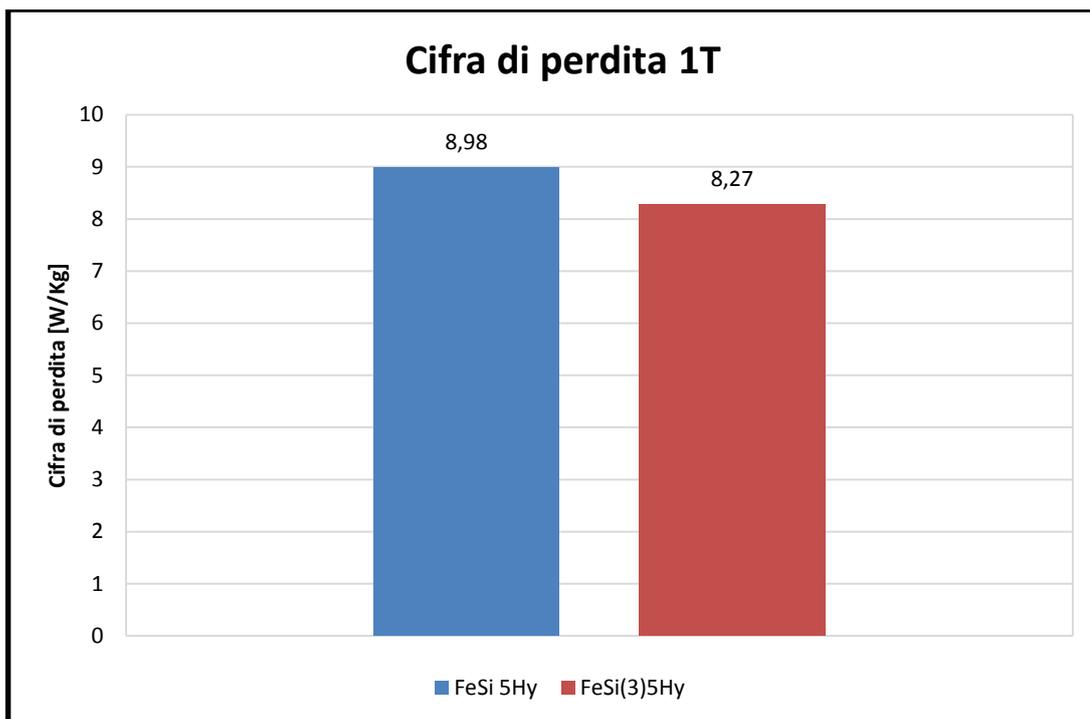


Figura 6-14: Cifra di perdita ad 1T 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con ibridizzazione + miscelazione standard

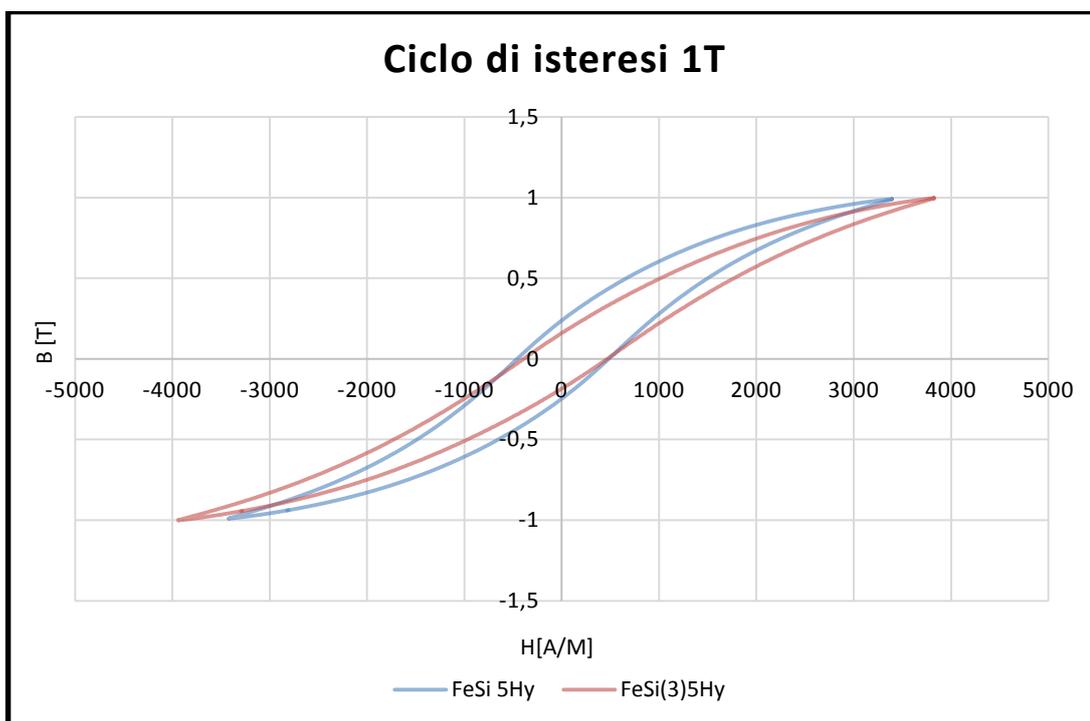


Figura 6-15: Ciclo di isteresi ad 1T 50Hz confronto silicio, campioni ottenuti con ibridizzazione + miscelazione standard

## 6.4.2 CONFRONTO PROCESSI

Per confrontare i processi di miscelazione utilizzati, si presentano le prove di campioni allo 0,5% in peso di silicio a diverse frequenze. I risultati vengono presentati per tre frequenze, 50Hz, 200Hz e 500Hz.

Sono presentati in ordine:

- curva permeabilità magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- curva induzione magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- istogramma permeabilità massima
- istogramma cifra di perdita ad 1 T
- ciclo di isteresi ad 1 T

Per le frequenze considerate, si nota come il rivestimento che mostra i risultati migliori di permeabilità massima sia il rivestimento per miscelazione standard. Guardando gli istogrammi relativi alle permeabilità massime a 200Hz e 500Hz, ci si rende conto di come questo parametro decresca un po' di più nel campione a miscelazione standard rispetto ai rivestimenti ottenuti con ibridizzazione ed ibridizzazione + miscelazione standard all'aumentare della frequenza, ma non abbastanza da rendere gli altri due campioni migliori a frequenze più alte. Una nota che va riportata, è che nella maggior parte dei campioni la permeabilità magnetica massima tra 50Hz e 200 Hz è pressoché costante.

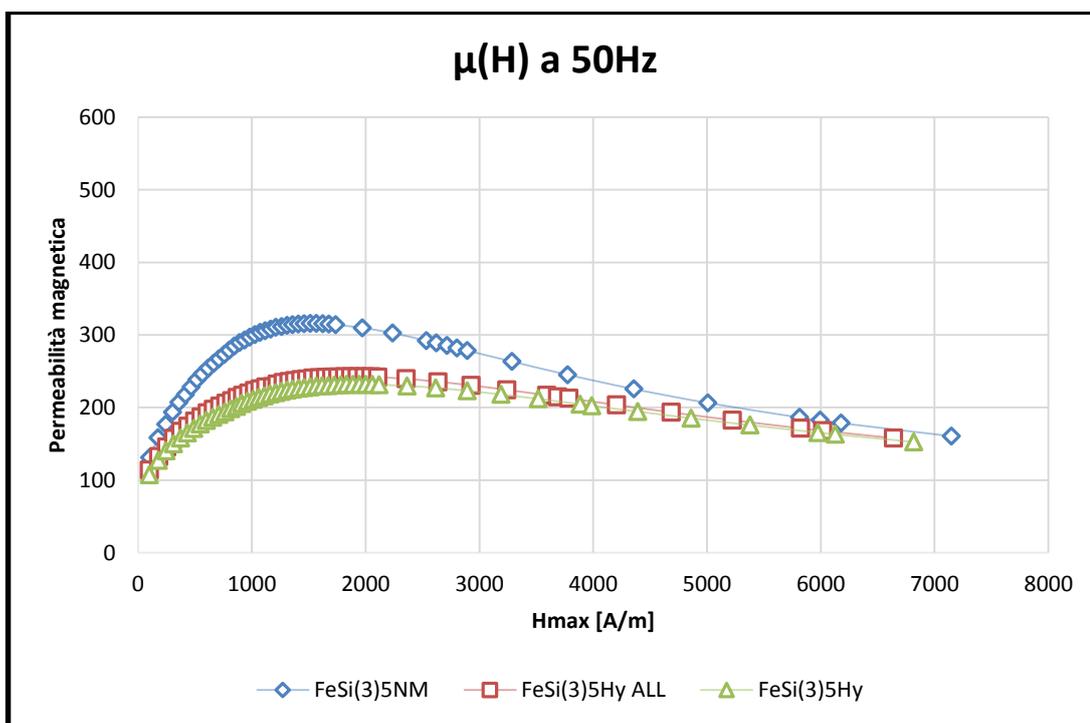


Figura 6-16: Permeabilità magnetica a 50Hz confronto processi

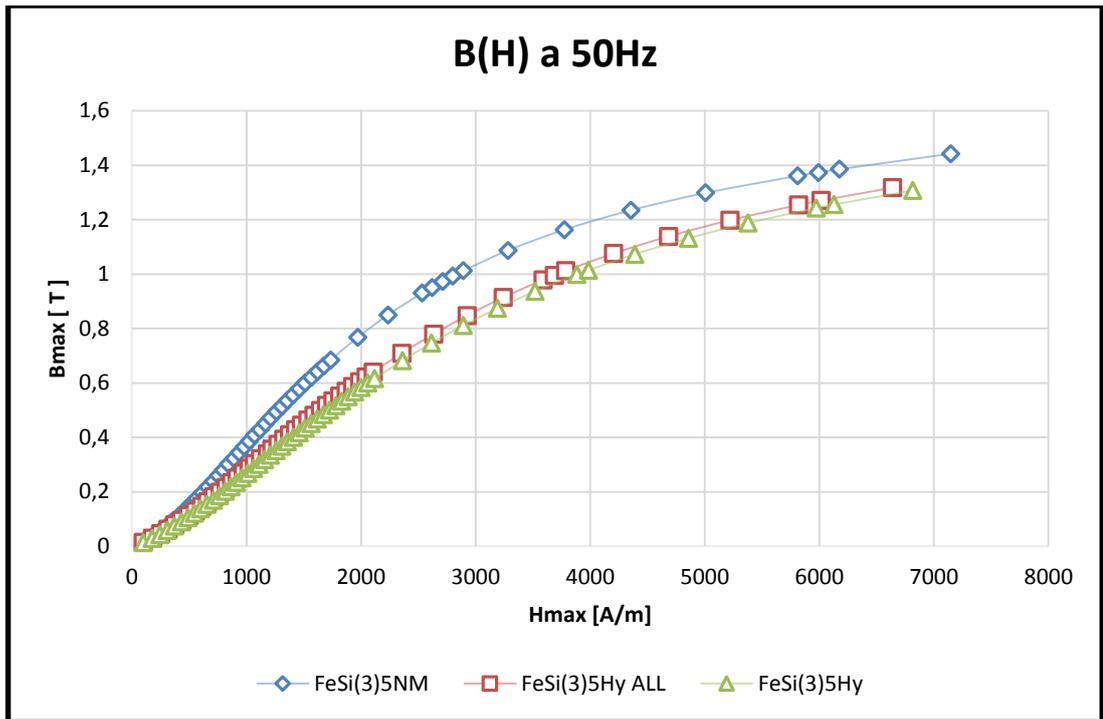


Figura 6-17: Induzione magnetica a 50Hz confronto processi

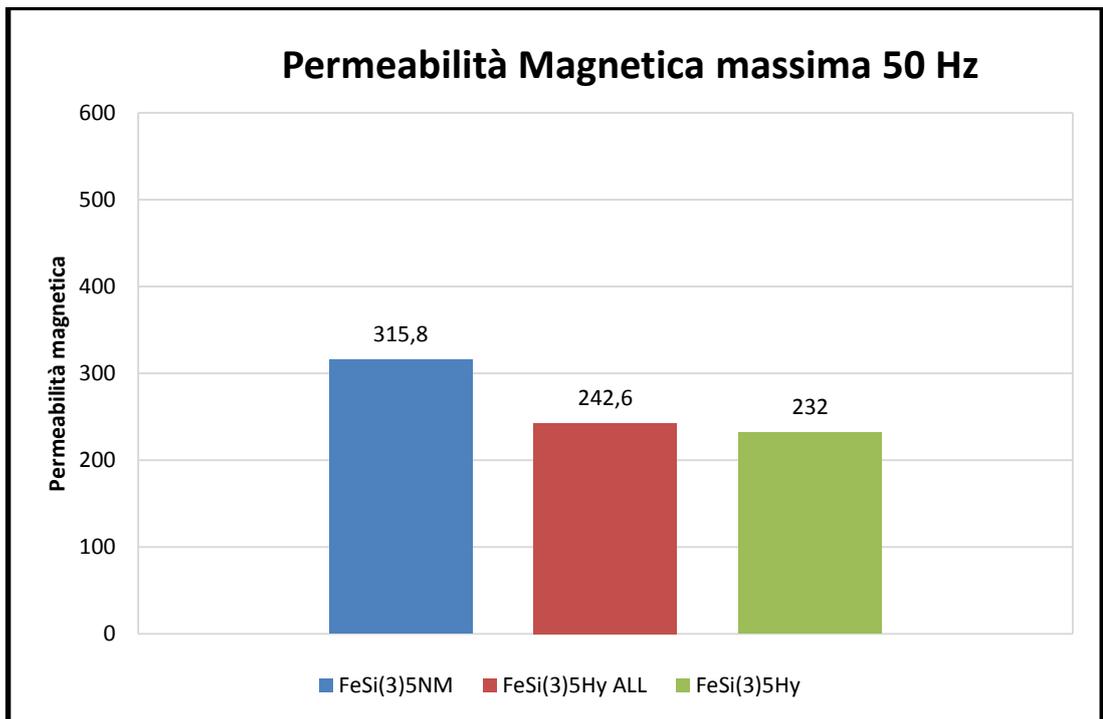


Figura 6-18: Istogramma permeabilità magnetica massima a 50Hz confronto processi

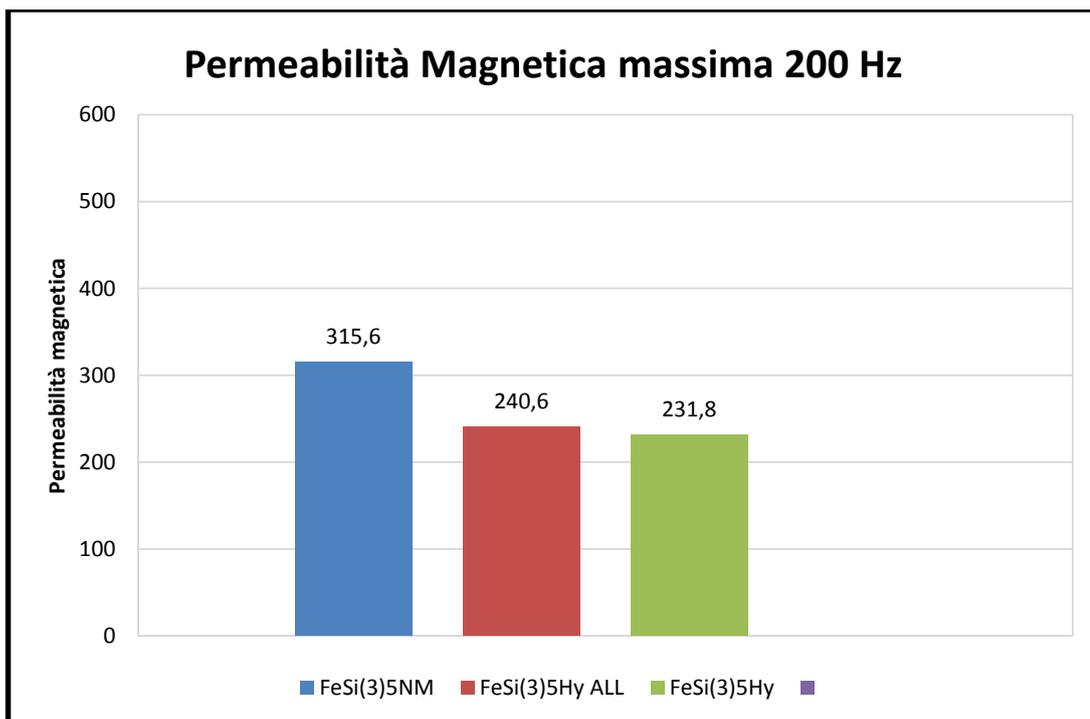


Figura 6-19: Istogramma permeabilità magnetica massima a 200Hz confronto processi

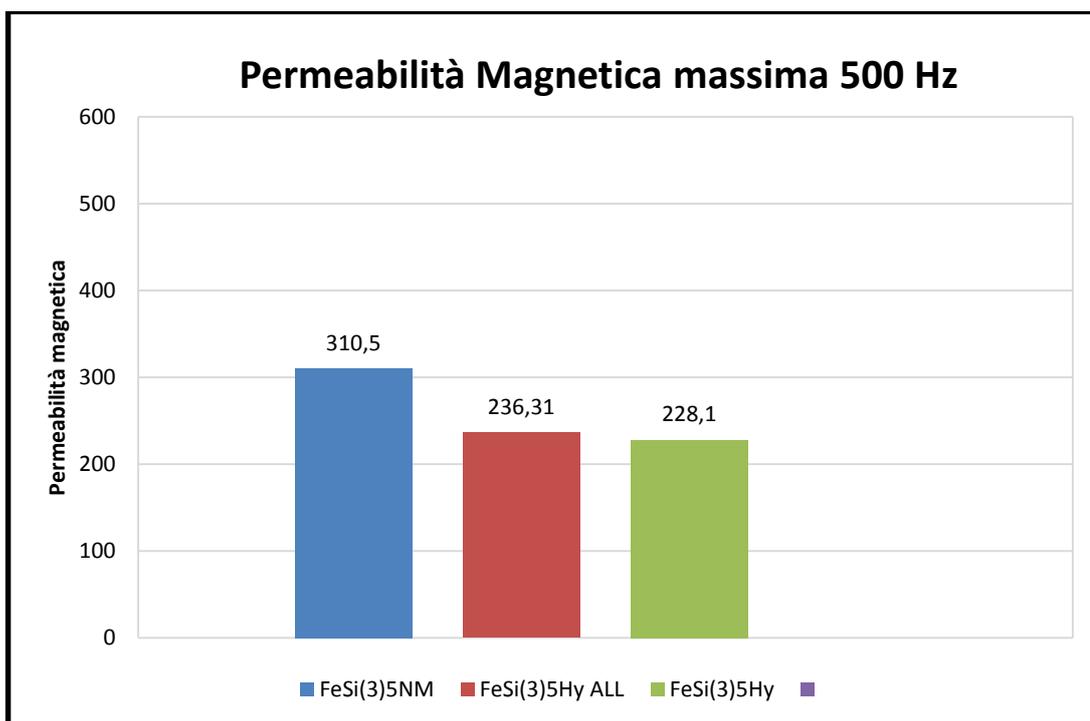


Figura 6-20: Istogramma permeabilità magnetica massima a 500Hz confronto processi

Per quanto riguarda la cifra di perdita, anche in questo caso il campione migliore è risultato essere il campione a miscelazione standard. Le differenze tra il campione semplicemente ibridizzato e miscelato post ibridizzazione, mostrano come il primo soffra maggiormente di

perdite per correnti parassite, dovuto al fatto che i grani di ferro S1 ed S2 siano stati rivestiti non solo con il silicio, ma anche con la polvere di ferro S3.

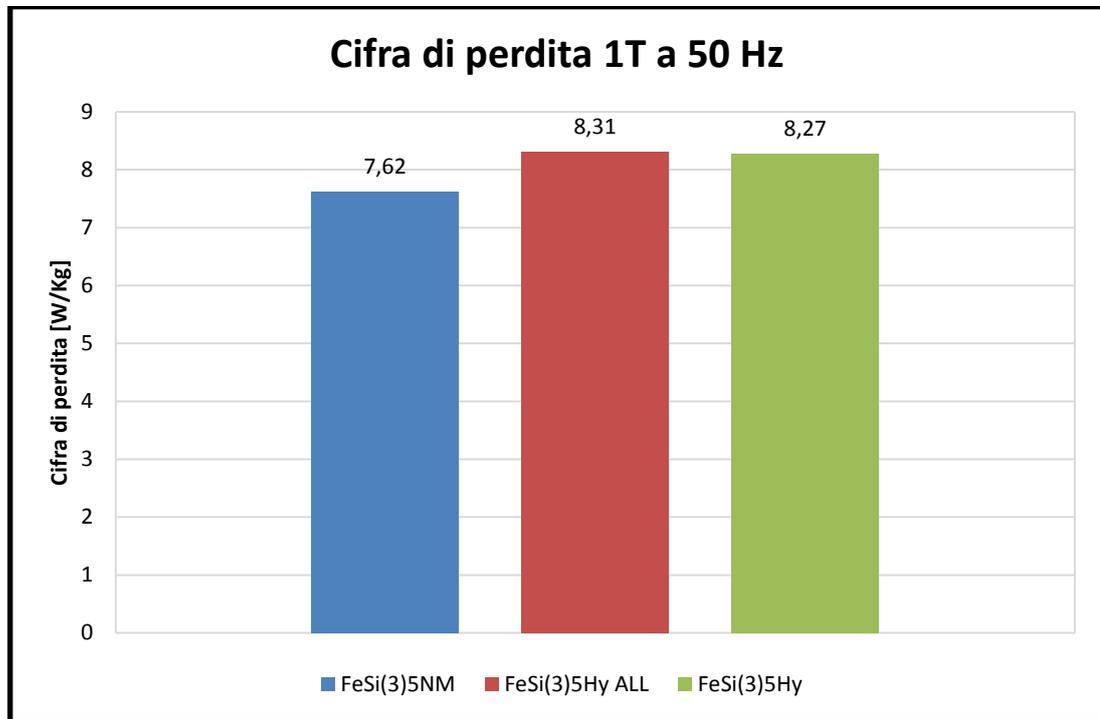


Figura 6-21: Cifra di perdita ad 1T 50Hz confronto processi

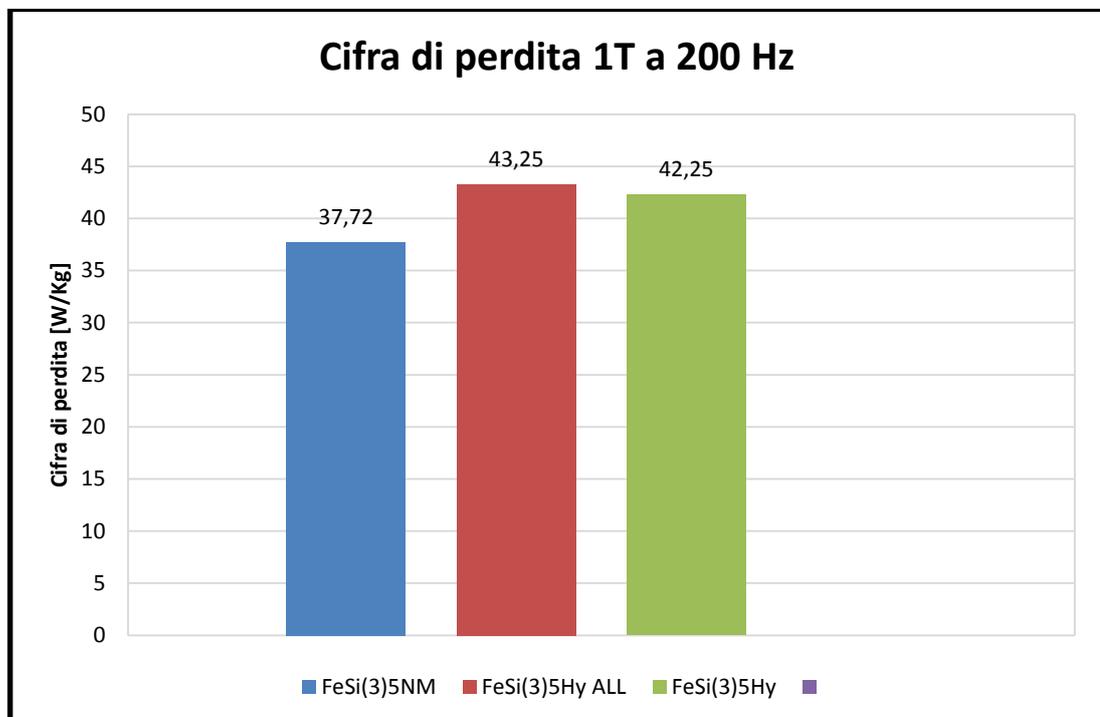


Figura 6-22: Cifra di perdita ad 1T 200Hz confronto processi

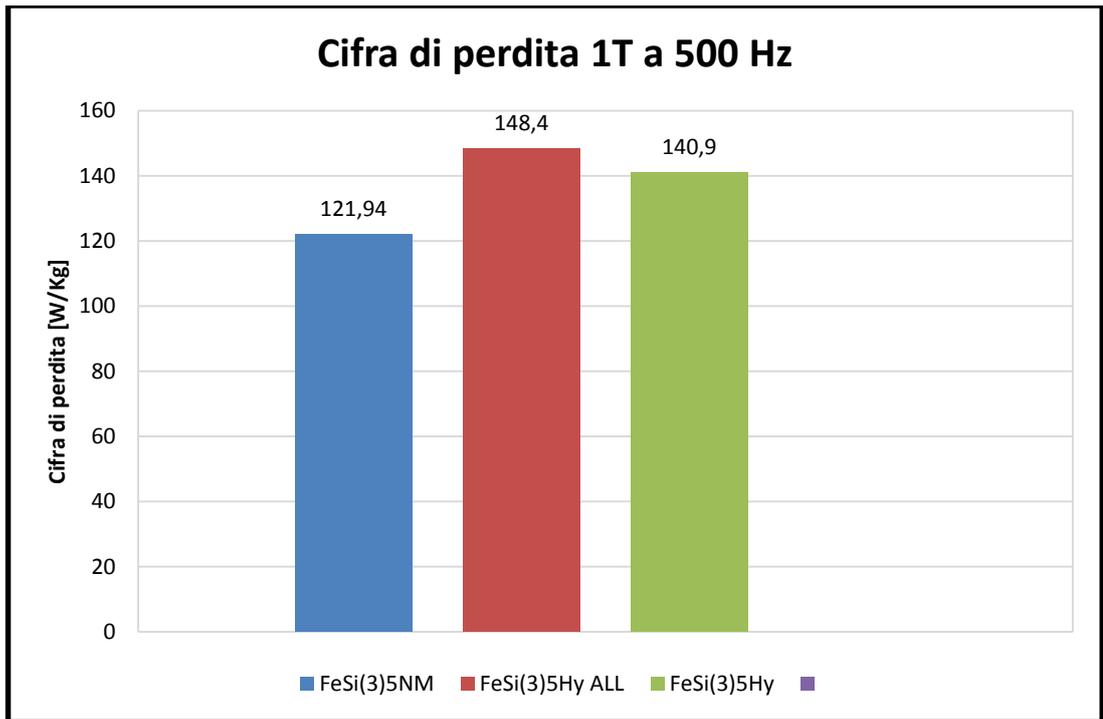


Figura 6-23: Cifra di perdita ad 1T 500Hz confronto processi

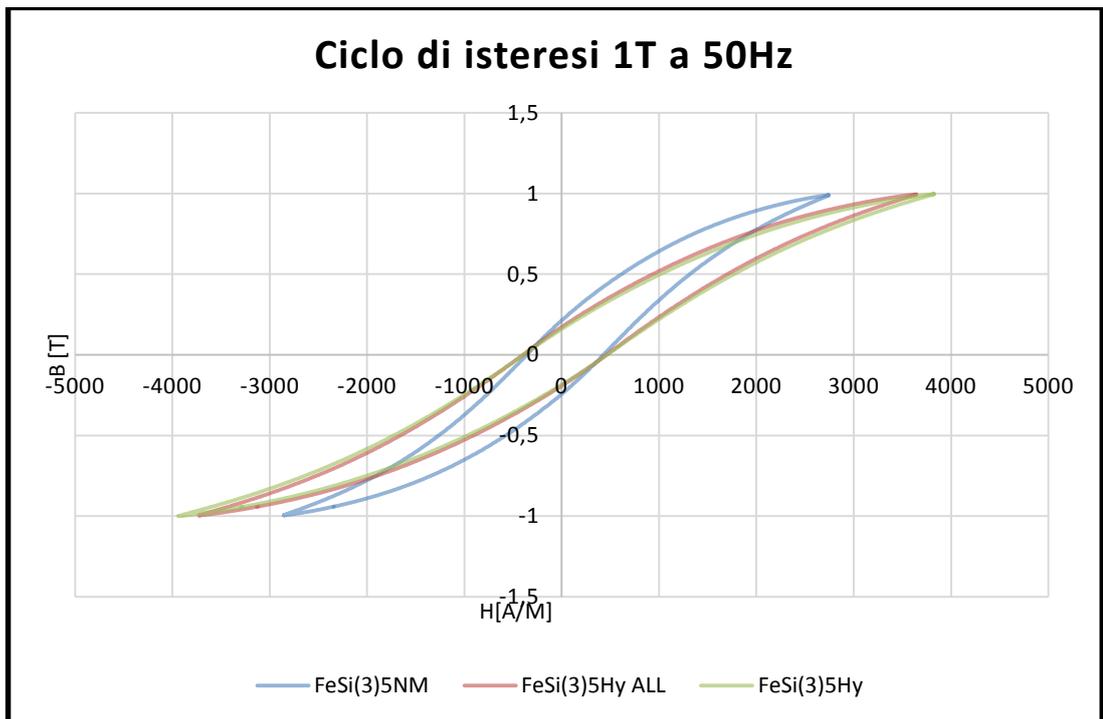
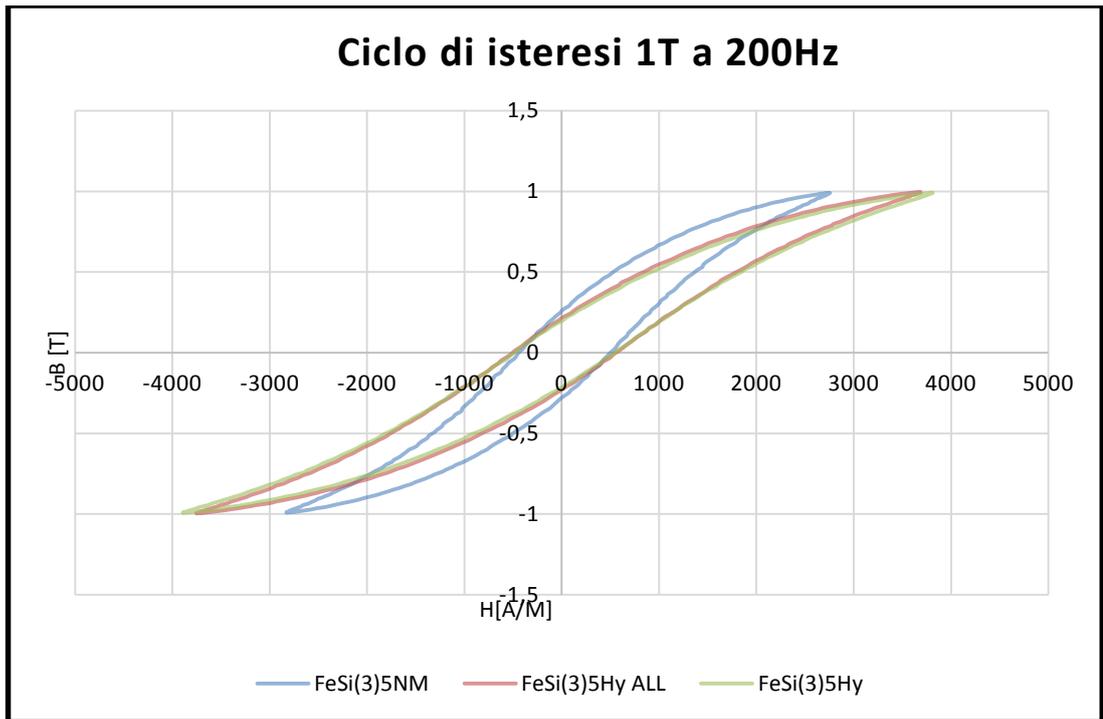
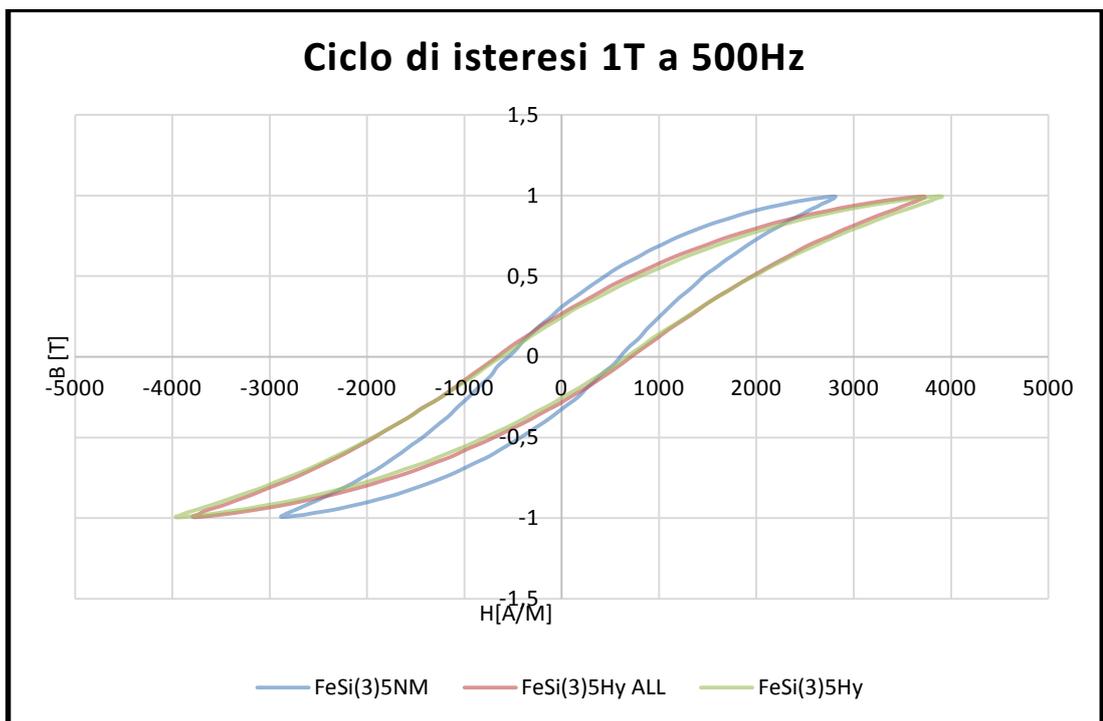


Figura 6-24: Ciclo di isteresi ad 1T 50Hz confronto processi



*Figura 6-25: Ciclo di isteresi ad 1T 200Hz confronto processi*



*Figura 6-26: Ciclo di isteresi ad 1T 500Hz confronto processi*

### 6.4.3 CONFRONTO PERCENTUALI DI SILICIO

Dai precedenti risultati, risulta evidente che il processo di rivestimento che presenta le migliori caratteristiche di permeabilità magnetica e cifra di perdita sia la miscelazione standard. In questo capitolo si confrontano quindi 4 campioni in cui la variabile è la percentuale in peso di Silicio utilizzata (1%, 0.5%, 0.2% e 0,1%). Come nel precedente capitolo, le prove vengono riferite a 3 frequenze (50Hz, 200Hz, 500Hz), per ognuna delle quali vengono riportate in ordine:

- curva permeabilità magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- curva induzione magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- istogramma permeabilità massima
- istogramma cifra di perdita ad 1 T
- ciclo di isteresi ad 1 T

Come si può vedere dai grafici  $\mu(H)$  e  $B(H)$ , a 50 Hz i campioni con lo 0,1% e lo 0,2 % di silicio presentano delle caratteristiche magnetiche molto simili, con una permeabilità massima maggiore per il campione allo 0,2% in peso di silicio, ma che decresce maggiormente rispetto al campione con lo 0,1%, fino ad arrivare (quest'ultimo) ad avere valori migliori di induzione magnetica a valori di campo maggiori. Al crescere della frequenza, questi due campioni vedono una maggiore riduzione della permeabilità massima. Per quanto riguarda i campioni allo 0,5% e all' 1% in peso di silicio, il loro comportamento è diverso rispetto ai precedenti; Presentano delle permeabilità massime decisamente minori, ma che non varia tra i 50Hz e i 200Hz, diminuendo successivamente ai 500Hz ma in modo minore che nei campioni allo 0,1% e allo 0,2%.

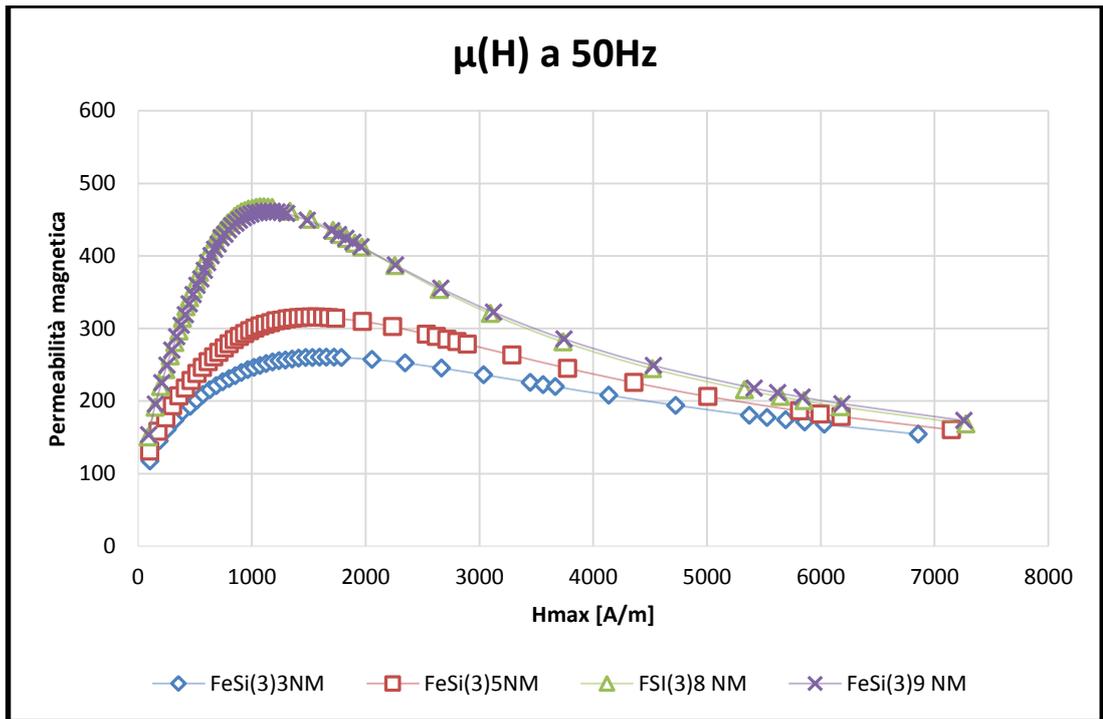


Figura 6-27: Permeabilità magnetica a 50Hz confronto percentuali silicio

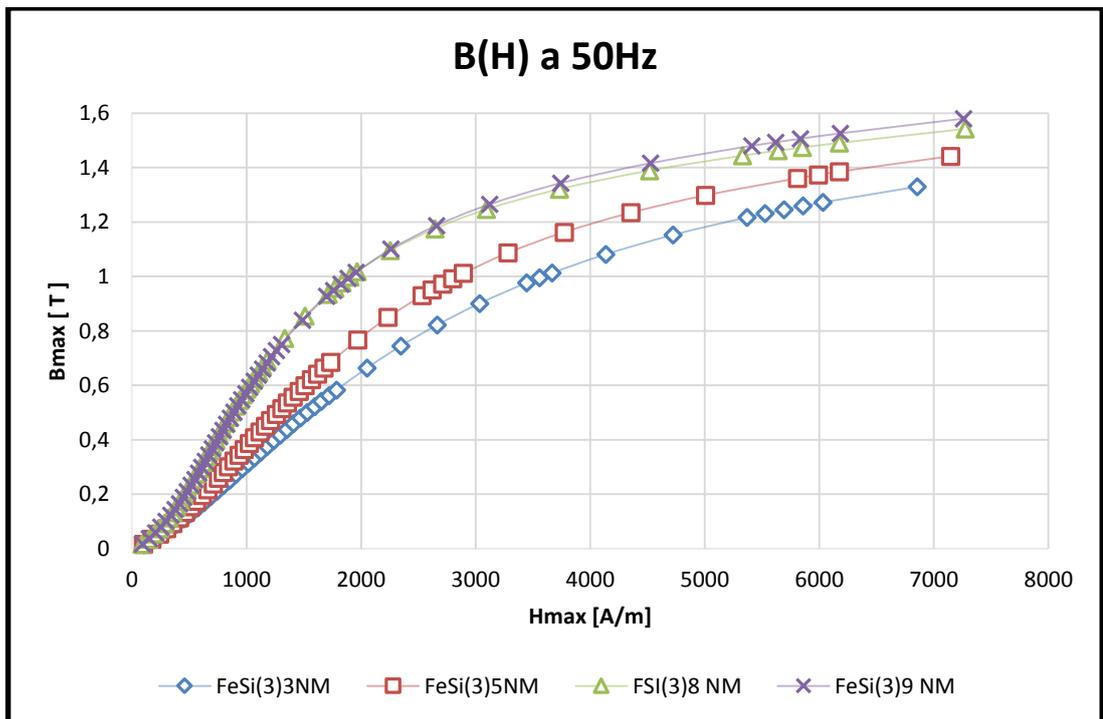


Figura 6-28: Induzione magnetica a 50Hz confronto percentuali silicio

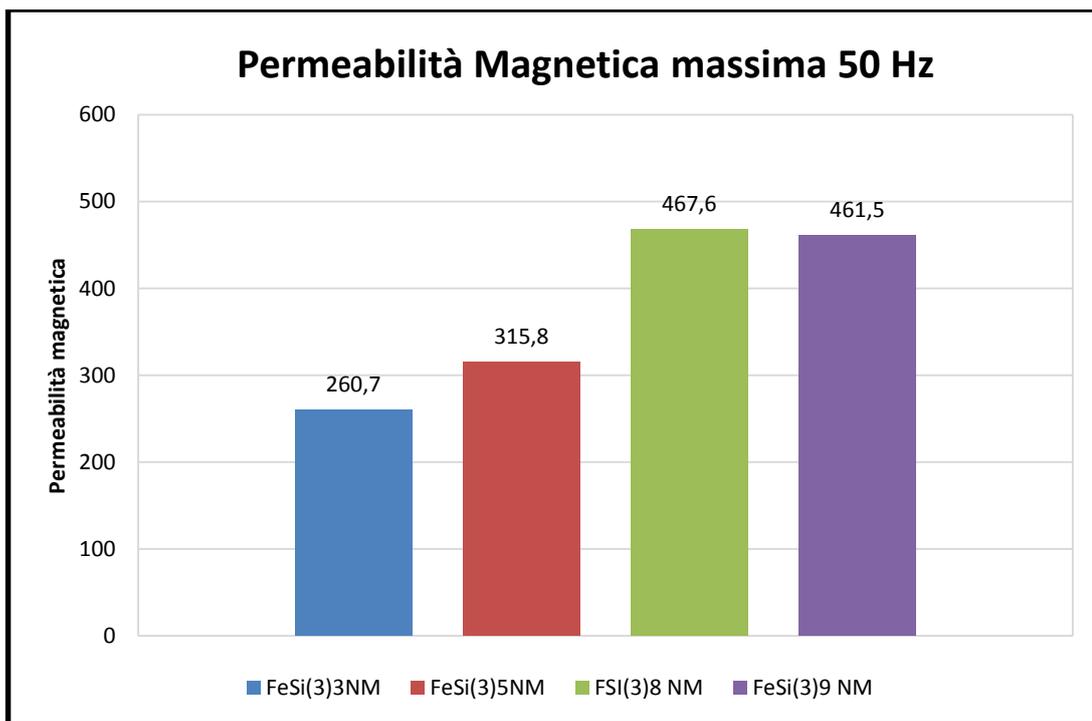


Figura 6-29: Istogramma permeabilità magnetica massima a 50Hz confronto percentuali silicio

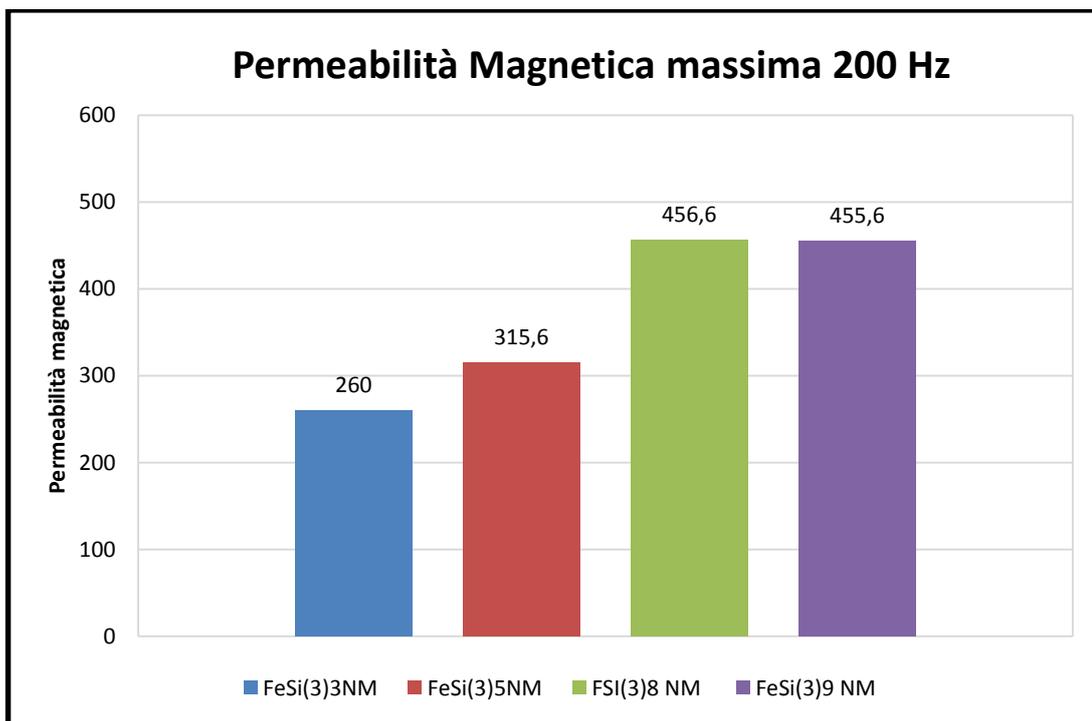


Figura 6-30: Istogramma permeabilità magnetica massima a 200Hz confronto percentuali silicio

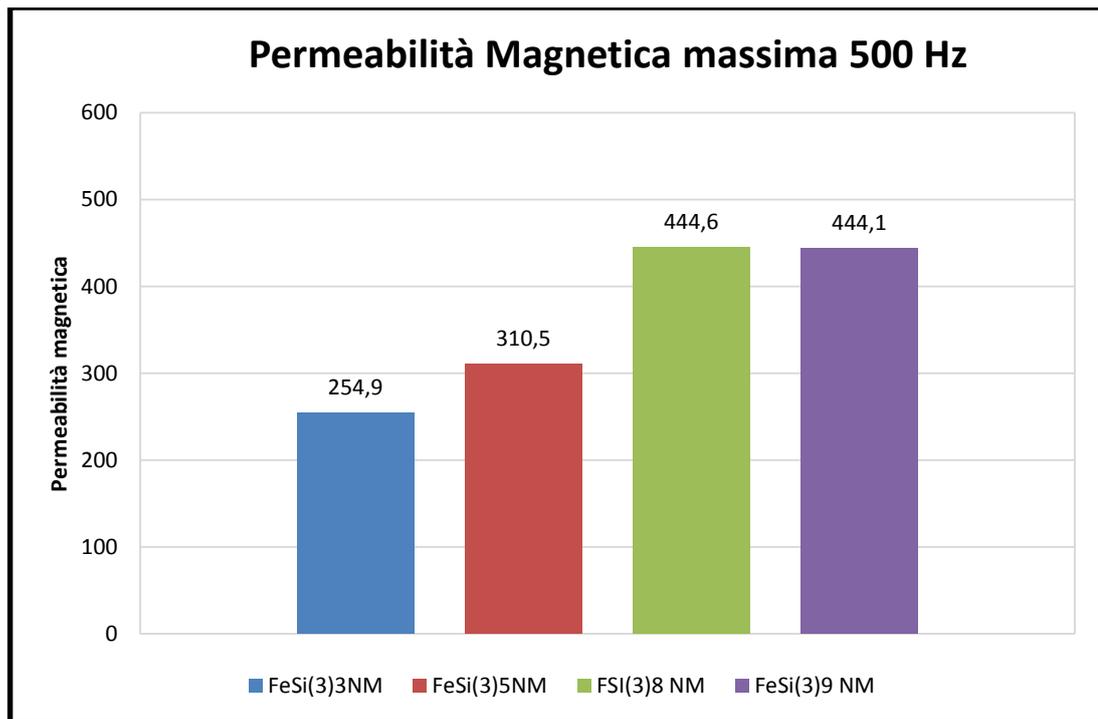


Figura 6-31: Istogramma permeabilità magnetica massima a 500Hz confronto percentuali silicio

Per quanto riguarda la cifra di perdita, il comportamento al variare della percentuale di silicio utilizzata segue un andamento proporzionale ai 50Hz, ma non alle frequenze di 200Hz e 500Hz, dove in modo singolare la cifra di perdita del campione allo 0,2% in peso di silicio aumenta in modo notevole rispetto gli altri campioni. Il motivo di tale comportamento è francamente inspiegabile; probabilmente l'aumento delle perdite è dovuto ad un aumento della quota attribuita alle correnti parassite. Non attribuirei il fenomeno ad un errore di misurazione, in quanto attorno ad 1T i punti misurati sono fitti. Una possibile spiegazione potrebbe essere attribuita ad una non corretta miscelazione (errore sulla quantità di silicio), in quanto anche gli altri campioni realizzati con la medesima miscela mostrano gli stessi risultati. Questo potrebbe anche spiegare una permeabilità massima più elevata a basse frequenze per tale campione.

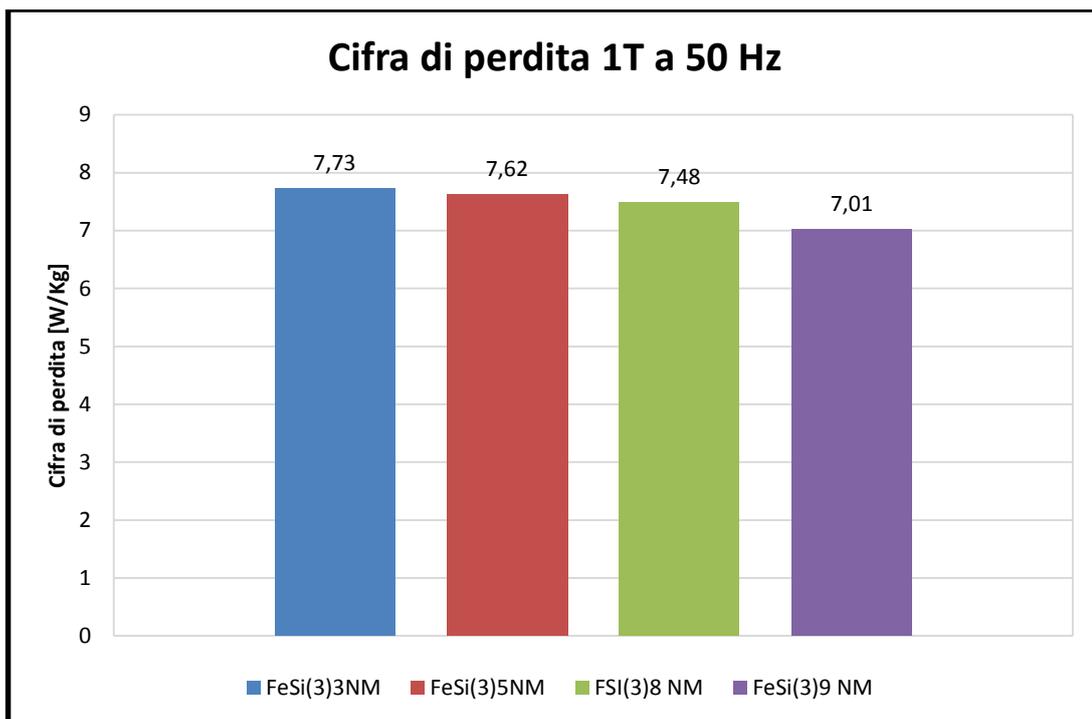


Figura 6-32: Cifra di perdita ad 1T 50Hz confronto percentuali silicio

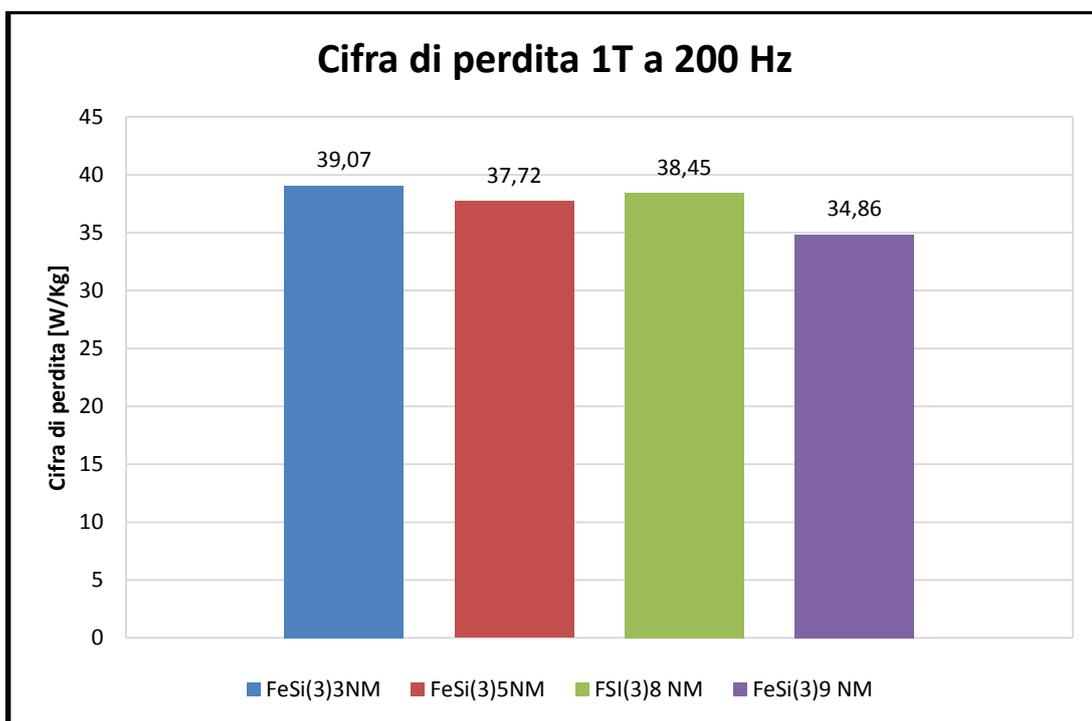


Figura 6-33: Cifra di perdita ad 1T 200Hz confronto percentuali silicio

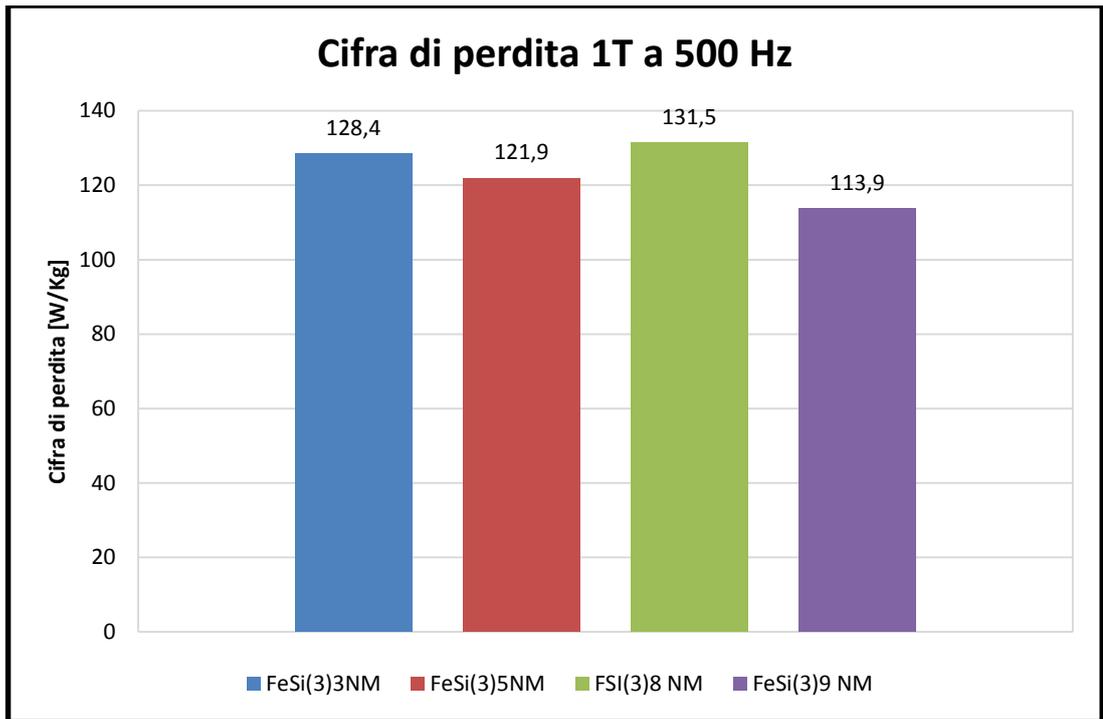


Figura 6-34: Cifra di perdita ad 1T 500Hz confronto percentuali silicio

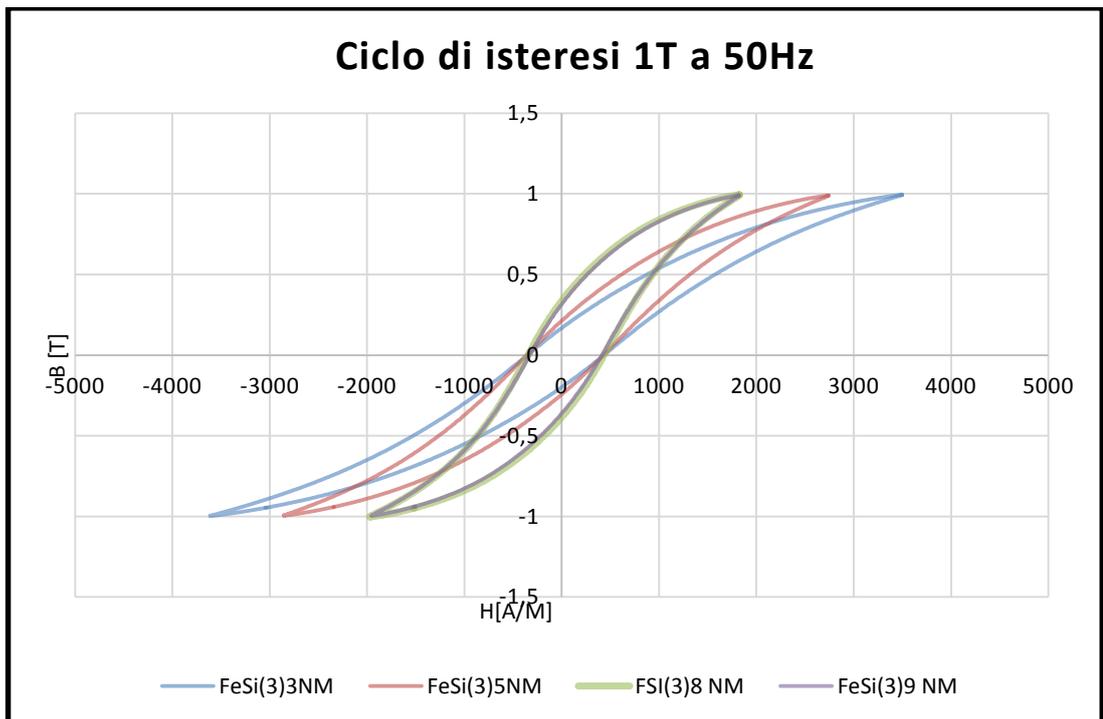


Figura 6-35: Ciclo di isteresi ad 1T 50Hz confronto percentuali silicio

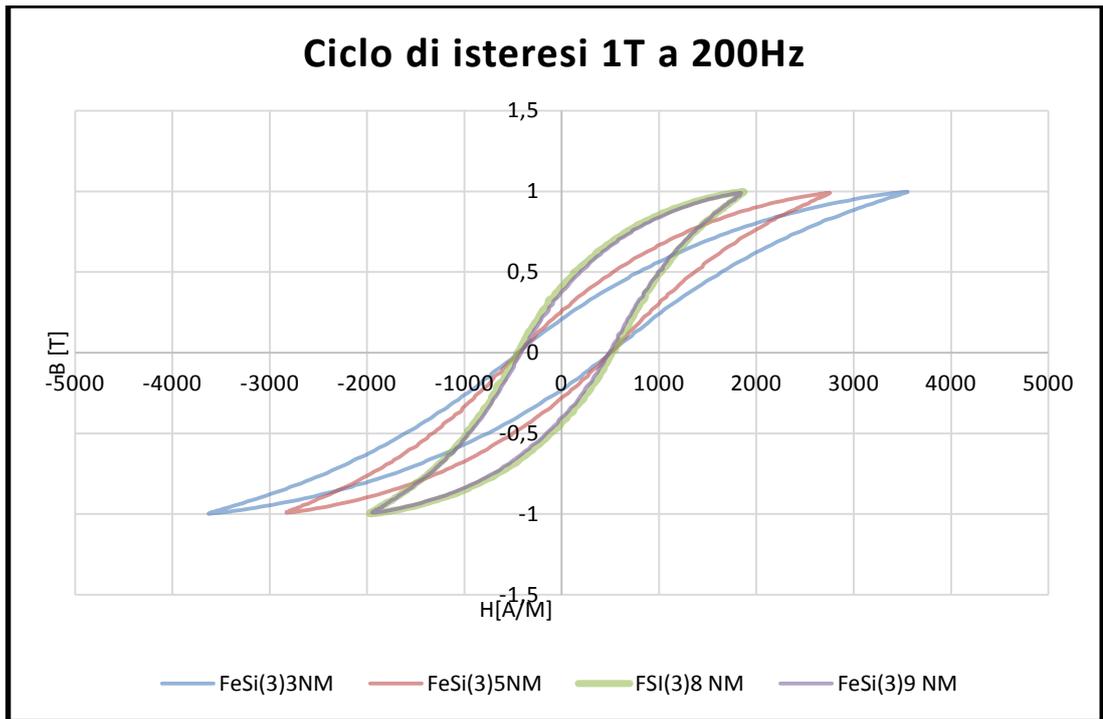


Figura 6-36: Ciclo di isteresi ad 1T 200Hz confronto percentuali silicio

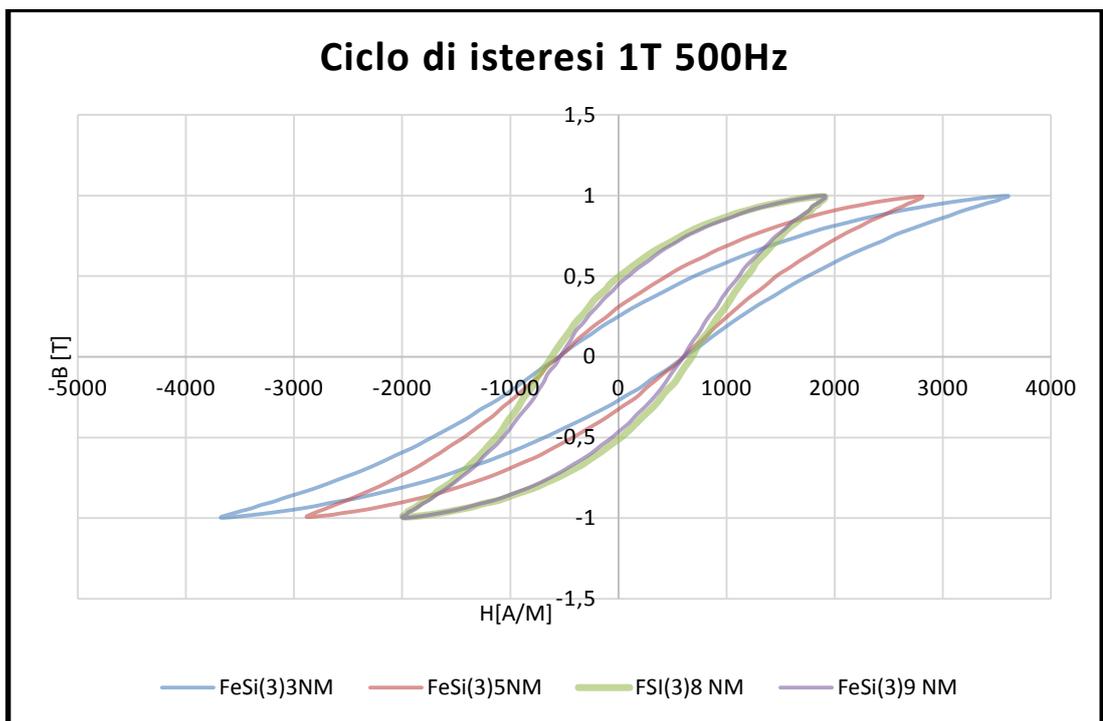


Figura 6-37: Ciclo di isteresi ad 1T 500Hz confronto percentuali silicio

#### 6.4.4 CONFRONTO PRESSATURA

Al fine di avere un quadro più vasto del comportamento di tali materiali, si è deciso di compattare dei campioni a pressioni maggiori, nello specifico 800MPa e 900MPa, mentre precedentemente ci si era limitati alla pressione di 700MPa. I campioni in esame sono miscele allo 0,1% in peso di silicio. Le frequenze alla quale vengono presentati i risultati, sono 50Hz, 200Hz e 500 Hz. Per ognuna delle frequenze vengono presentati in ordine:

- curva permeabilità magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- curva induzione magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- istogramma permeabilità massima
- istogramma cifra di perdita ad 1 T
- ciclo di isteresi ad 1 T

Il comportamento magnetico del materiale al variare del valore di pressione applicata, non risulta proporzionale. Guardando i grafici di  $\mu(H)$ ,  $B(H)$  e permeabilità massima, ci si rende conto che per bassi valori di campo magnetico applicato, la permeabilità del campione pressato ad 800MPa sia maggiore del campione pressato a 900MPa, per poi decrescere e raggiungere valori di induzione magnetica simile al campione pressato a 700MPa ad alti valori di campo. Questa tendenza del campione pressato ad 800MPa si ripete per tutte e tre le frequenze riportate.

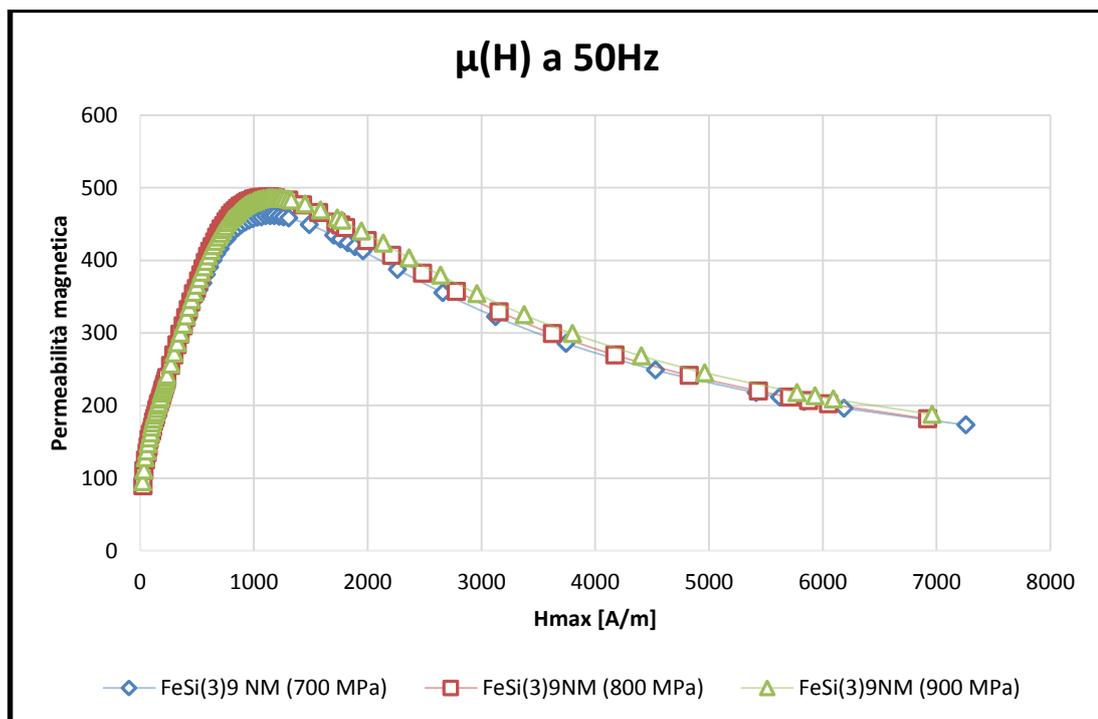


Figura 6-38: Permeabilità magnetica a 50Hz confronto pressatura

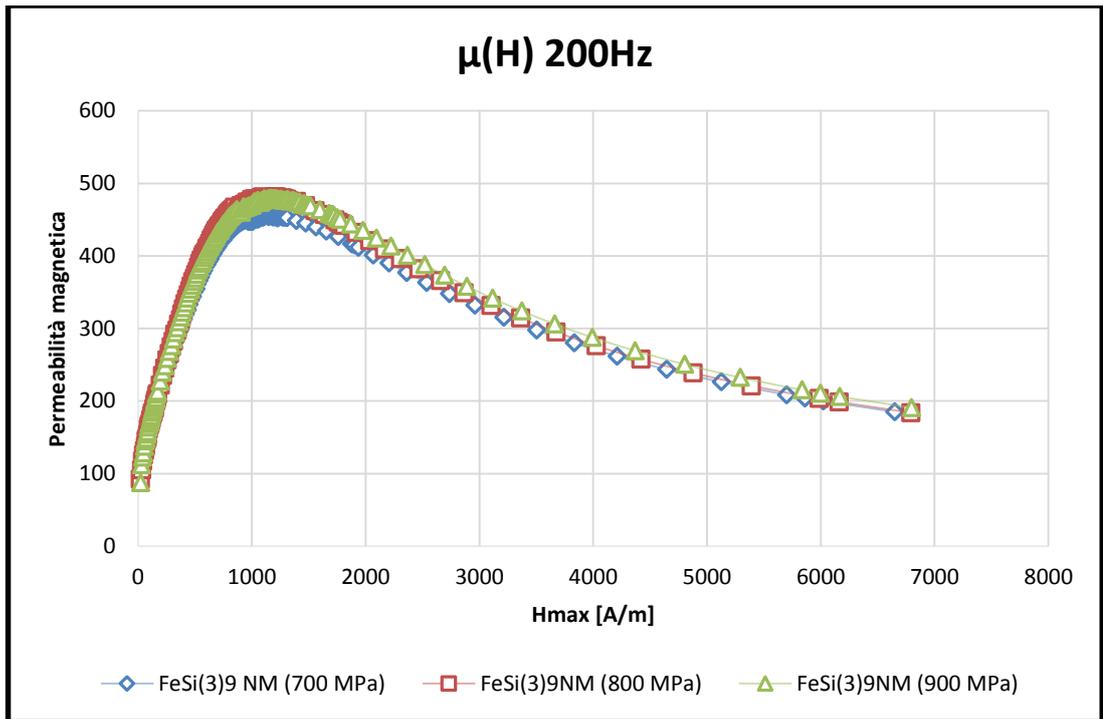


Figura 6-39: Permeabilità magnetica a 200Hz confronto pressione

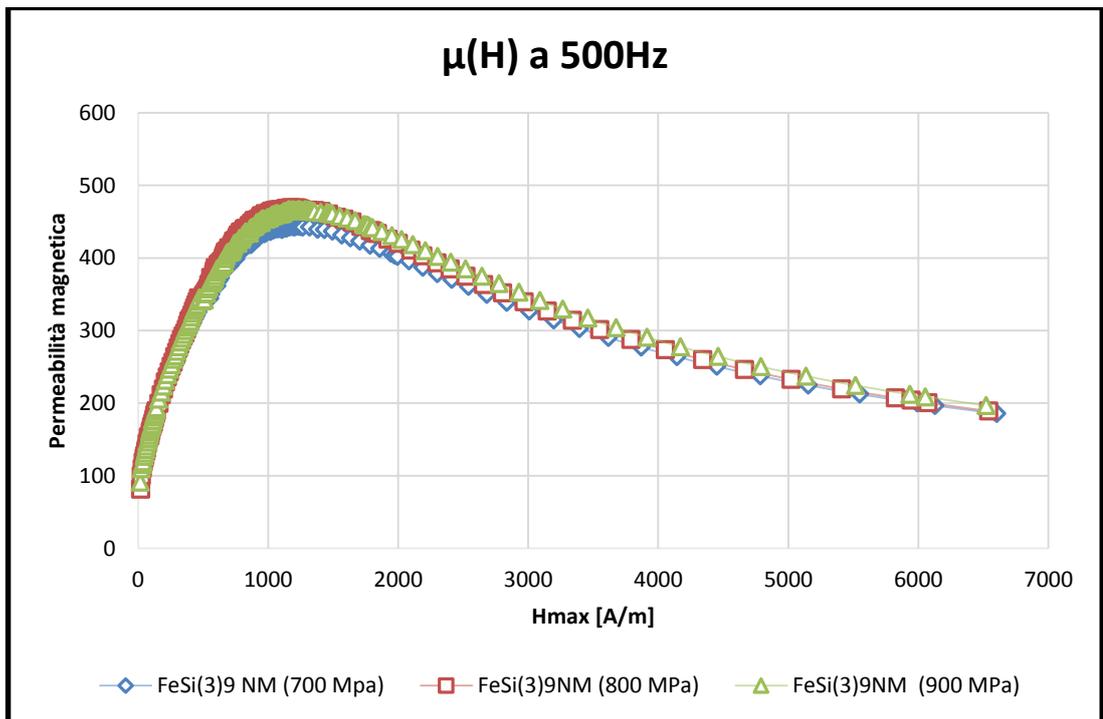


Figura 6-40: Permeabilità magnetica a 500Hz confronto pressione

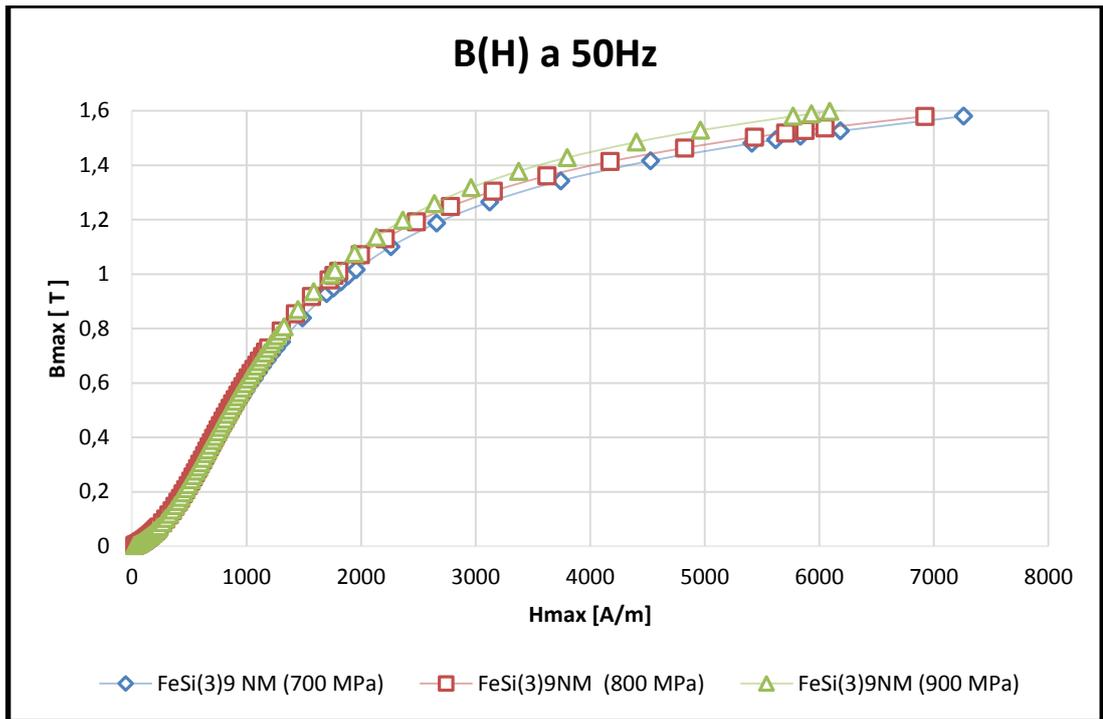


Figura 6-41: Induzione magnetica a 50Hz confronto pressatura

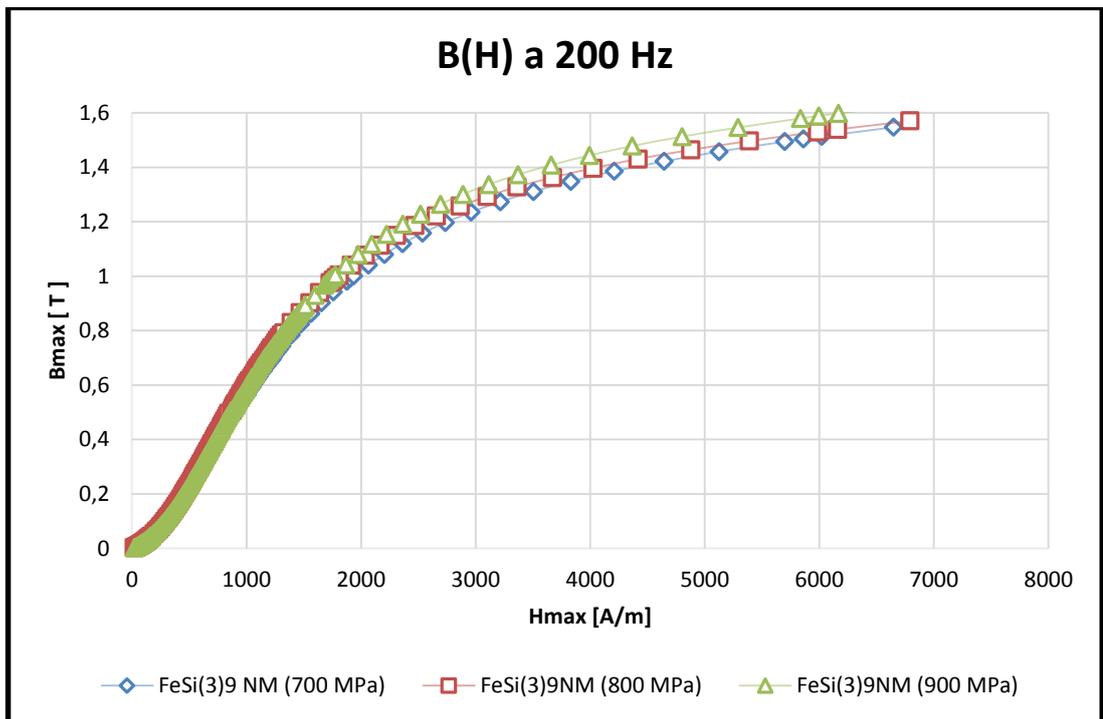


Figura 6-42: Induzione magnetica a 200Hz confronto pressatura

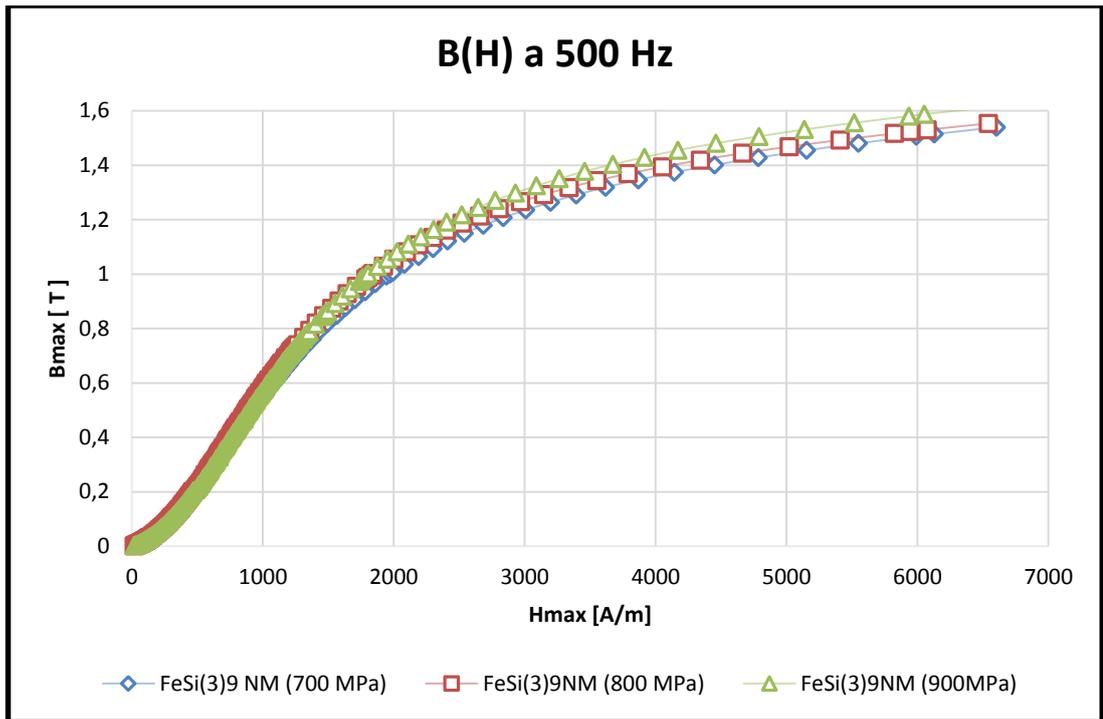


Figura 6-43: Induzione magnetica a 500Hz confronto pressatura

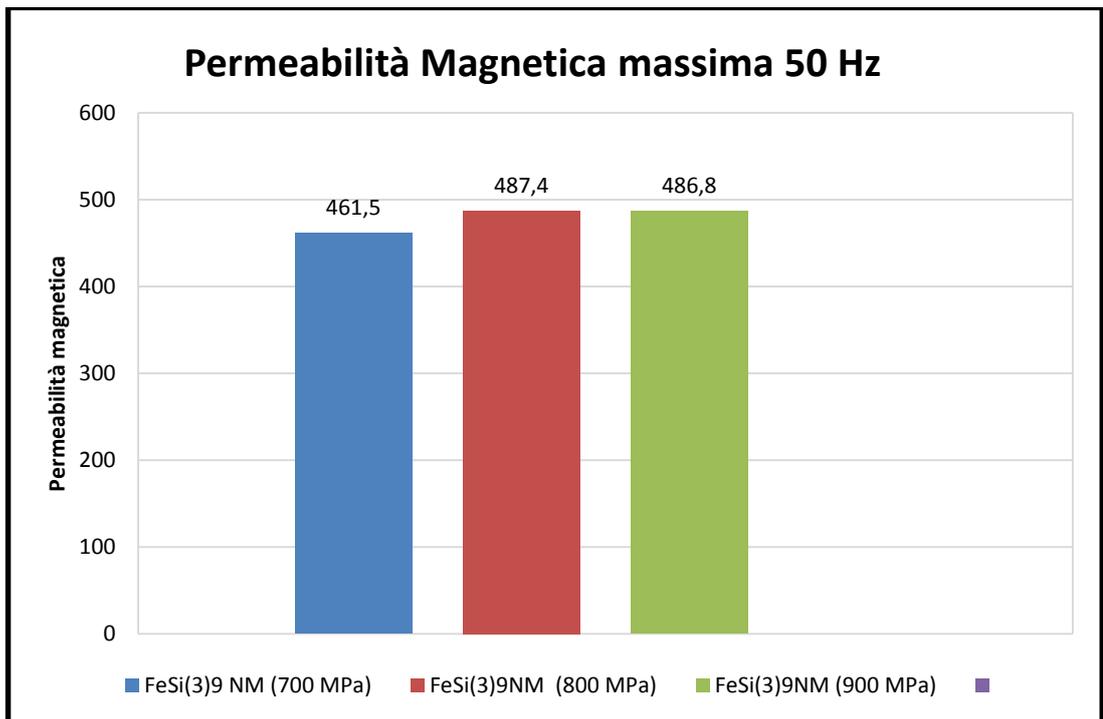


Figura 6-44: Istogramma permeabilità magnetica massima a 50Hz confronto pressatura

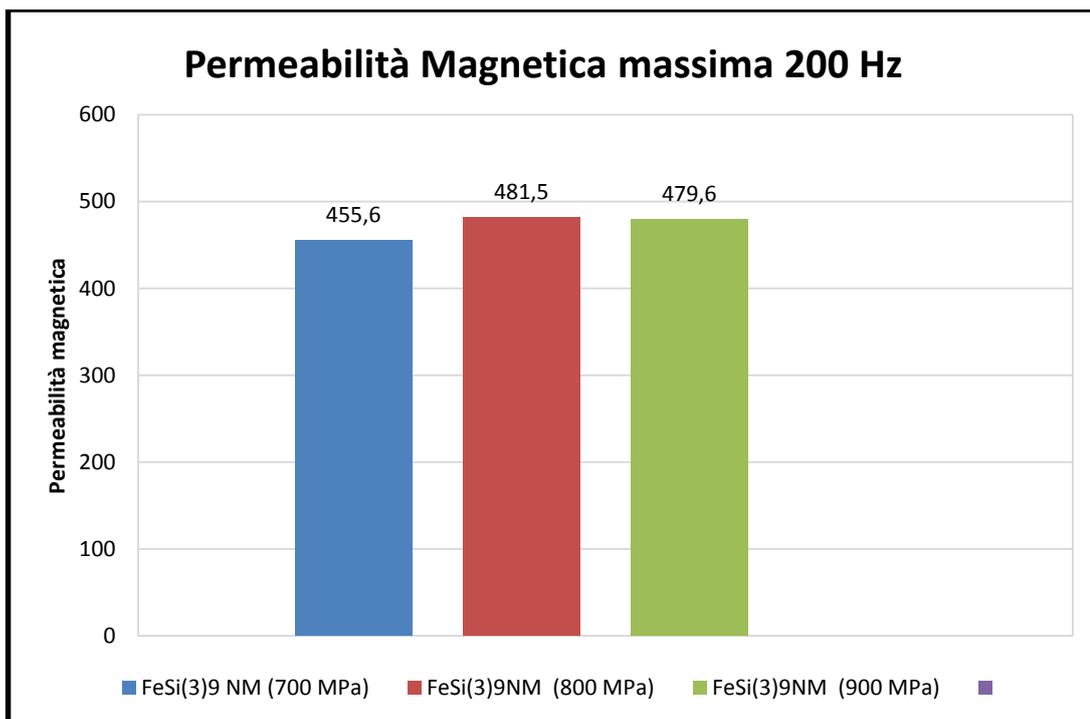


Figura 6-45: Istogramma permeabilità magnetica massima a 200Hz confronto pressione

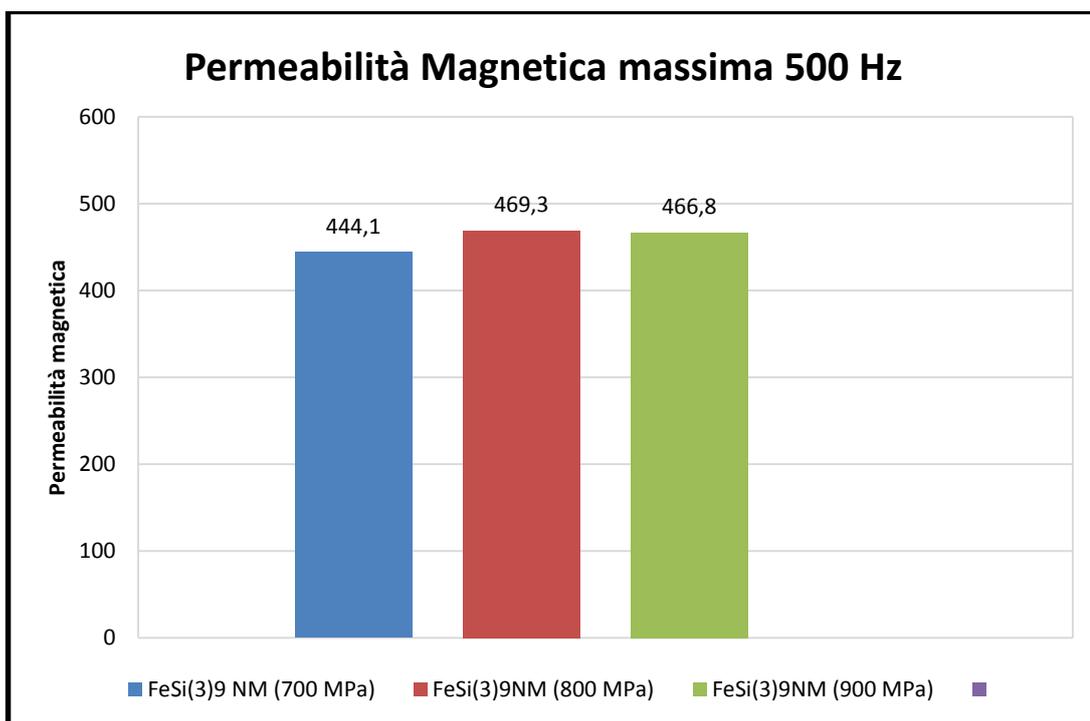


Figura 6-46: Istogramma permeabilità magnetica massima a 500Hz confronto pressione

Per quanto riguarda la cifra di perdita, i campioni pressati a 700MPa e 800MPa, presentano dei valori molto simili a tutte le frequenze, mentre il campione a 900MPa che già presentava delle caratteristiche magnetiche migliori, ora presenta anche delle cifre di perdita più basse

rispetto alle altre due pressature. Per quanto riguarda il campione pressato ad 800MPa, presenta perdite leggermente più basse rispetto al campione a 700MPa a 50 Hz, ma che aumentano rispetto quest'ultimo al crescere della frequenza, arrivando ad avere un valore maggiore a 500Hz, attribuibile ad un aumento di perdita per correnti parassite e per perdite addizionali.

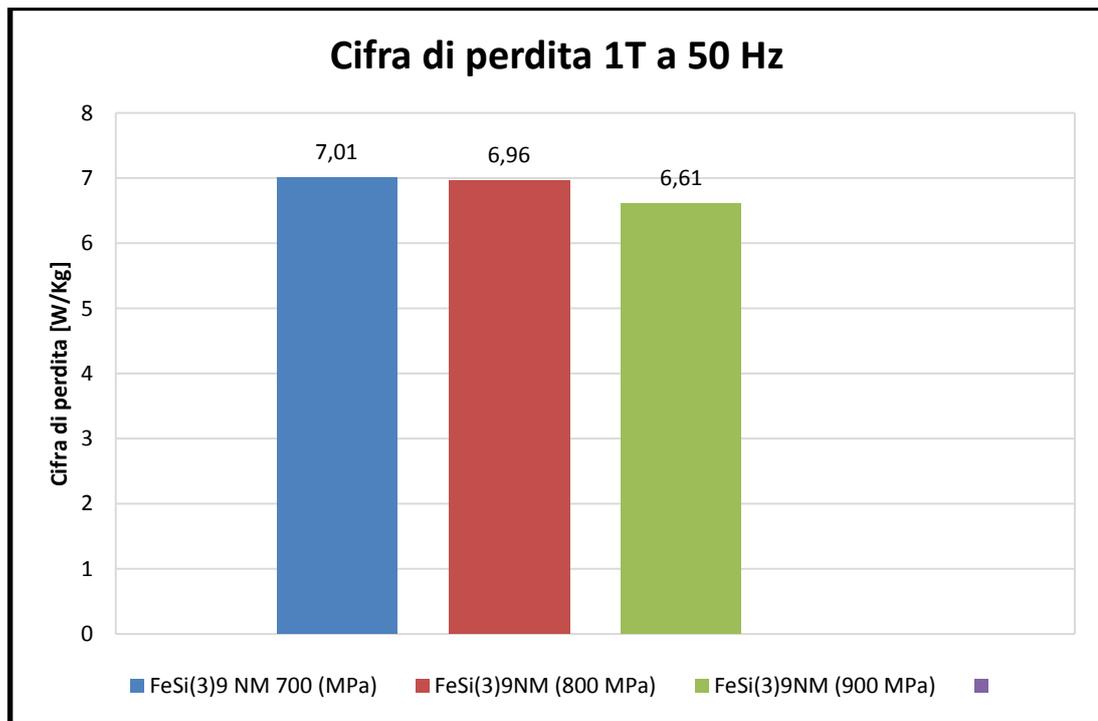


Figura 6-47: Cifra di perdita ad 1T 50Hz confronto pressatura

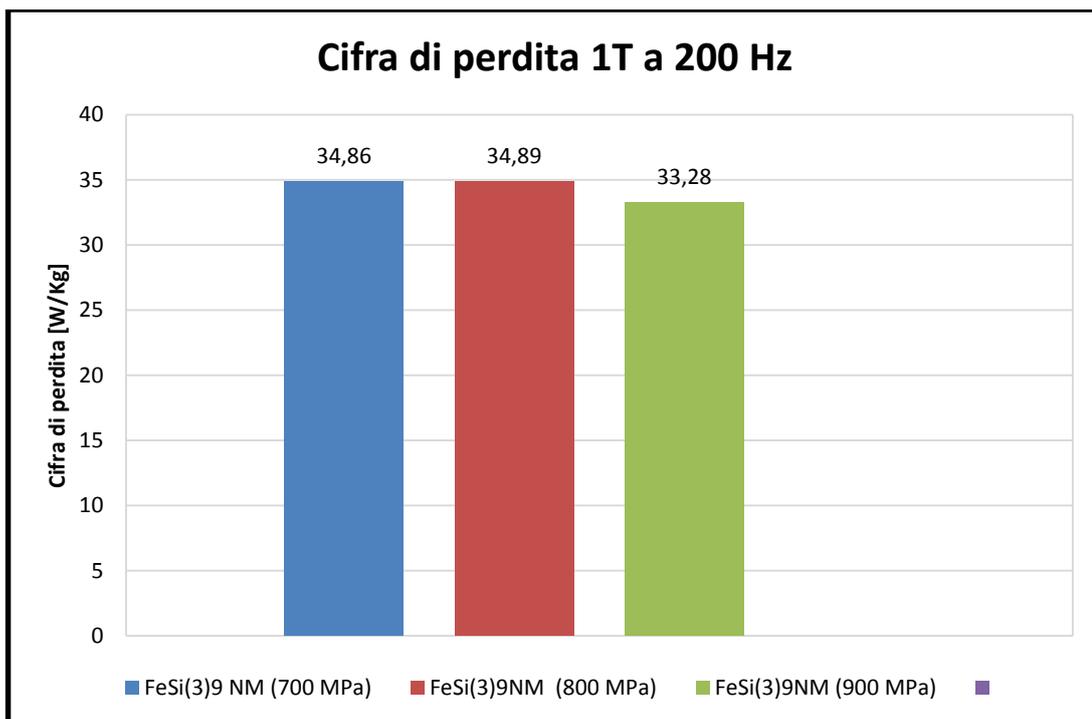


Figura 6-48: Cifra di perdita ad 1T 200Hz confronto pressatura

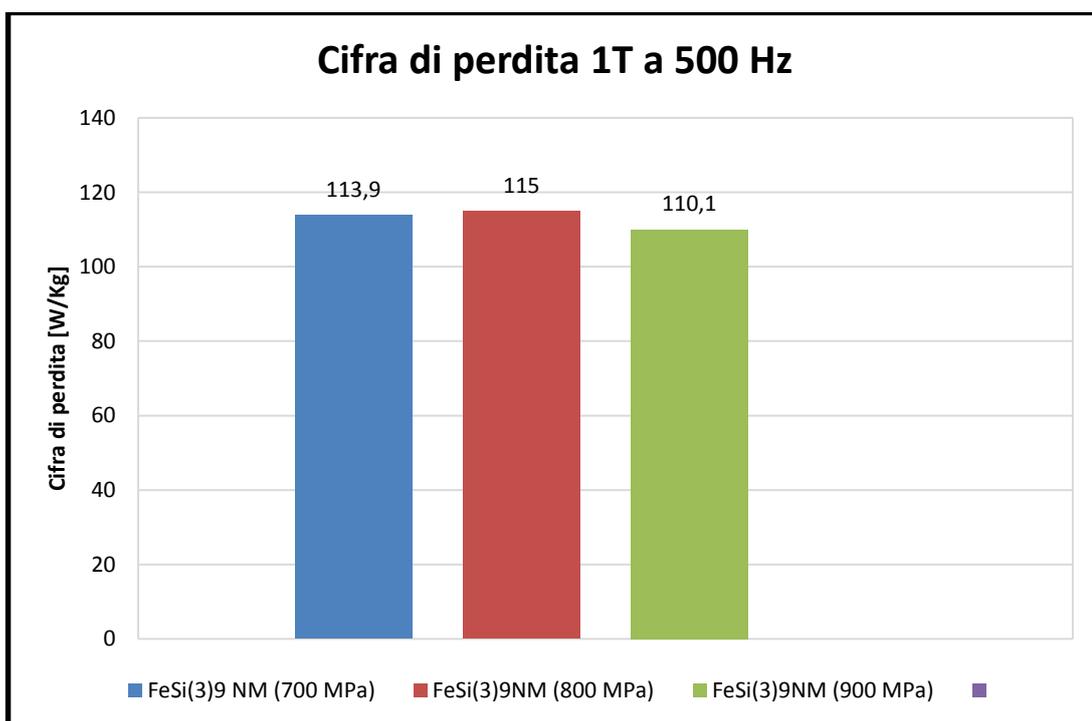


Figura 6-49: Cifra di perdita ad 1T 500Hz confronto pressatura

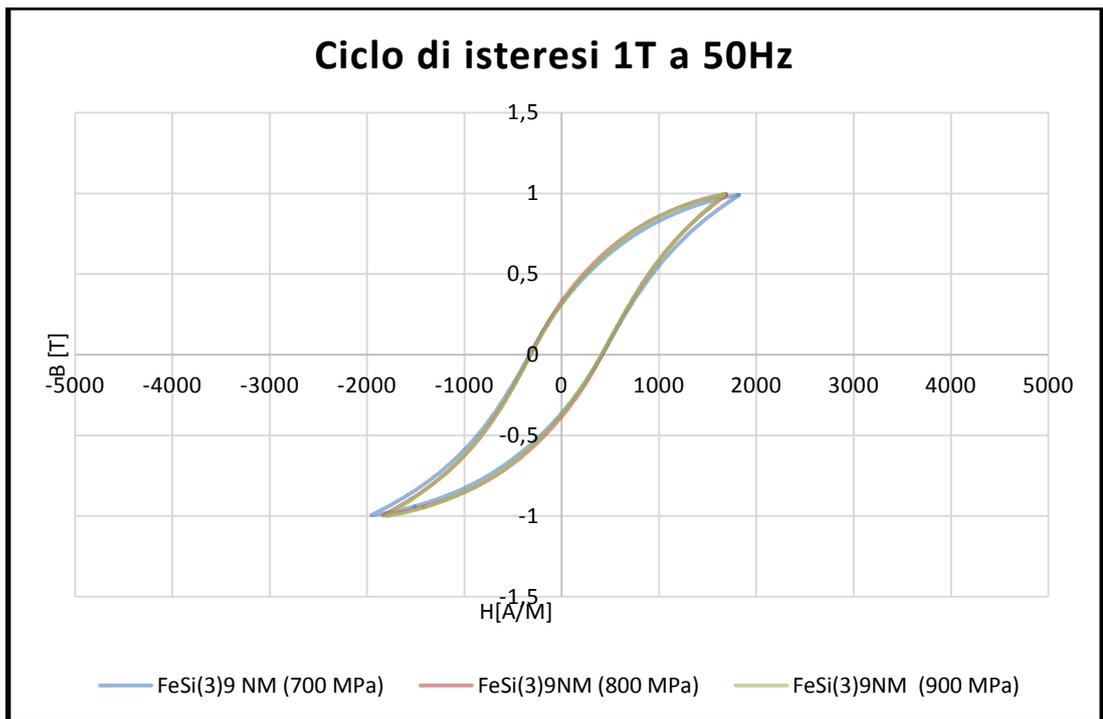


Figura 6-50: Ciclo di isteresi ad 1T 50Hz confronto pressatura

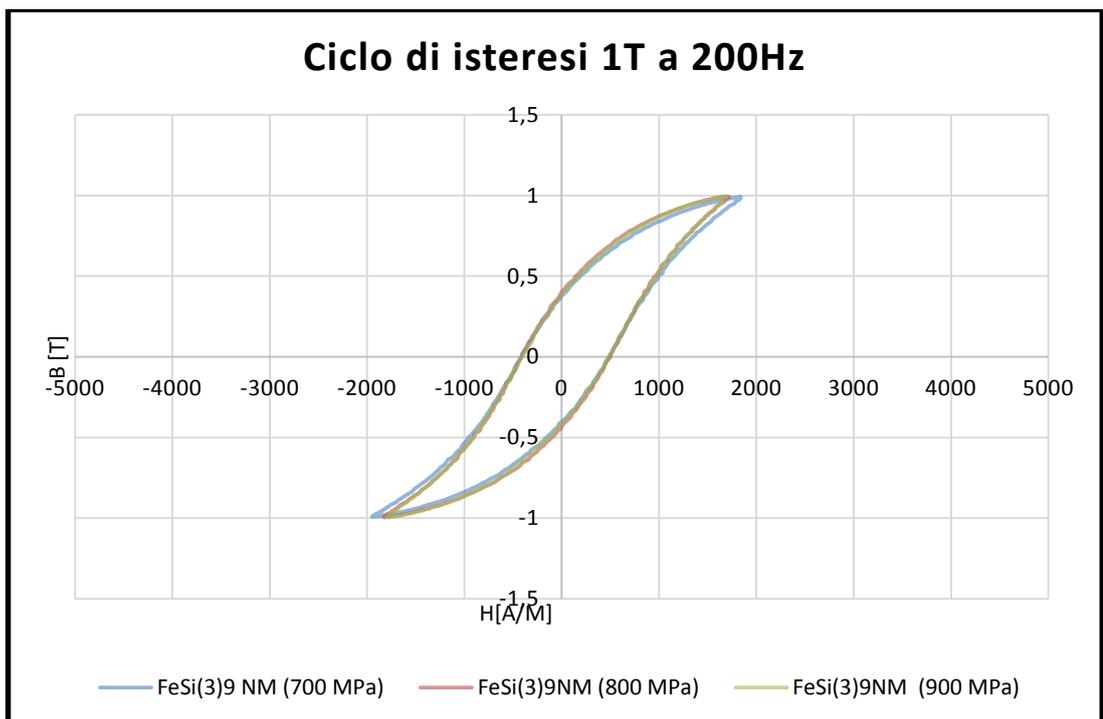


Figura 6-51: Ciclo di isteresi ad 1T 200Hz confronto pressatura

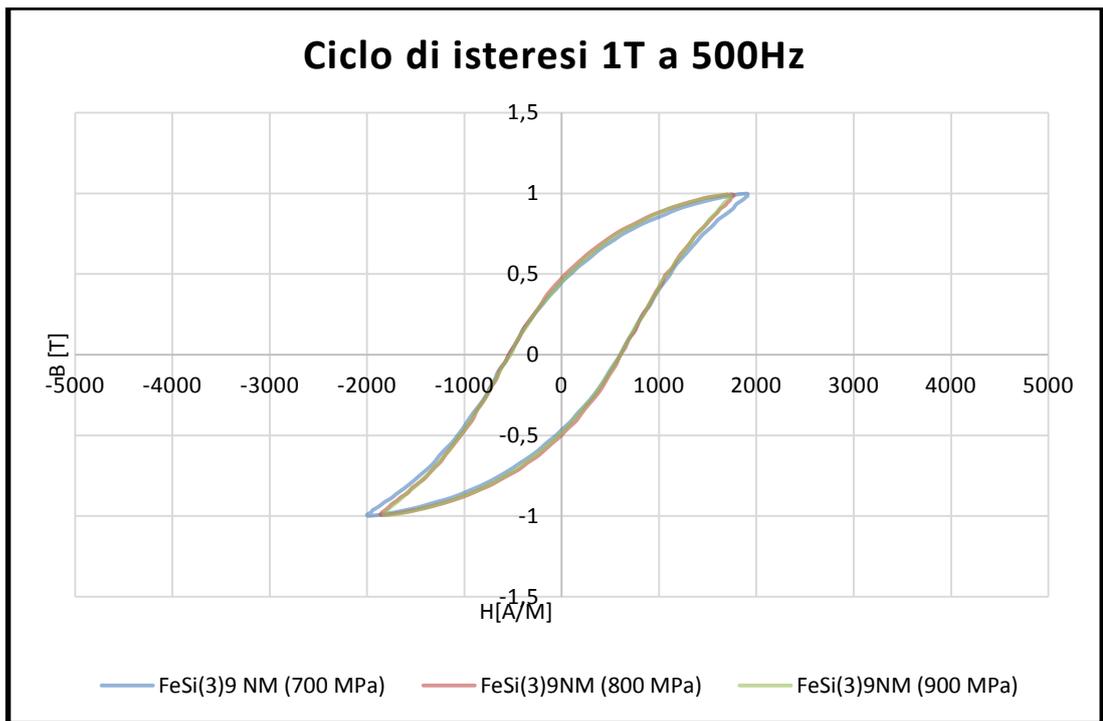


Figura 6-52: Ciclo di isteresi ad 1T 500Hz confronto pressatura

#### 6.4.5 CONFRONTO TRATTAMENTI TERMICI

I campioni realizzati sono stati successivamente trattati termicamente al fine di conferire al materiale delle proprietà meccaniche migliori. Gli ambienti in cui è avvenuto il trattamento termico sono aria e vuoto, allo scopo di avere informazioni di come cambino le grandezze dopo aver subito tali trattamenti, e poterli confrontare. Durante il trattamento termico in aria, si è assistito sempre ad un aumento di peso dei campioni, in quanto l'ossigeno presente nell'ambiente ha formato degli ossidi di ferro nel campione. Aumento di peso non verificatosi nei campioni trattati in vuoto. I primi grafici presentati si riferiscono alla sola frequenza di 50 Hz, e mostrano come variano le grandezze per uno stesso campione dopo trattamento termico a 400°C, 500°C e 600°C, rispettivamente in aria e in vuoto. In esame vengono presi i campioni allo 0,1% e 0,5% in peso di silicio. Successivamente verranno mostrate le differenze tra i due processi termici, alle frequenze di 50Hz, 200Hz e 500Hz, ed infine verrà mostrata una panoramica del comportamento al variare della frequenza sul campione trattato a 400°C in vuoto

Per ognuno dei processi termici vengono presentati in ordine:

- curva permeabilità magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- curva induzione magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- istogramma permeabilità massima
- istogramma cifra di perdita ad 1 T
- ciclo di isteresi ad 1 T

##### **Campione allo 0,1% in peso di silicio con trattamento in aria.**

In questo campione quello che varia all'aumentare della temperatura di trattamento è il tratto iniziale di permeabilità, infatti come si può notare dai grafici di  $\mu(H)$  e  $B(H)$  al di sopra di valori di campo magnetico applicato di 4000 A/m le curve tendono allo stesso asintoto. Anche la cifra di permeabilità massima non segue un andamento proporzionale all'aumentare della temperatura di trattamento

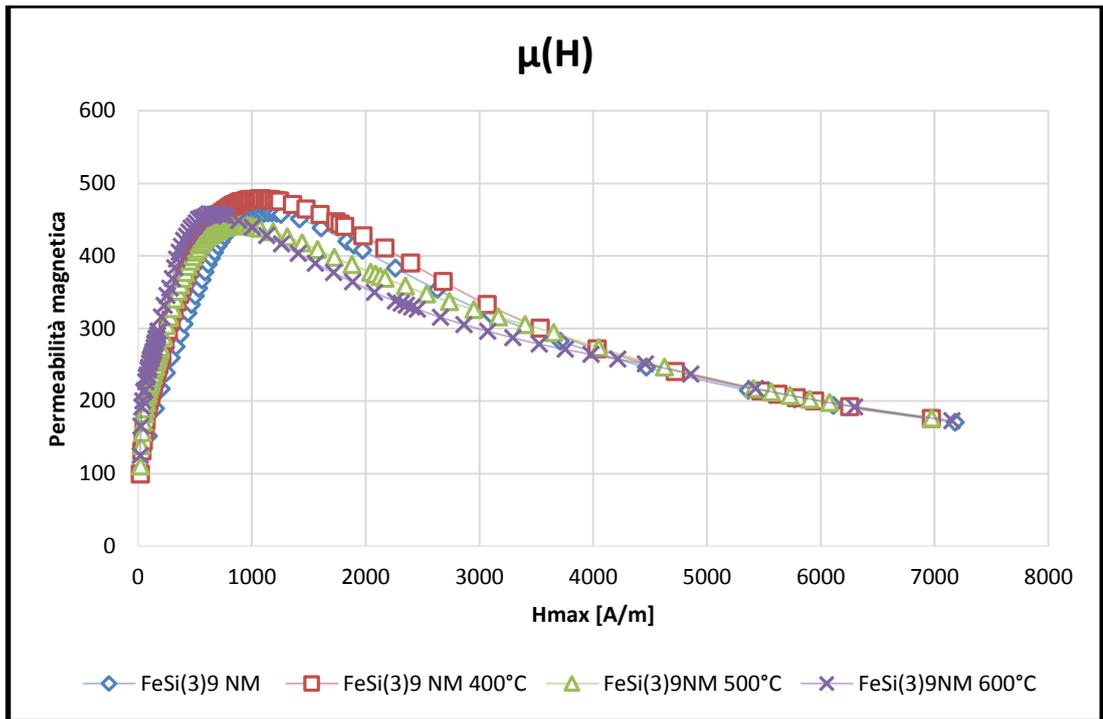


Figura 6-53: Permeabilità magnetica 50Hz a diverse temperature, campione trattato in aria

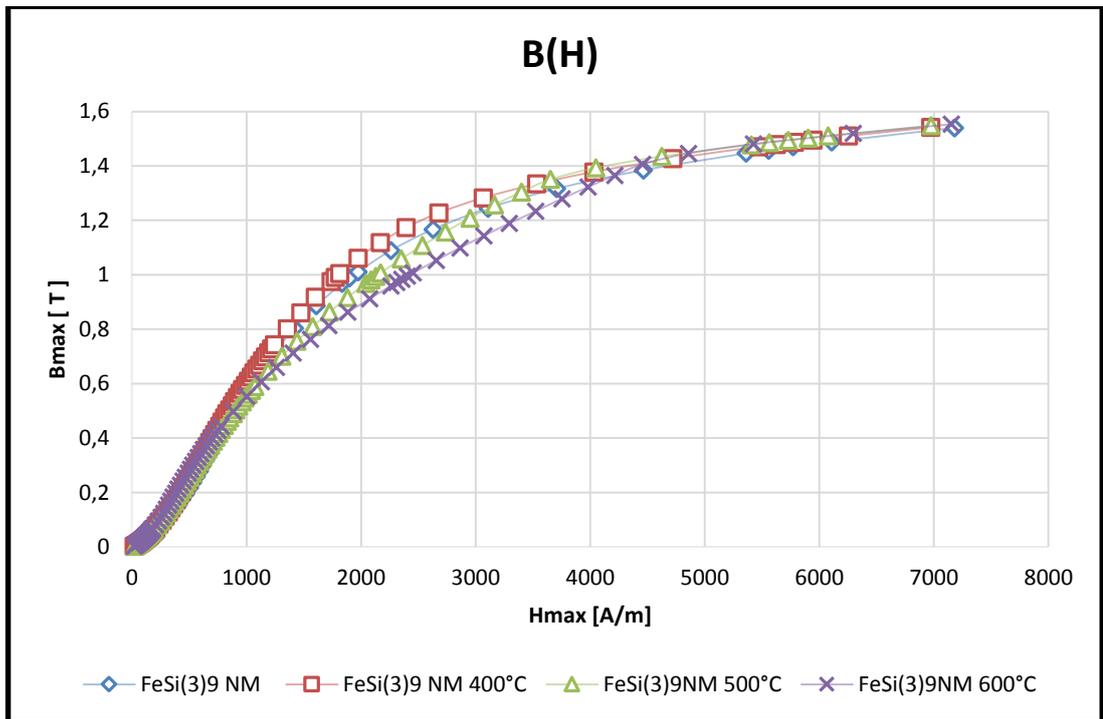


Figura 6-54: Induzione magnetica 50Hz a diverse temperature, campione trattato in aria

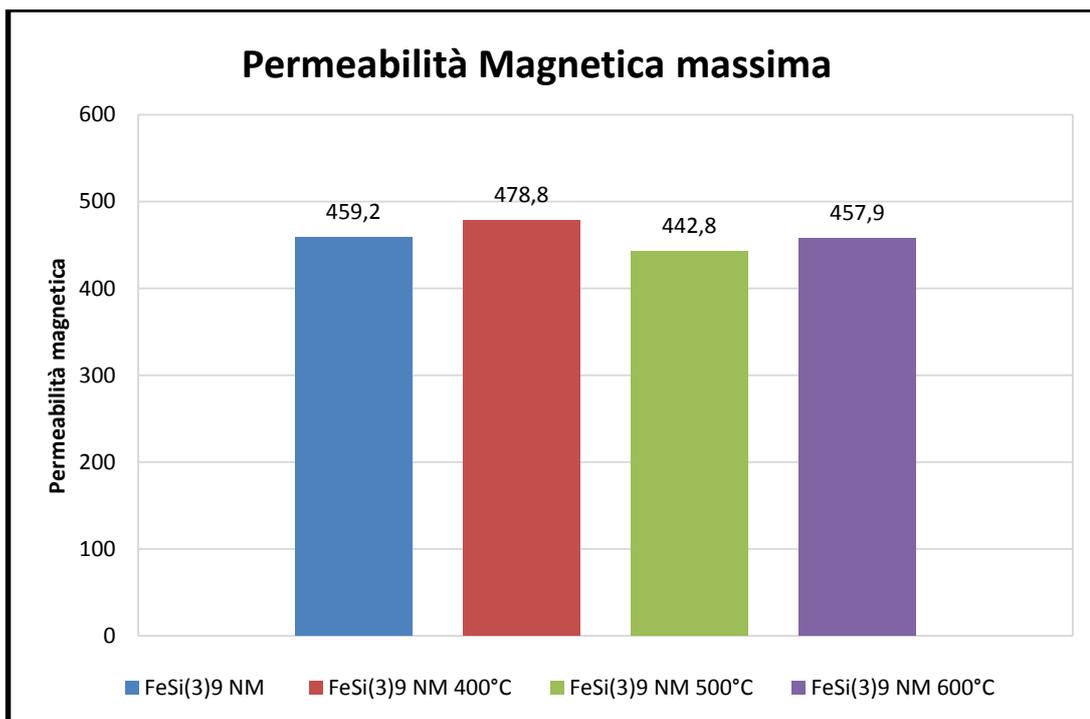


Figura 6-55: Istogramma permeabilità magnetica massima 50Hz a diverse temperature, campione trattato in aria

Quello che invece cambia in modo proporzionale all'aumentare della temperatura di trattamento è la cifra di perdita, che ad ogni trattamento aumenta in modo quasi lineare. La presenza di ossidi quindi non sembra intaccare particolarmente le caratteristiche magnetiche, ma influenza in modo inaccettabile la cifra di perdita.

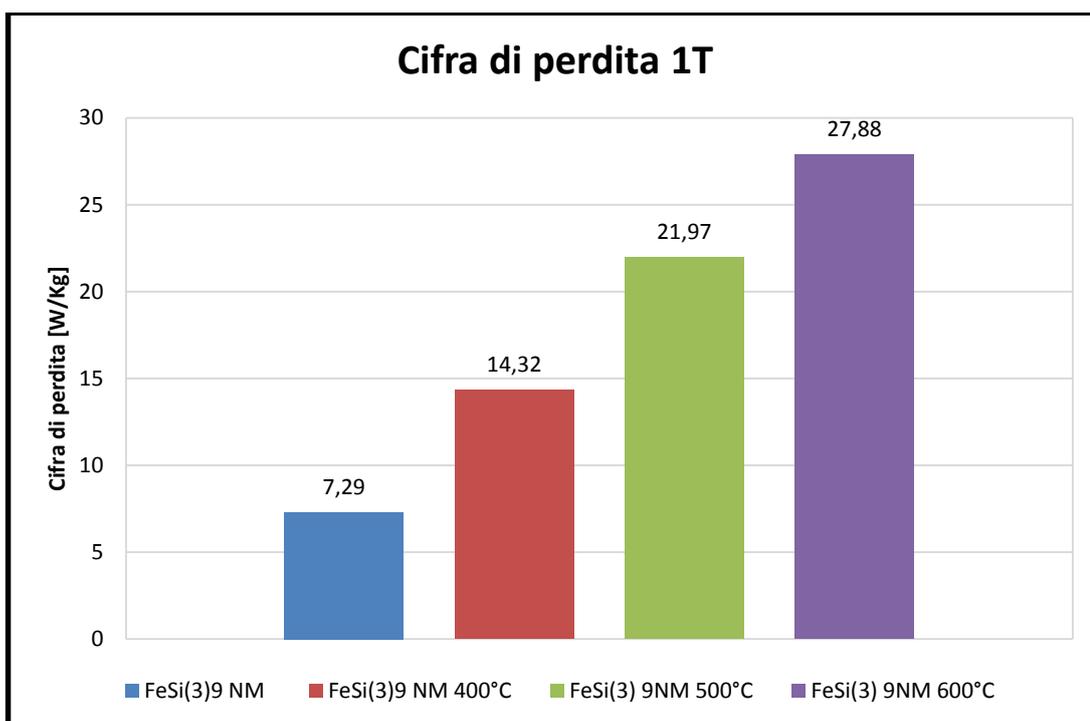


Figura 6-56: Cifra di perdita ad 1T 50Hz a diverse temperature, campione trattato in aria

Guardando i cicli di isteresi, ci si rende conto di come effettivamente dopo tale trattamento il campione non abbia più le proprietà caratteristiche di un SMC.

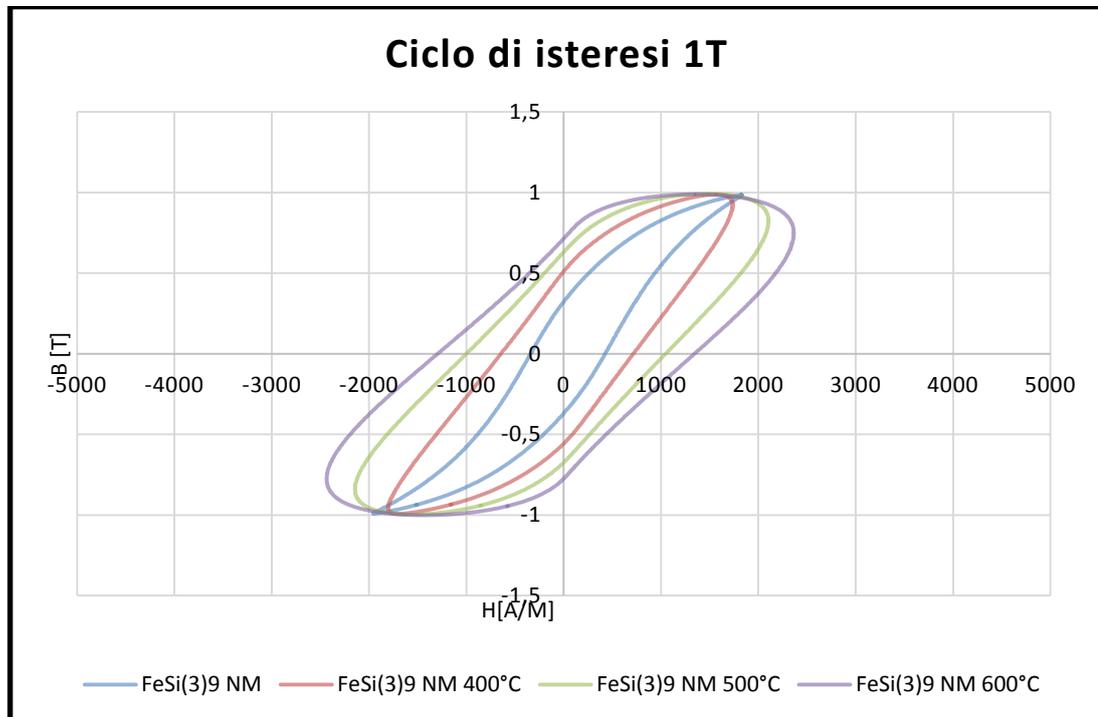


Figura 6-57: Ciclo di isteresi ad 1T 50Hz a diverse temperature, campione trattato in aria

**Campione allo 0,1% in peso di silicio con trattamento in vuoto.**

Gli effetti visti nel trattamento termico in aria, si ripetono in modo molto simile dopo il trattamento in vuoto. La permeabilità massima raggiunge valori maggiori dopo il trattamento a 400°C, non distaccandosi però molto dal valore del provino non trattato termicamente. Alle temperature successive di 500°C e 600°C decresce leggermente, ma come prima per valori di campo maggiori di 4000A/m i valori di induzione magnetica tendono allo stesso asintoto. Dal punto di vista magnetico risulta migliore dunque il trattamento a 400°C.

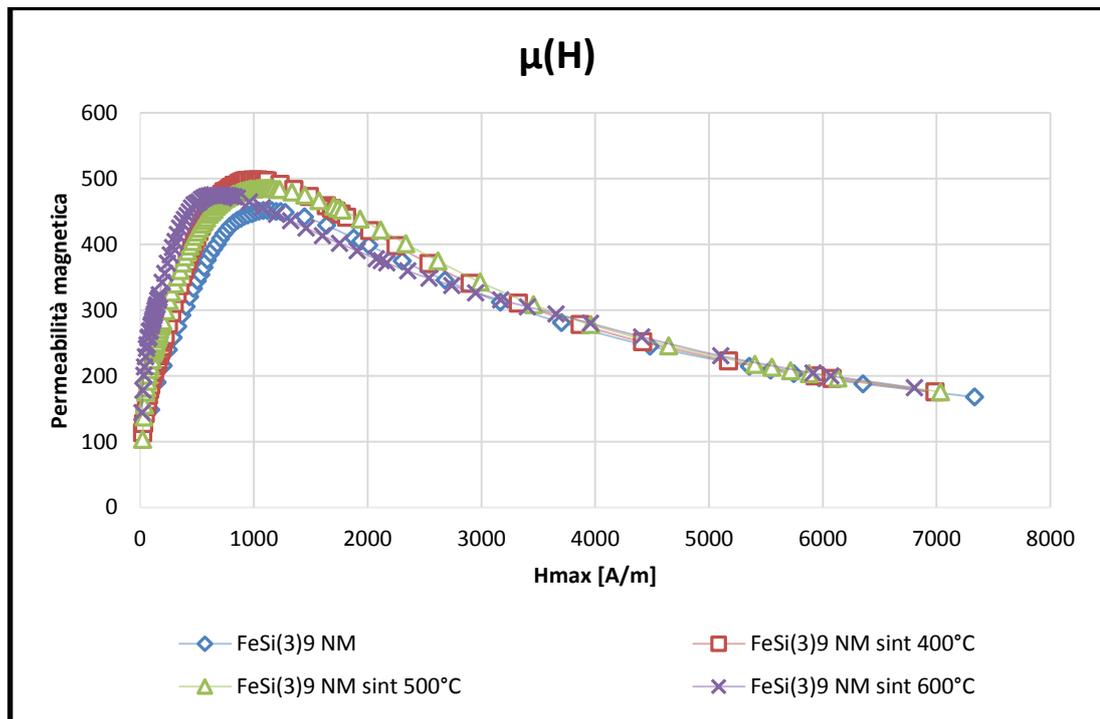


Figura 6-58: Permeabilità magnetica 50Hz a diverse temperature, campione trattato in vuoto

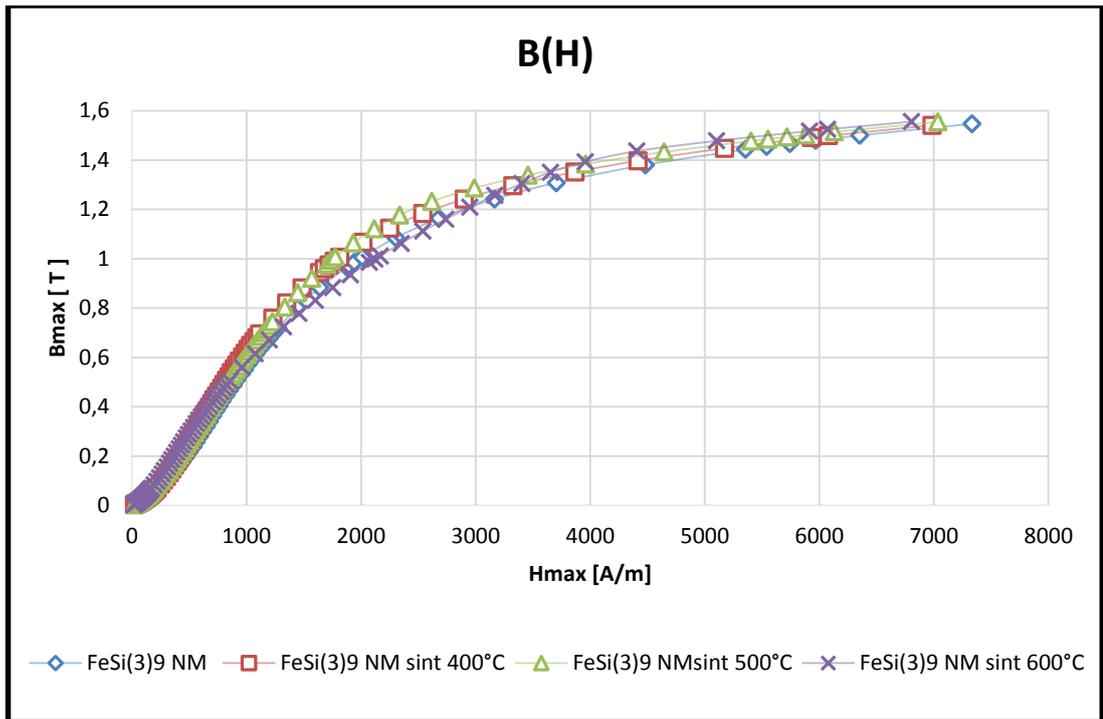


Figura 6-59: Induzione magnetica 50Hz a diverse temperature, campione trattato in vuoto

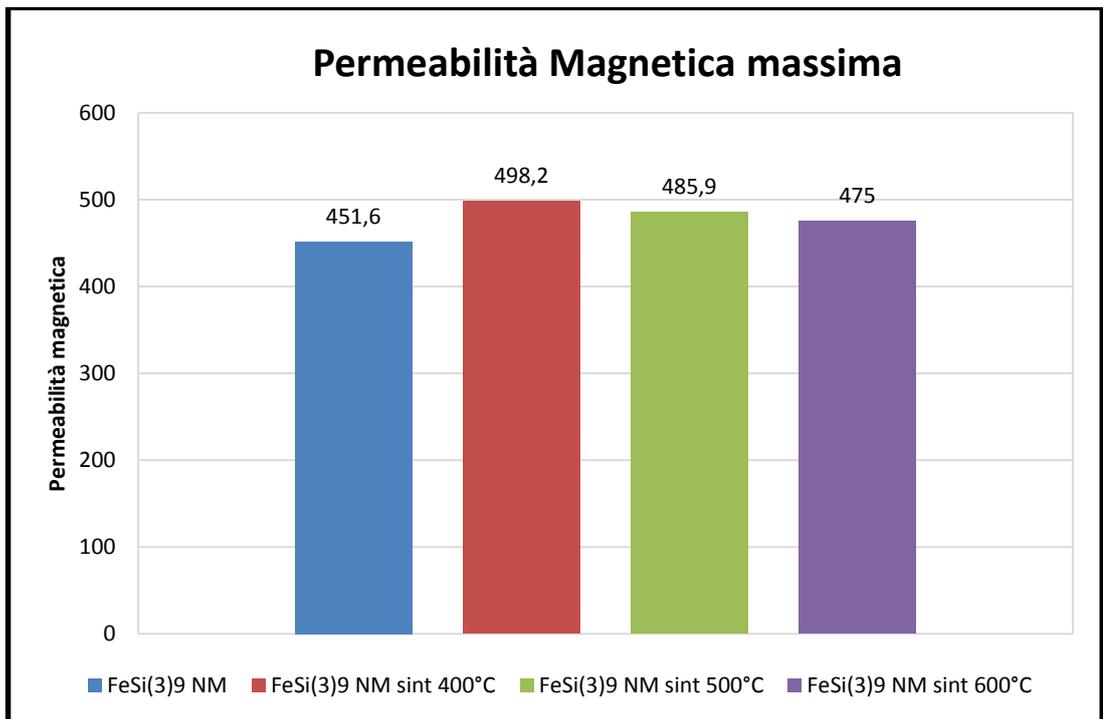


Figura 6-60: Istogramma permeabilità magnetica massima 50Hz a diverse temperature, campione trattato in vuoto

Dal punto di vista delle perdite, la cifra di perdita mostra un leggero aumento dopo il trattamento a 400°C, ma mantenendosi a valori simili al provino non trattato termicamente. Alle temperature successive si nota un aumento non indifferente della cifra di perdita.

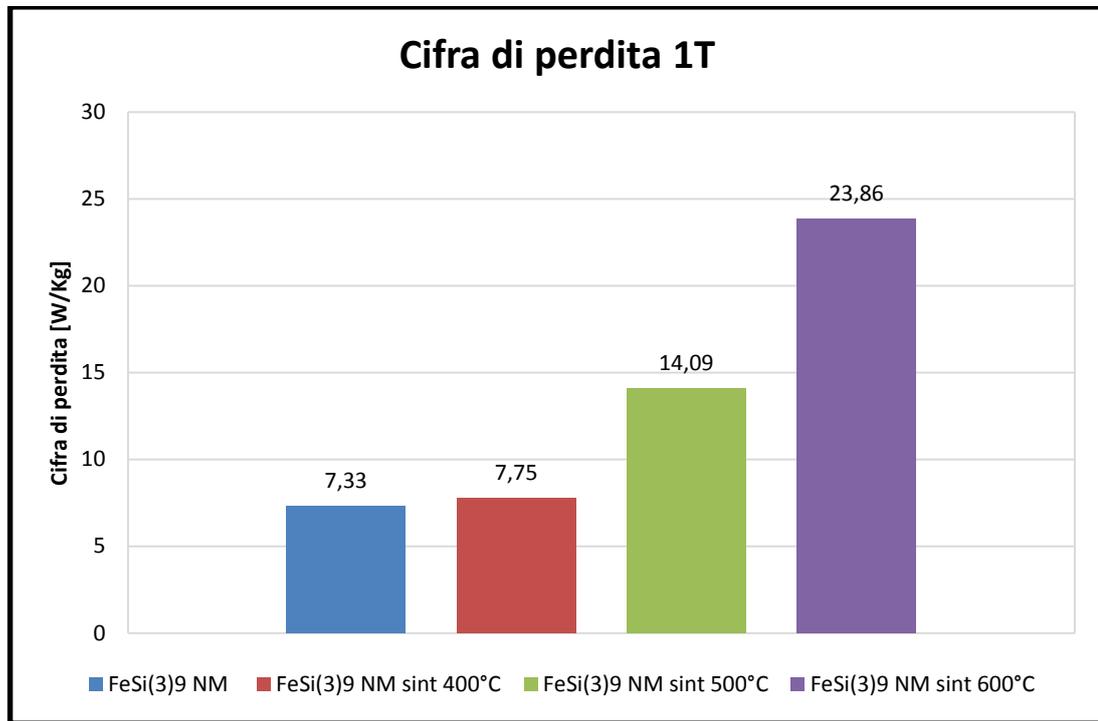


Figura 6-61: Cifra di perdita ad 1T 50Hz a diverse temperature, campione trattato in vuoto

Dal ciclo di isteresi, vediamo come questa volta dopo il trattamento a 400°C il materiale continui ad avere proprietà da SMC.

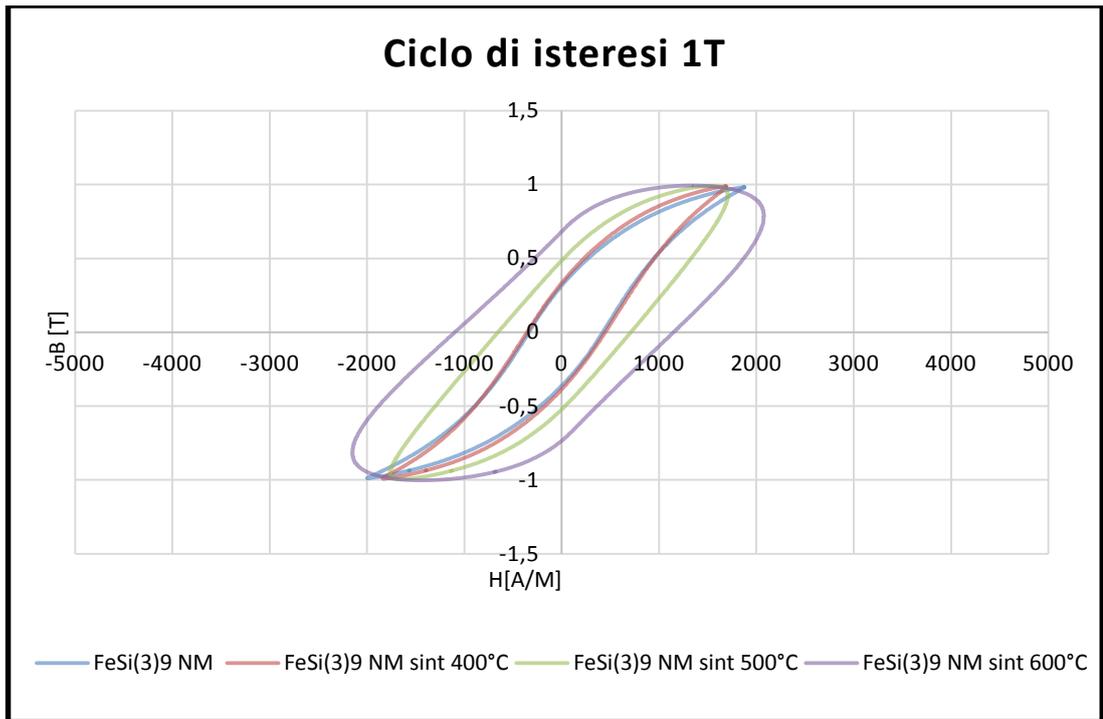


Figura 6-62: Ciclo di isteresi ad 1T 50Hz a diverse temperature, campione trattato in vuoto

**Confronto trattamento in aria e in vuoto a 400°C per il campione allo 0,1% in peso di silicio a diverse frequenze.**

Avendo visto come il trattamento migliore sia un trattamento termico a 400°C, confrontiamo i due trattamenti alle diverse frequenze. A 50Hz le caratteristiche magnetiche del materiale nei due trattamenti sono molto simili.

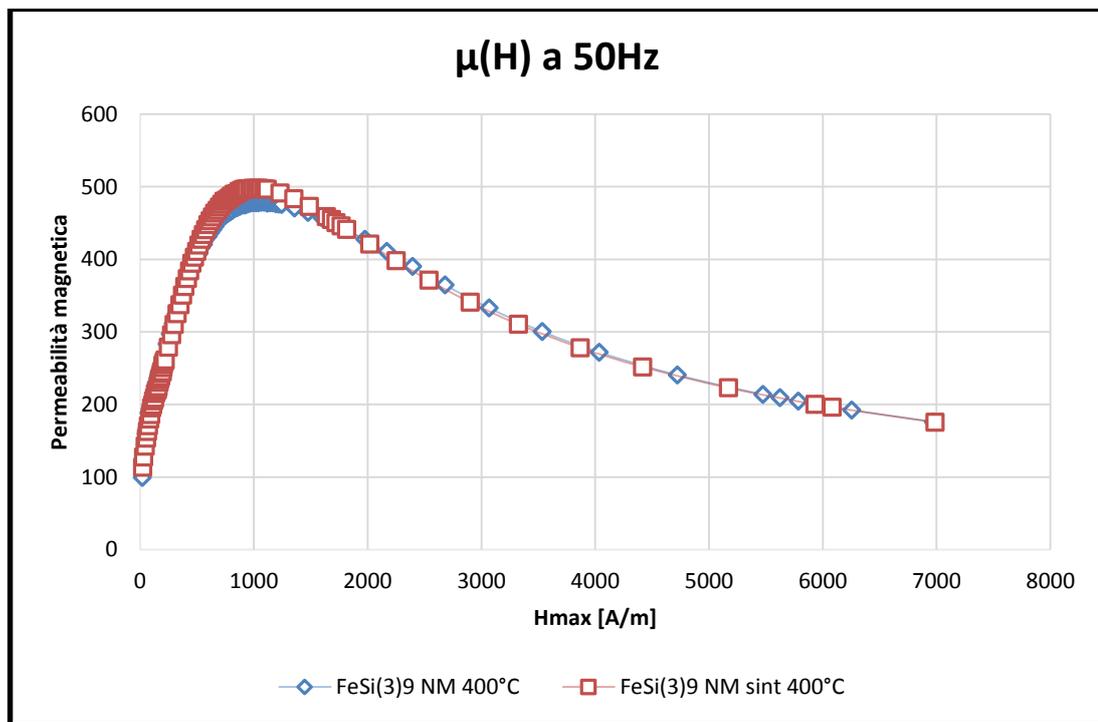


Figura 6-63: Permeabilità magnetica 50Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

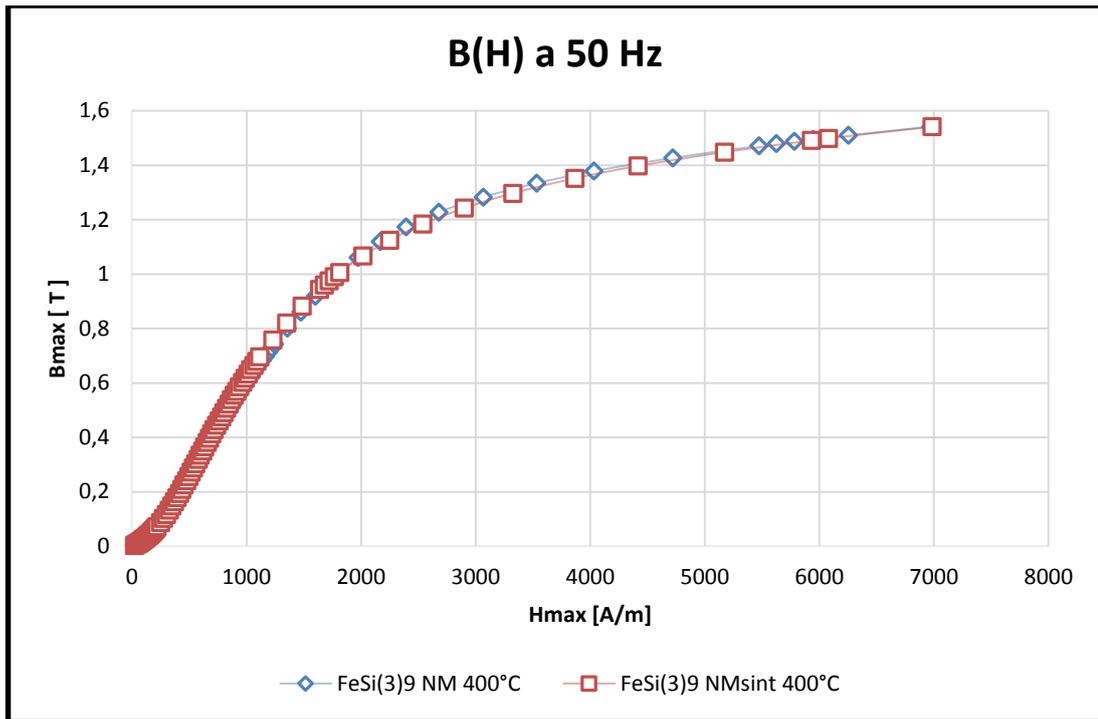


Figura 6-64: Induzione magnetica 50Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

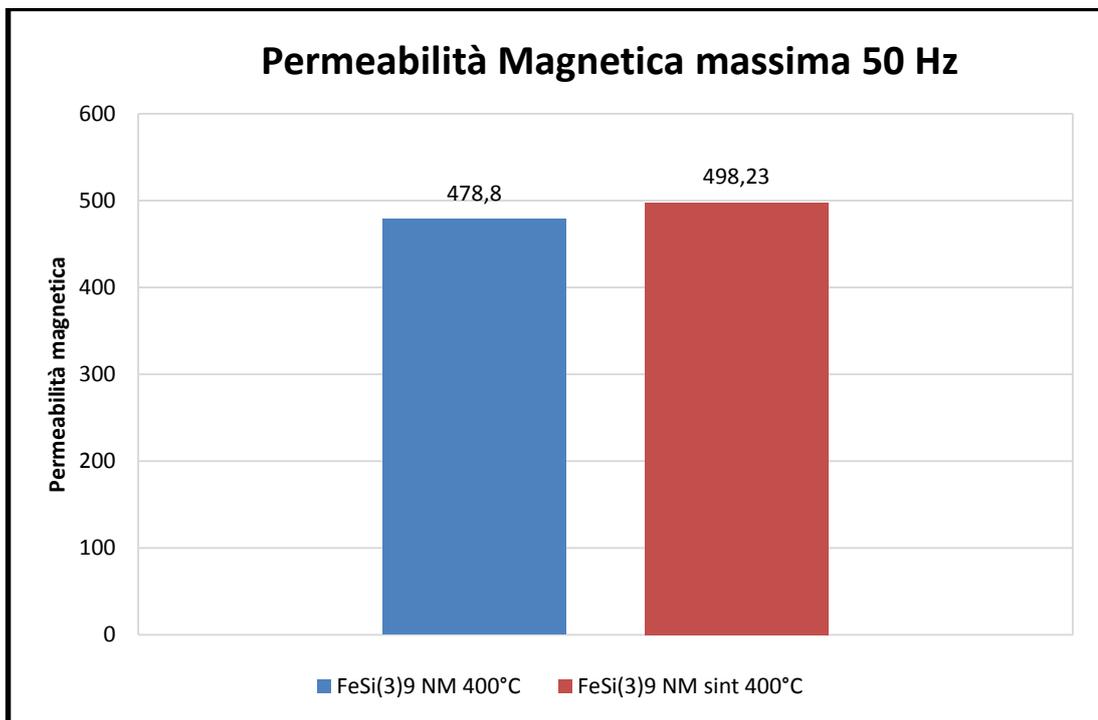


Figura 6-65: Istogramma permeabilità magnetica massima 50Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

La cifra di perdita invece risente in modo significativo del trattamento, presentato valori molto discordanti dipendentemente dall'ambiente di trattamento.

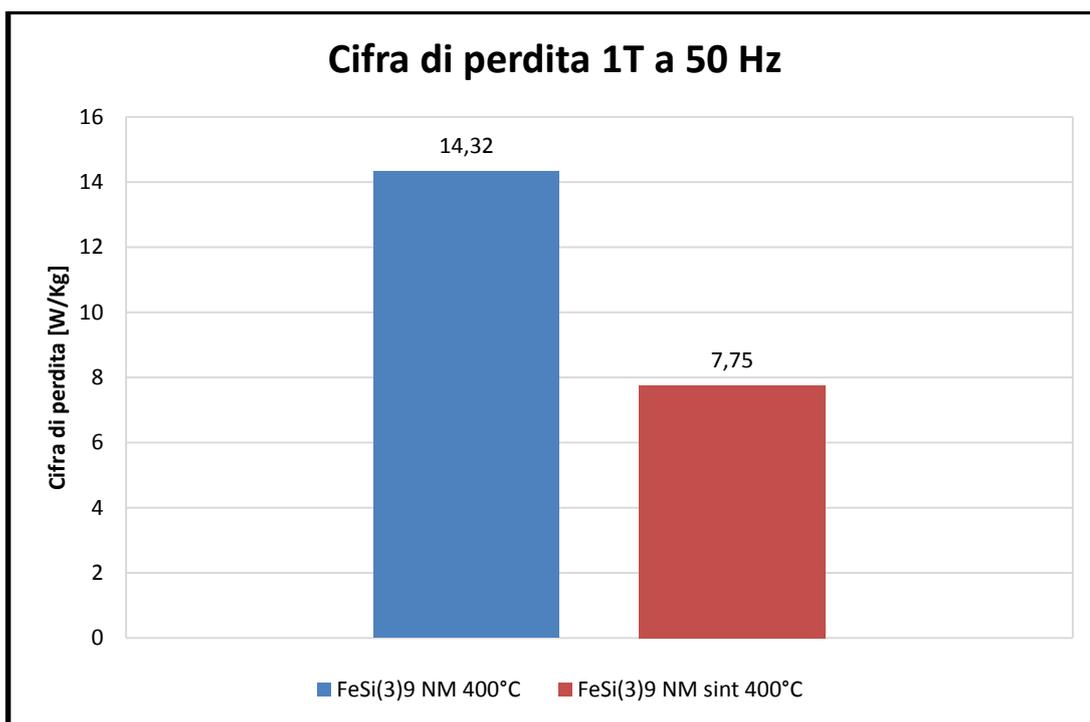


Figura 6-66: Cifra di perdita ad 1T 50Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

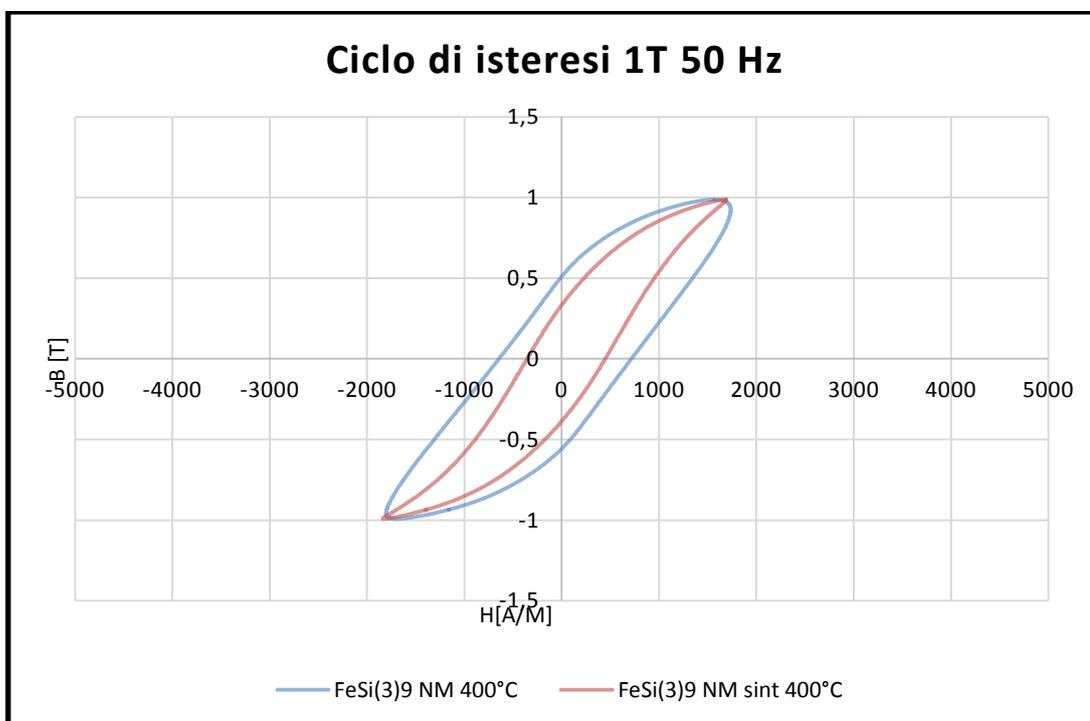


Figura 6-67: Ciclo di isteresi ad 1T 50Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

Alla frequenza di 200Hz, si assiste ad un declino maggiore delle caratteristiche magnetiche del campione trattato in aria, rispetto al campione trattato in vuoto.

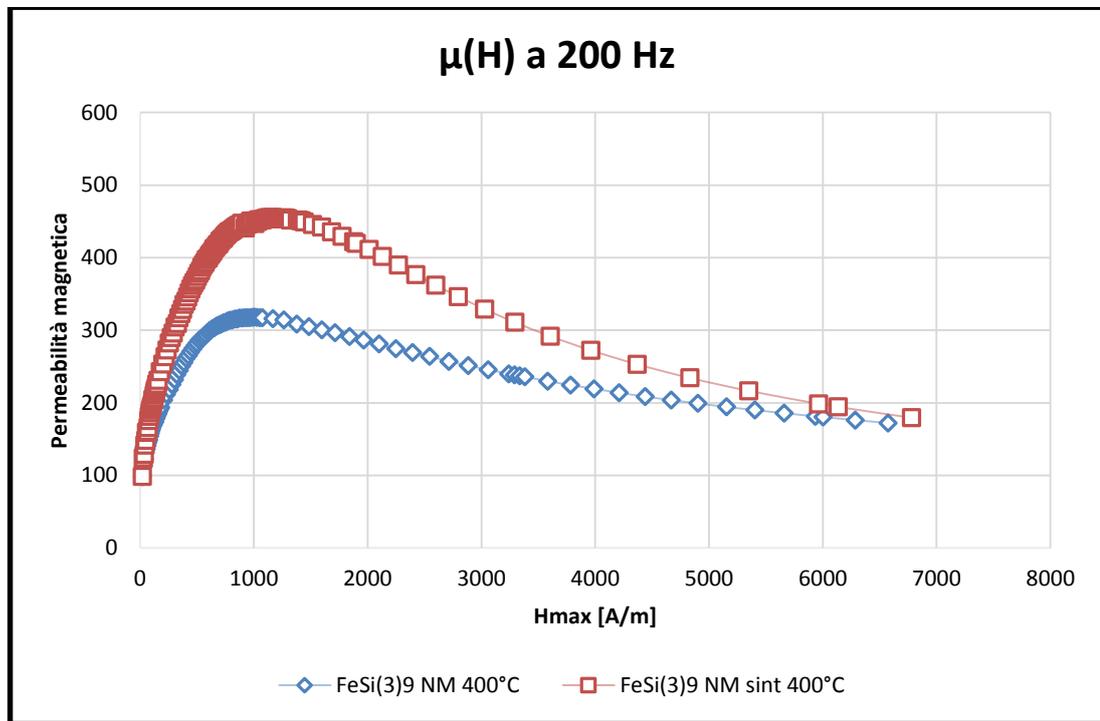


Figura 6-68: Permeabilità magnetica 200Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

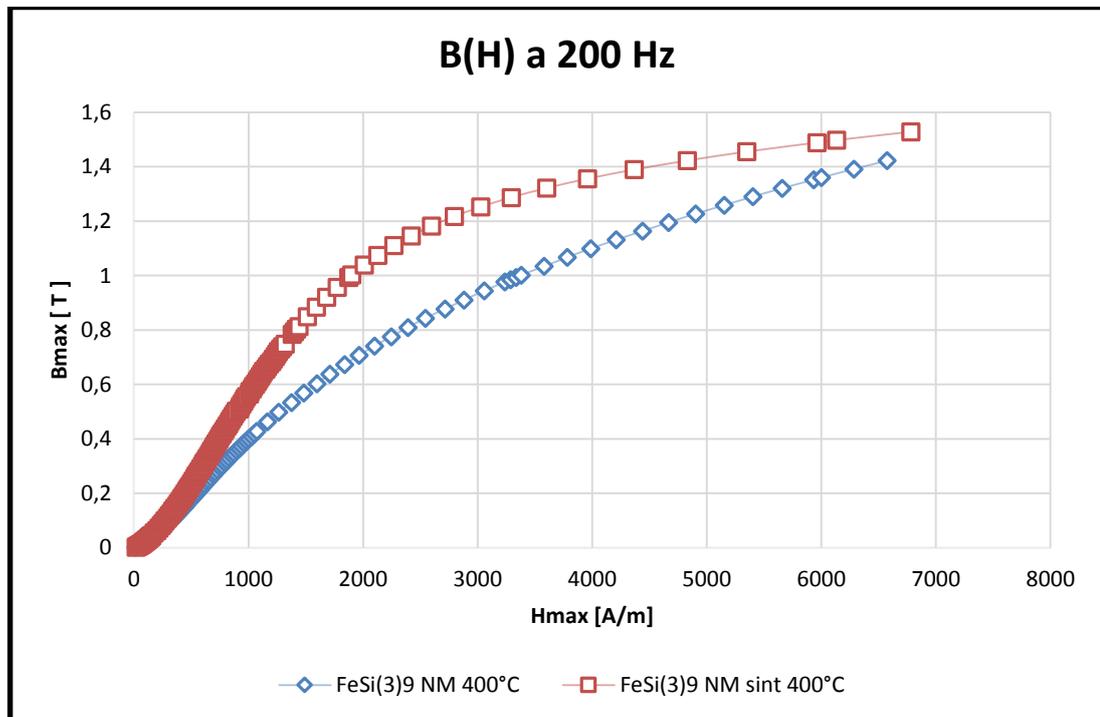


Figura 6-69: Induzione magnetica 200Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

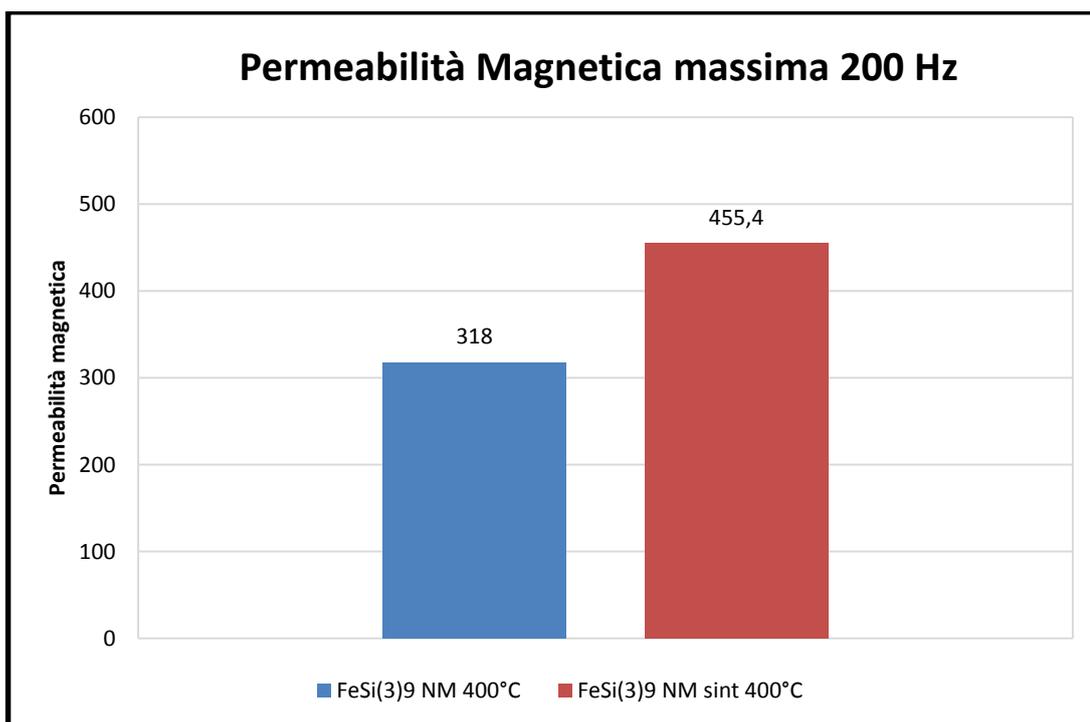


Figura 6-70: Istogramma permeabilità magnetica massima 200Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

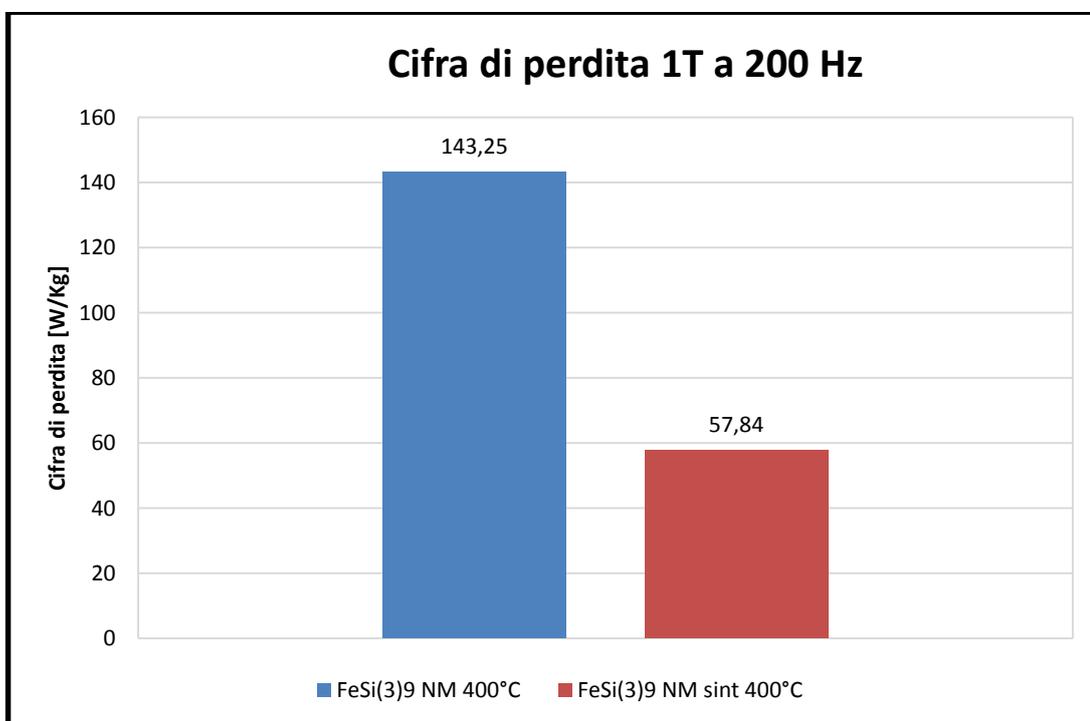


Figura 6-71: Cifra di perdita ad 1T 200Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

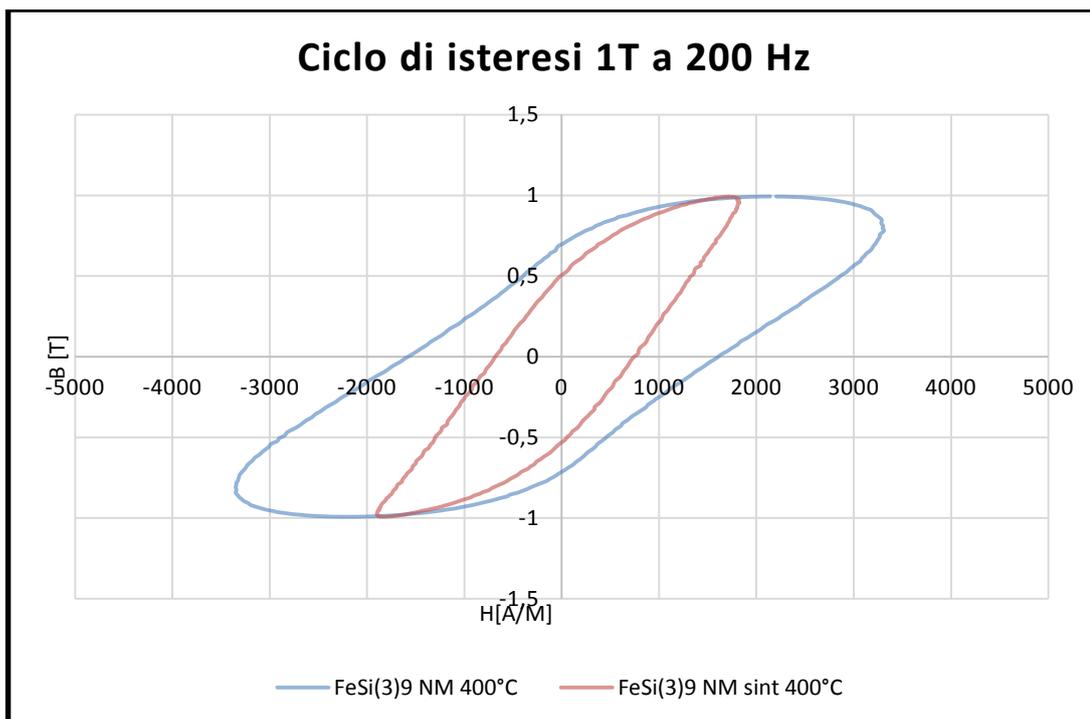


Figura 6-72: Ciclo di isteresi ad 1T 200Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

A 500Hz il divario aumenta ancora.

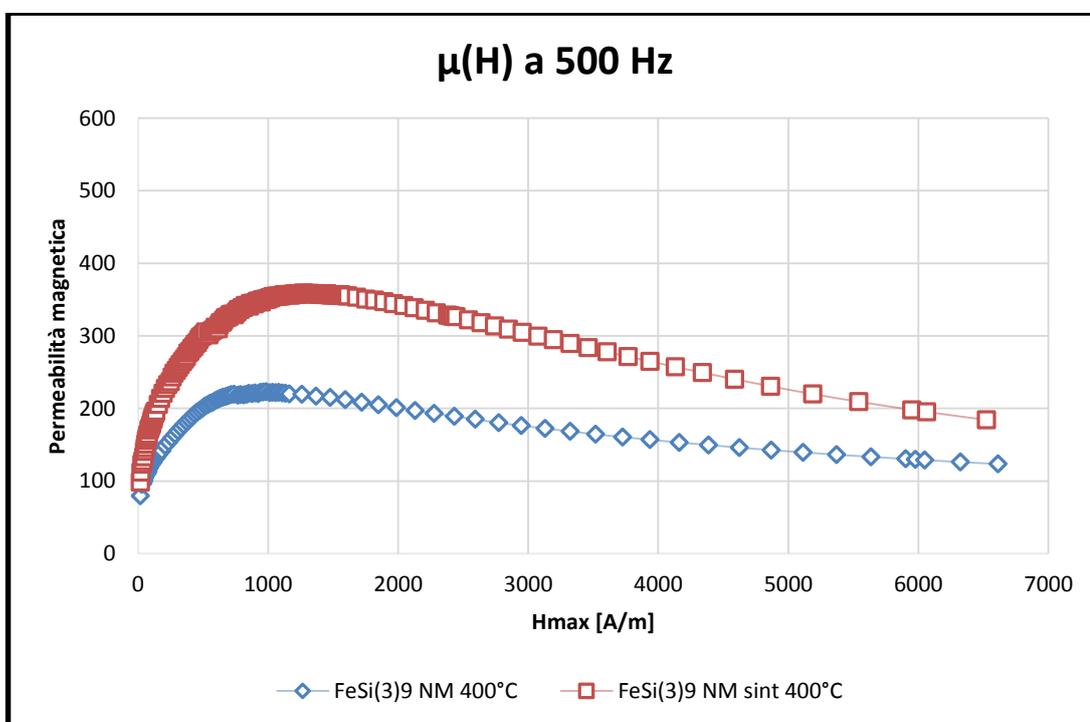


Figura 6-73: Permeabilità magnetica 500Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

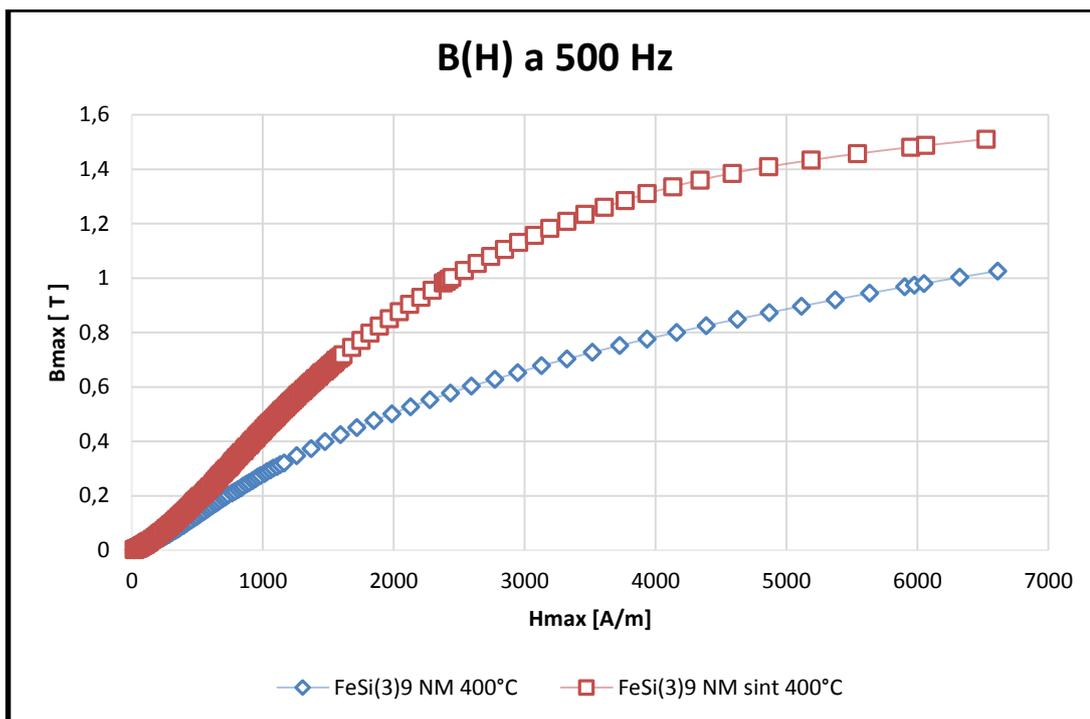


Figura 6-74: Induzione magnetica 500Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

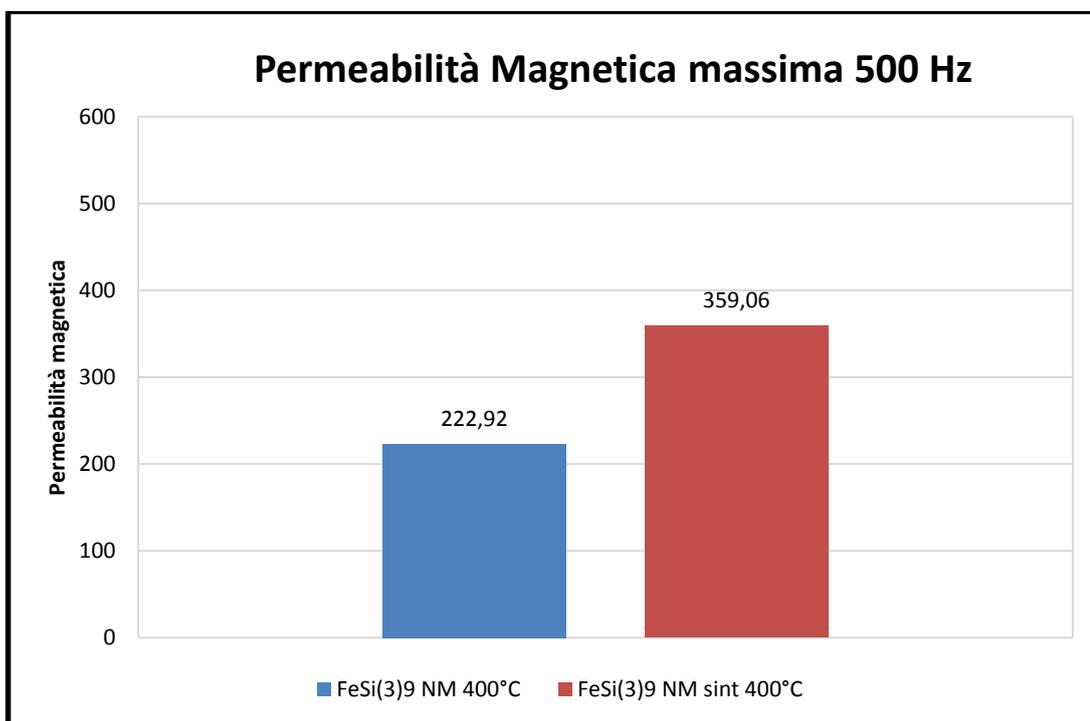


Figura 6-75: Istogramma permeabilità magnetica massima 500Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

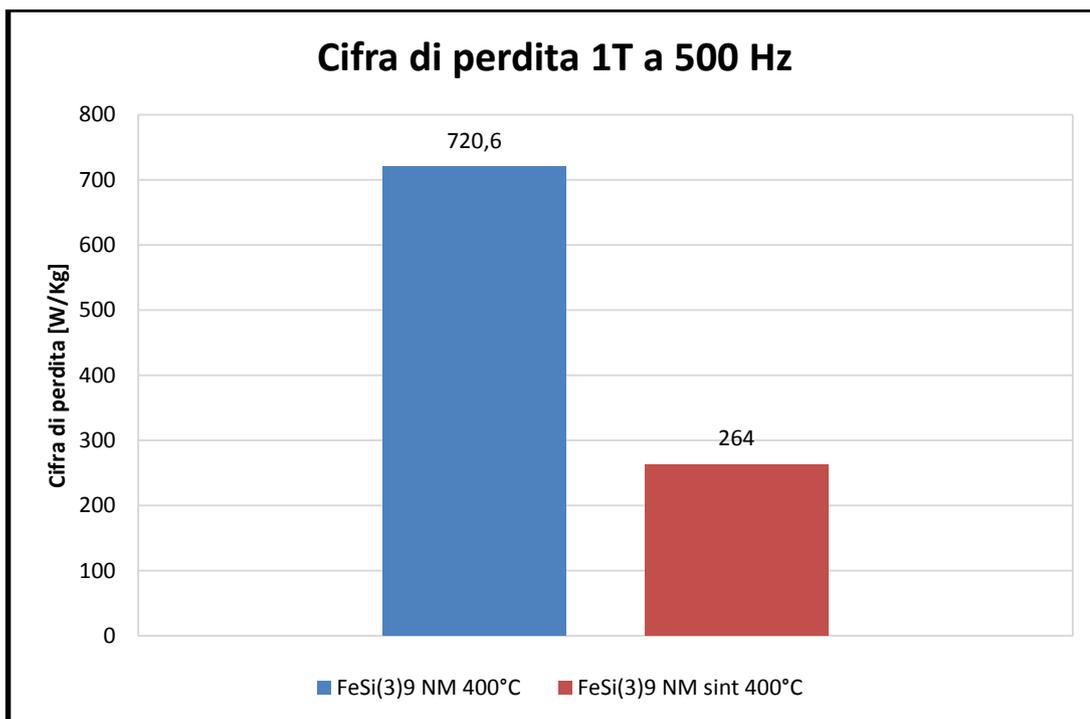


Figura 6-76: Cifra di perdita ad 1T 500Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

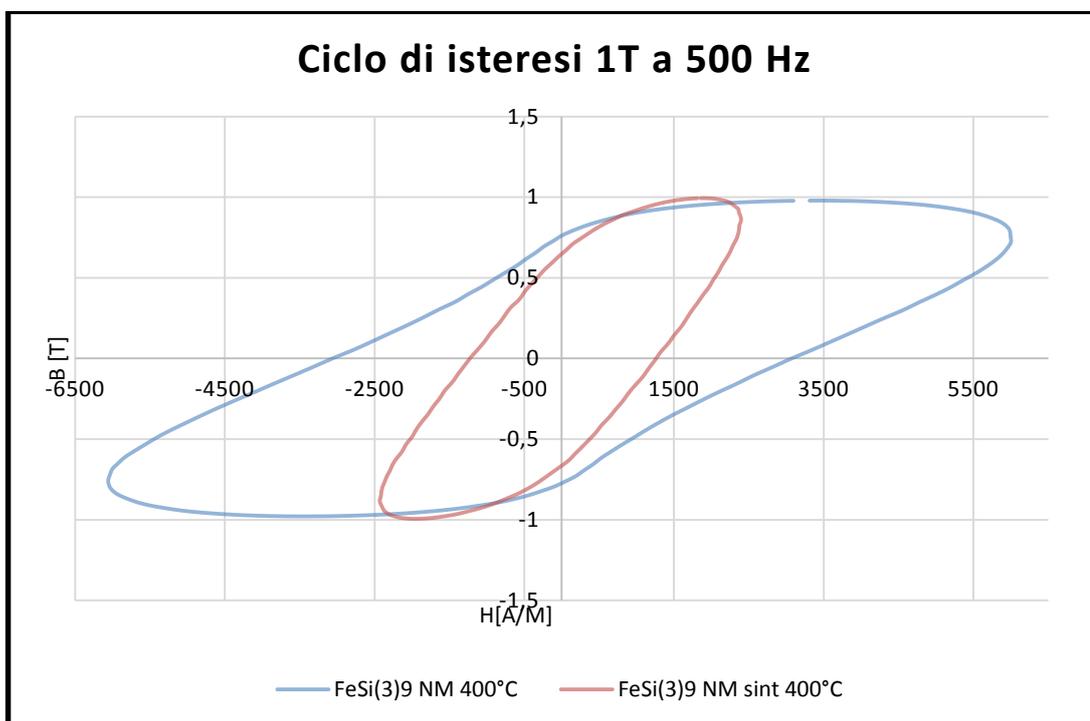


Figura 6-77: Ciclo di isteresi ad 1T 500Hz confronto trattamento aria e vuoto, campione allo 0.1% in peso di silicio

In realtà per il campione allo 0,1% in peso di silicio anche il trattamento in vuoto, seppur migliore rispetto quello in aria, mostra come all'aumentare della frequenza le caratteristiche

magnetiche e di perdita peggiorino in maniera non indifferente. In conclusione, lo 0,1 % di silicio presenta delle ottime proprietà, ma non è adatto a subire trattamenti termici. Questo risulta inaccettabile, in quanto il materiale non trattato presenta delle caratteristiche meccaniche molto scarse.

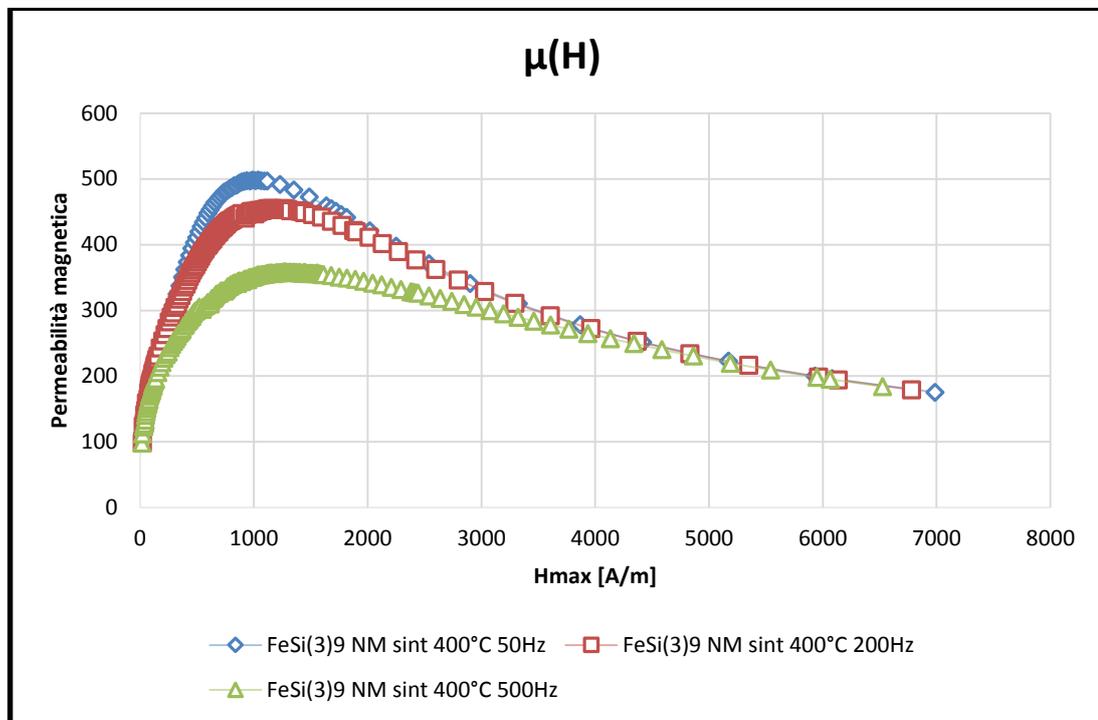


Figura 6-78: Permeabilità magnetica a diverse frequenze, campione allo 0,1% di silicio trattato in vuoto

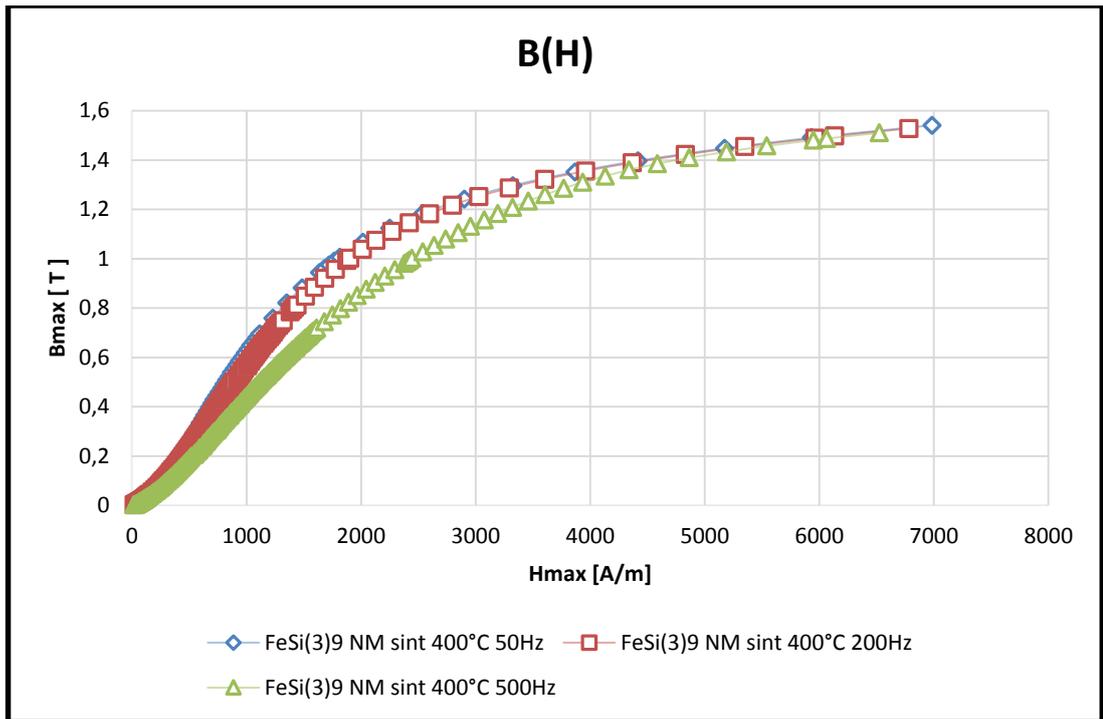


Figura 6-79: Induzione magnetica a diverse frequenze, campione allo 0.1% di silicio trattato in vuoto

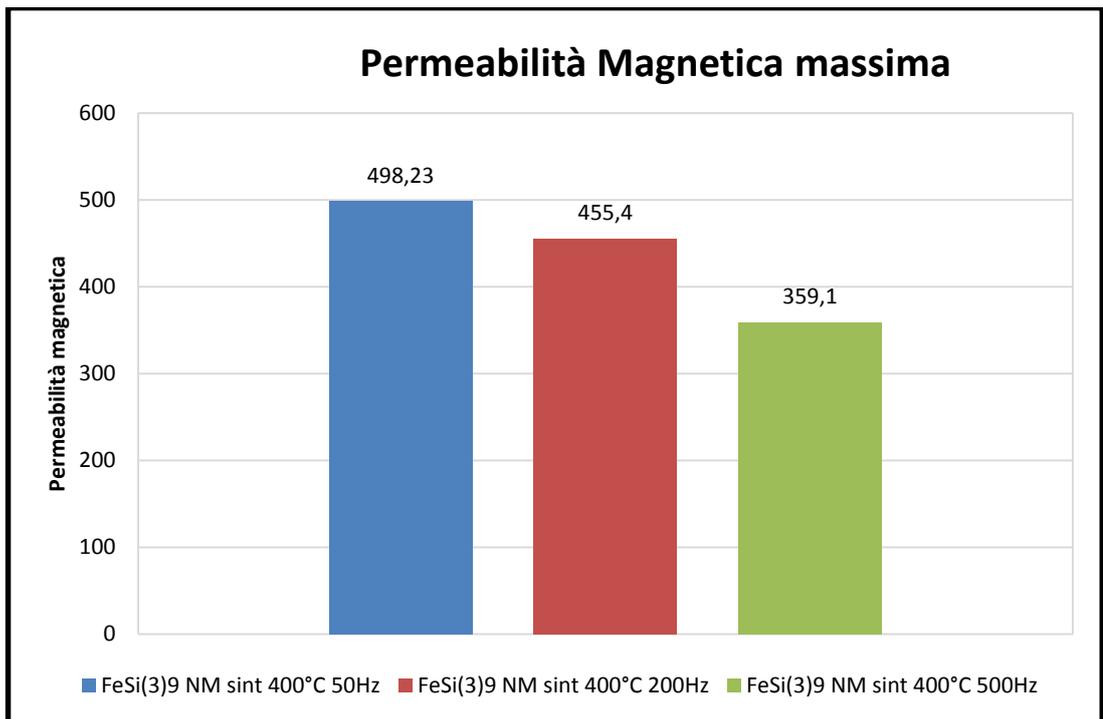


Figura 6-80: Istogramma permeabilità magnetica massima a diverse frequenze, campione allo 0.1% di silicio trattato in vuoto

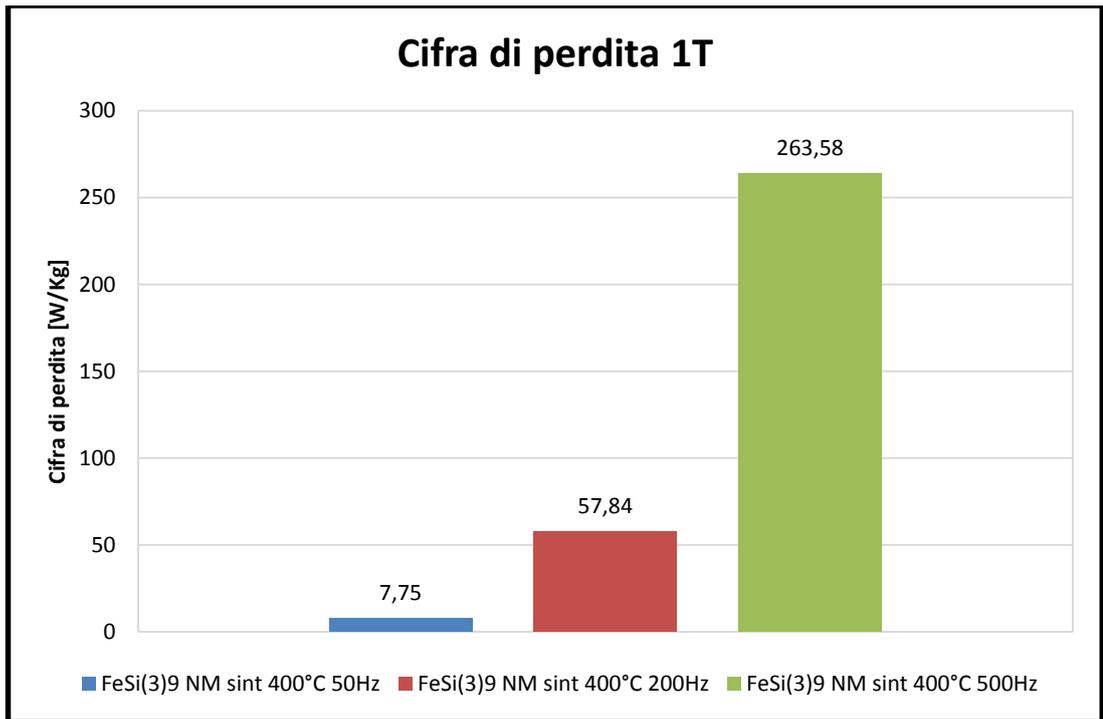


Figura 6-81: Cifra di perdita ad 1T a diverse frequenze, campione allo 0.1% di silicio trattato in vuoto

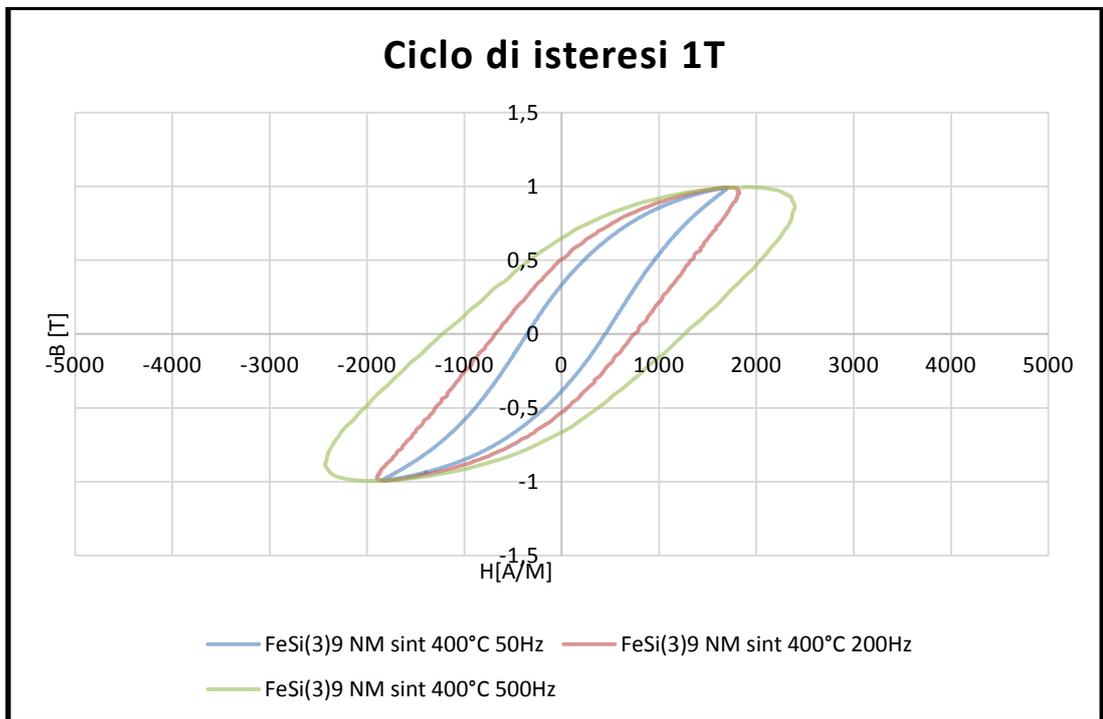


Figura 6-82: Ciclo di isteresi ad 1T a diverse frequenze, campione allo 0.1% di silicio trattato in vuoto

### Campione allo 0,5% in peso di silicio con trattamento in aria.

Nel campione allo 0,5% in peso di silicio, il trattamento termico a 400°C migliora di molto la permeabilità magnetica massima, mentre i trattamenti a 500°C e 600°C non modificano molto la caratteristica del materiale rispetto al primo trattamento. Anche per quanto riguarda la curva di induzione magnetica, si nota come il trattamento termico migliori, anche se di poco, i valori di induzione ad alti valori di campo.

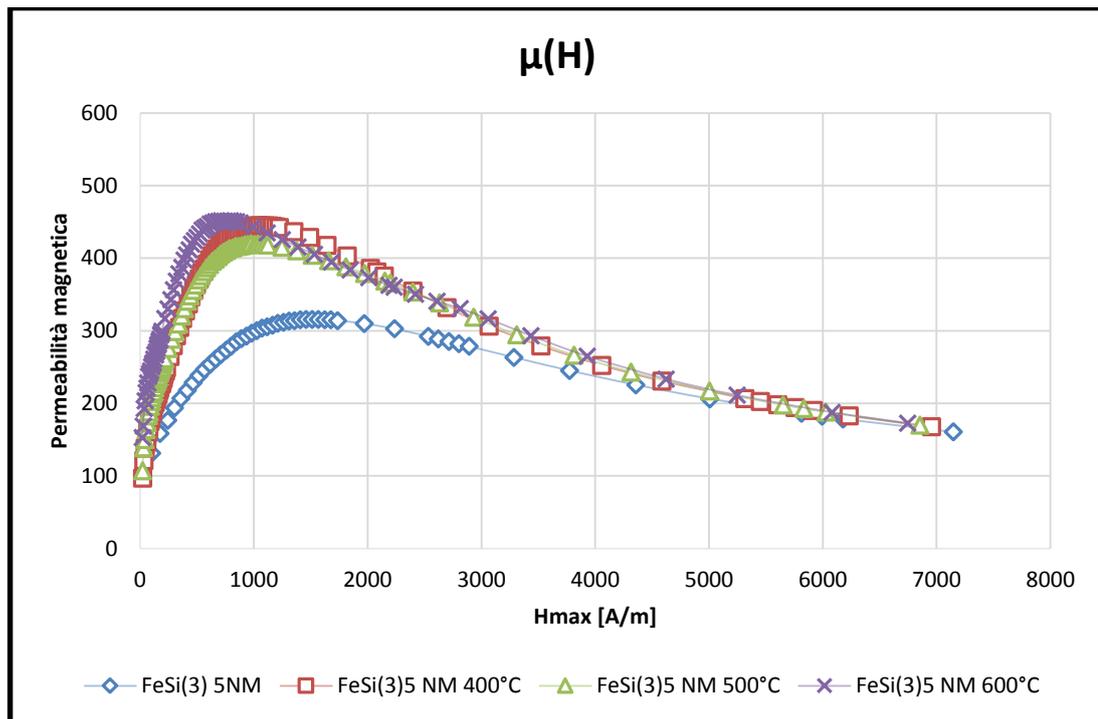


Figura 6-83: Permeabilità magnetica 50Hz a diverse temperature, campione trattato in aria

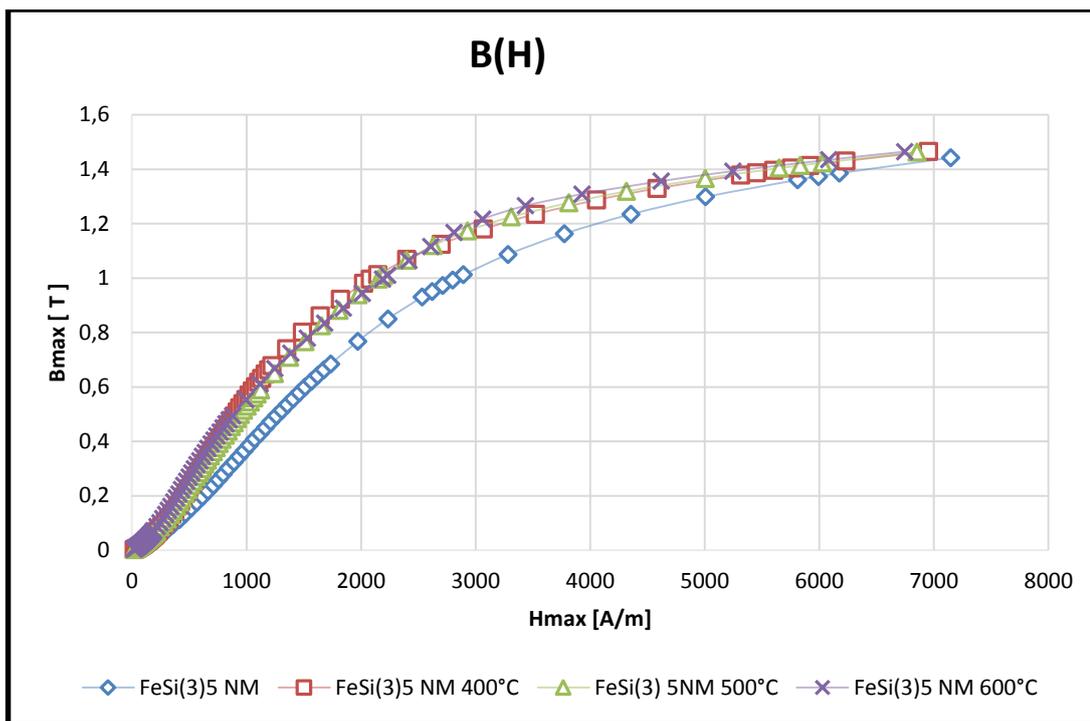


Figura 6-84: Induzione magnetica 50Hz a diverse temperature, campione trattato in aria

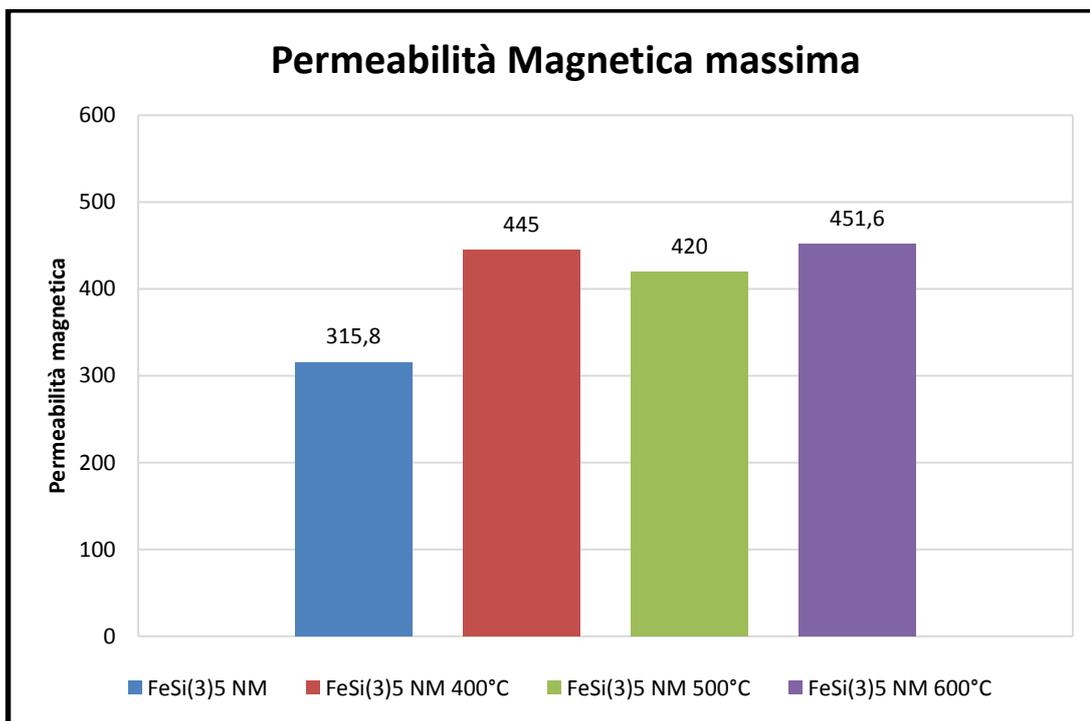


Figura 6-85: Istogramma permeabilità magnetica massima 50Hz a diverse temperature, campione trattato in aria

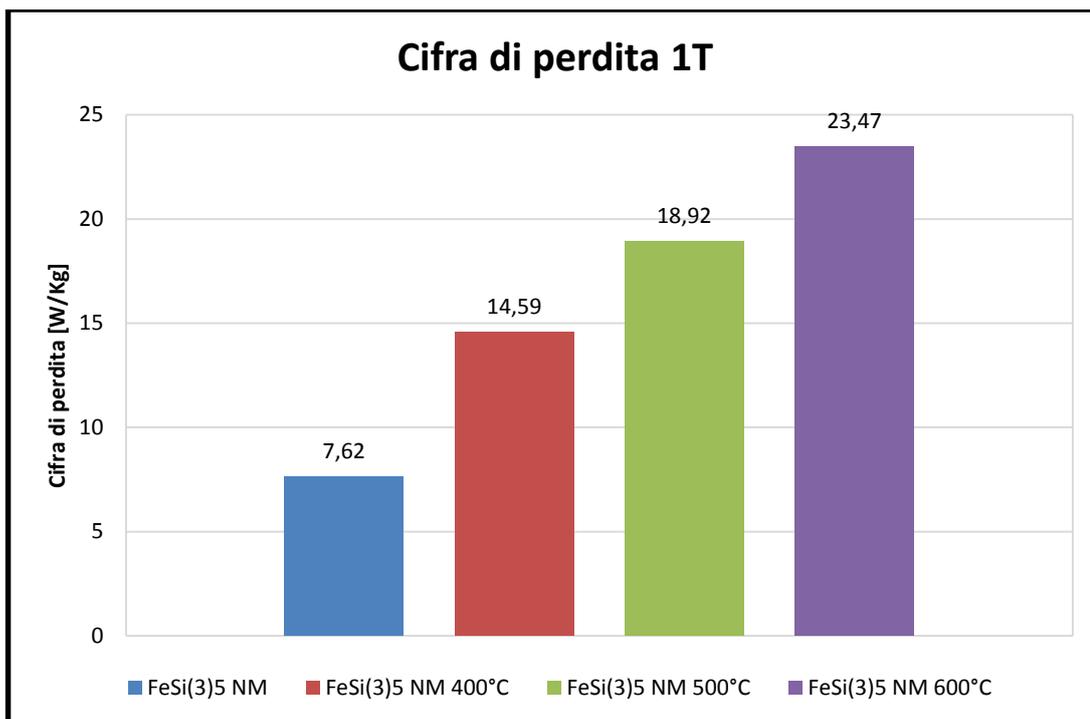


Figura 6-86: Cifra di perdita ad 1T 50Hz a diverse temperature, campione trattato in aria

Per quanto riguarda le perdite invece, il trattamento in aria peggiora anche in questo campione la cifra di perdita. Dal ciclo di isteresi, ci si rende conto di come dopo il trattamento termico, il materiale in questione non abbia più le proprietà caratteristiche di un SMC.

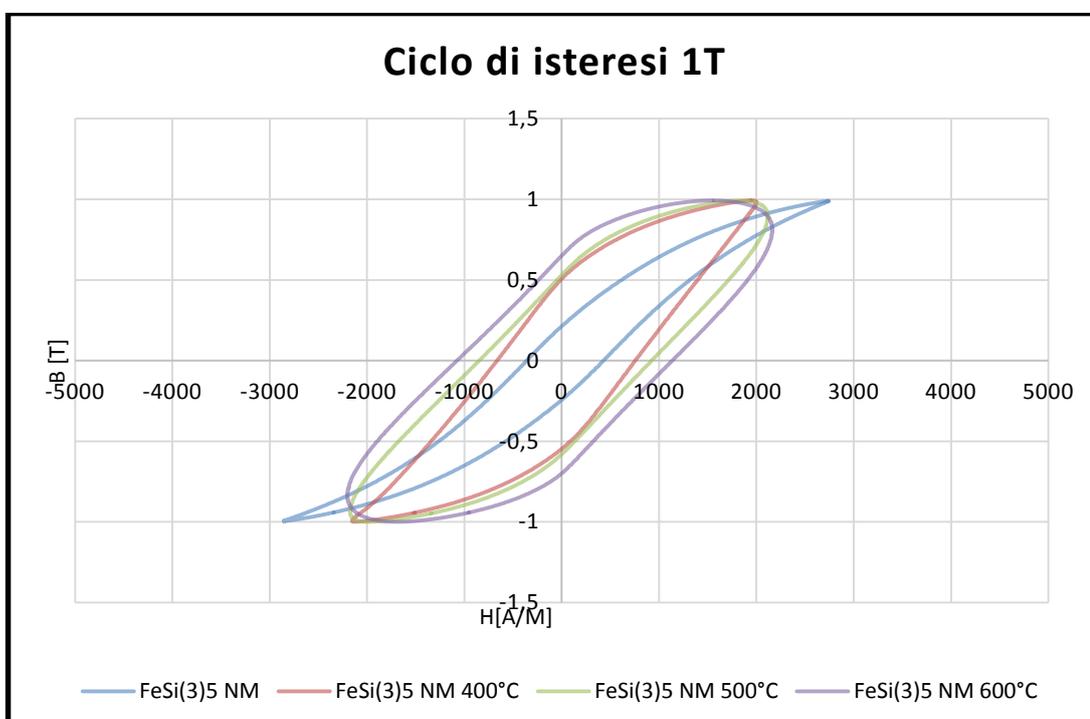


Figura 6-87: Ciclo di isteresi ad 1T 50Hz a diverse temperature, campione trattato in aria

**Campione allo 0,5% in peso di silicio con trattamento in vuoto.**

Il trattamento termico in vuoto mostra come nel campione con lo 0,5% in peso di Silicio si abbiano dei risultati migliori che senza trattamento. La permeabilità massima aumenta ad ogni ricottura successiva, come anche i valori di induzione ad alti valori di campo magnetico applicato.

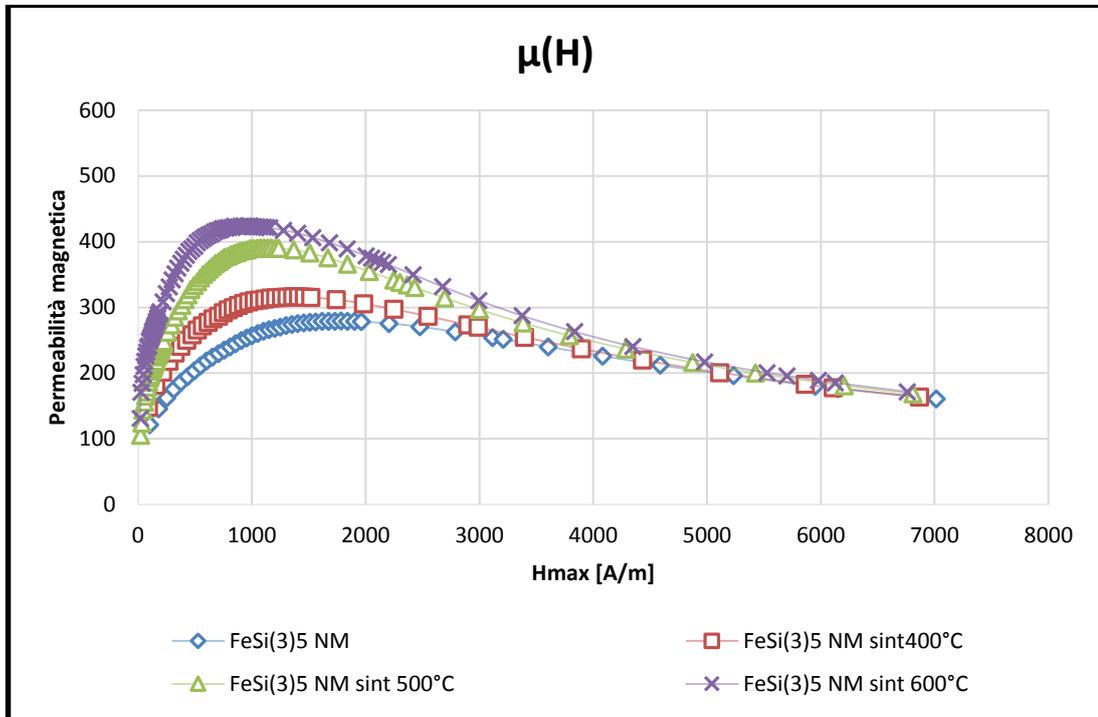


Figura 6-88: Permeabilità magnetica 50Hz a diverse temperature, campione trattato in vuoto

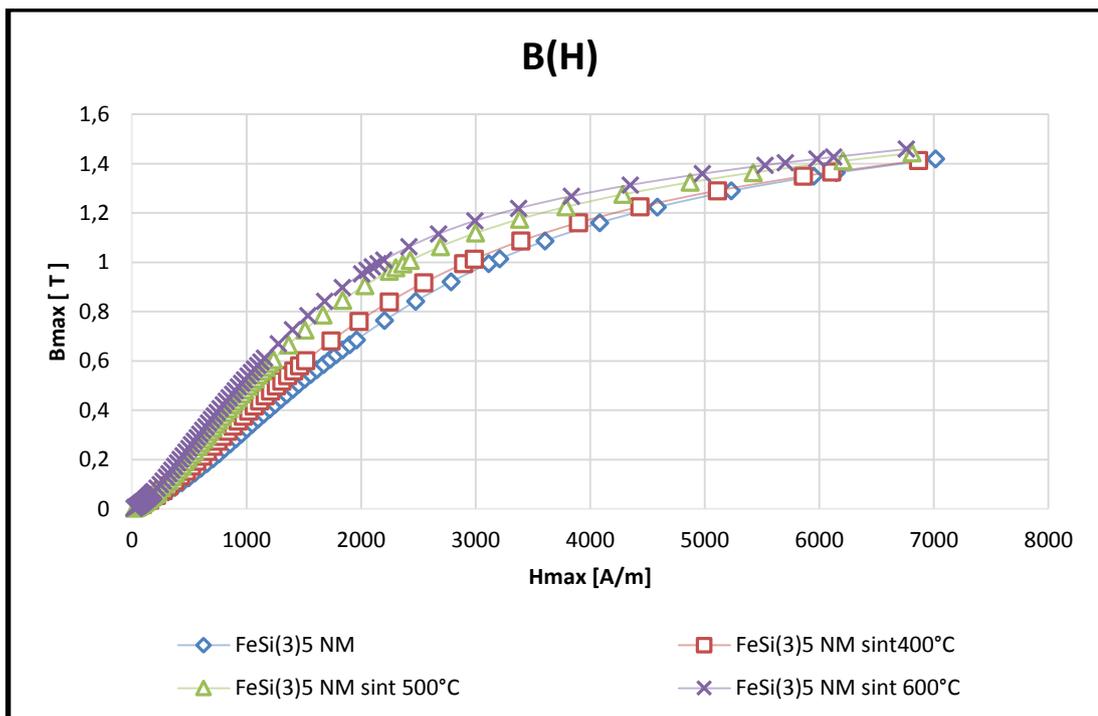


Figura 6-89: Induzione magnetica 50 Hz a diverse temperature, campione trattato in vuoto

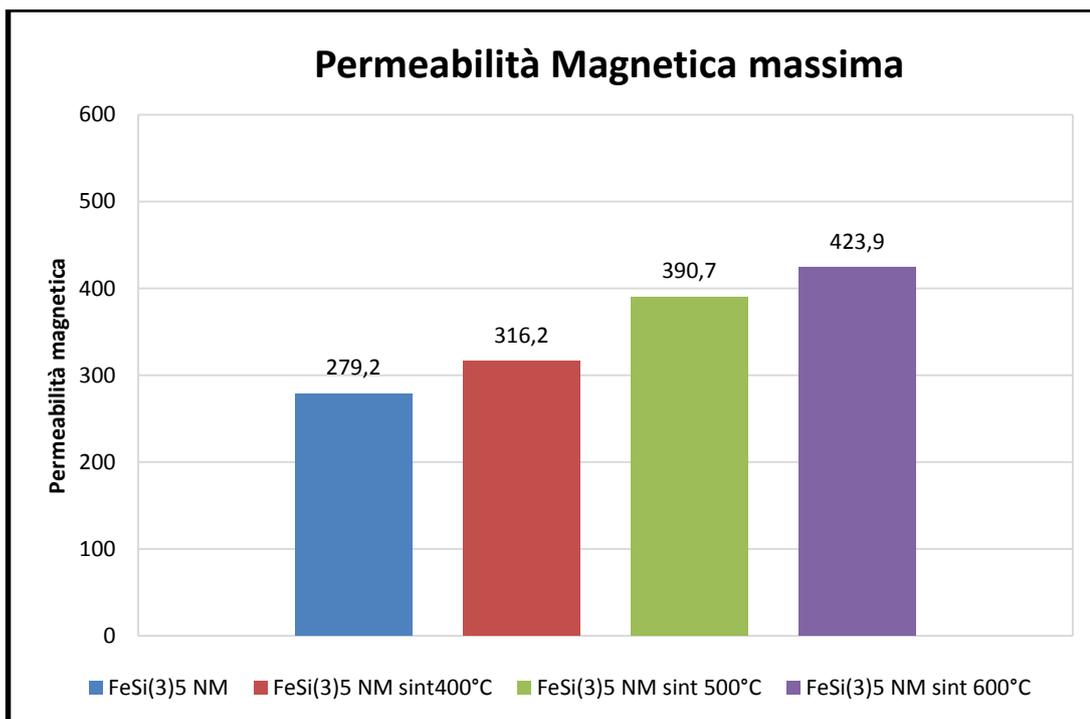


Figura 6-90: Istogramma permeabilità magnetica massima 50Hz a diverse temperature, campione trattato in vuoto

Per quanto riguarda le perdite, dopo il trattamento termico a 400°C, il campione presenta una cifra di perdita minore che nel campione non trattato termicamente, che successivamente aumenta dopo i trattamenti a 500°C e 600°C

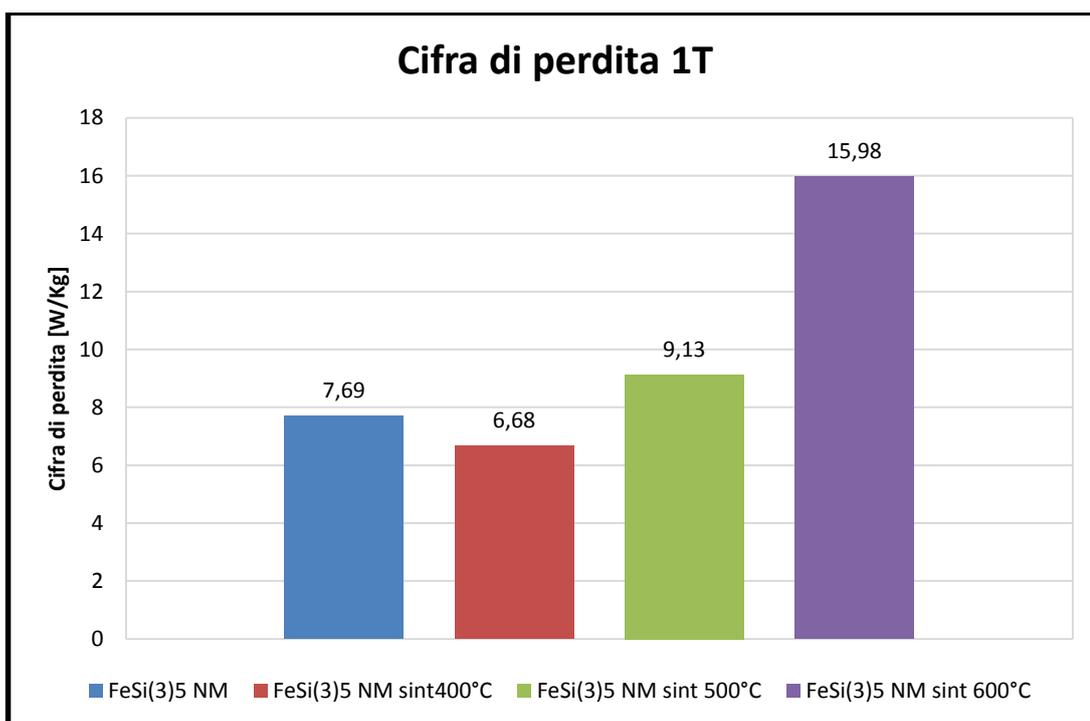


Figura 6-91: Cifra di perdita ad 1T 50Hz a diverse temperature, campione trattato in vuoto

Dal ciclo di isteresi, si vede come anche successivamente al trattamento a 500°C il materiale abbia ancora delle proprietà da SMC, cosa che invece non può essere affermata successivamente al trattamento a 600°C. Il trattamento migliore rimane comunque quello a 400°C, dove il campione non presenta buone proprietà solo ai 50Hz, ma anche a frequenze maggiori, come si vedrà successivamente.

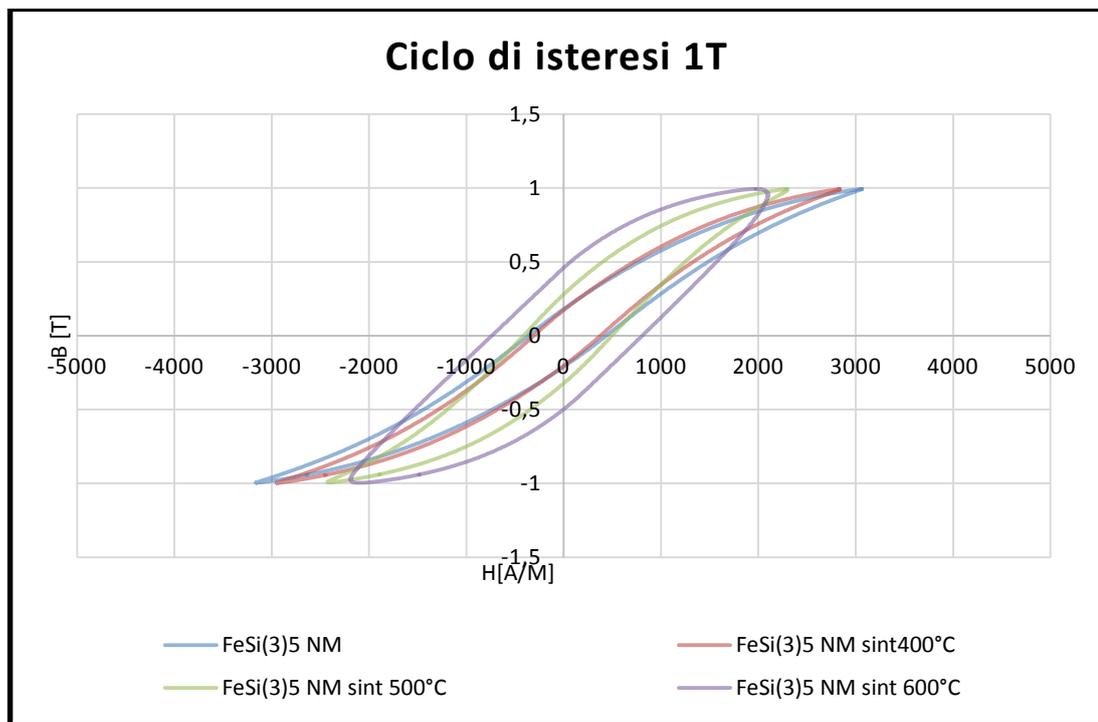


Figura 6-92: Ciclo di isteresi ad 1T 50Hz a diverse temperature, campione trattato in vuoto

### Confronto trattamento in aria e in vuoto a 400°C per il campione allo 0,5% in peso di silicio a diverse frequenze.

Avendo visto come il trattamento migliore sia un trattamento termico a 400°C, confrontiamo i due trattamenti alle diverse frequenze.

Alla frequenza di 50Hz le caratteristiche magnetiche del campione trattato in aria sono decisamente migliori rispetto al campione trattato in vuoto, mentre al contrario, per quanto riguarda le perdite il trattamento in aria risulta inaccettabile.

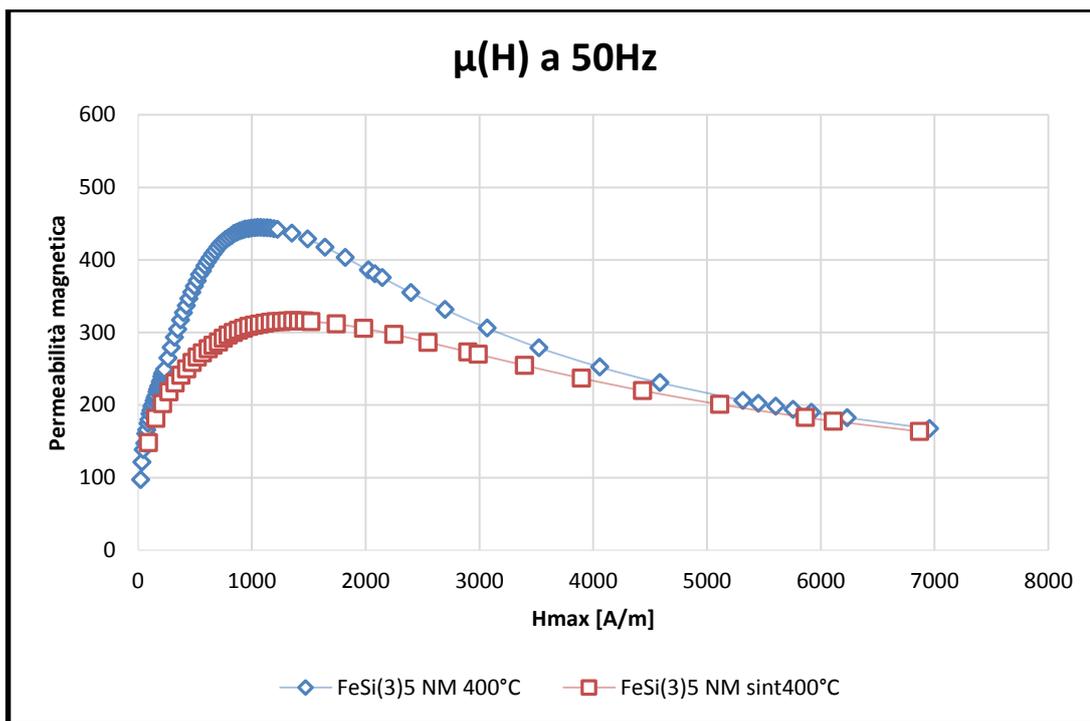


Figura 6-93: Permeabilità magnetica 50Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio

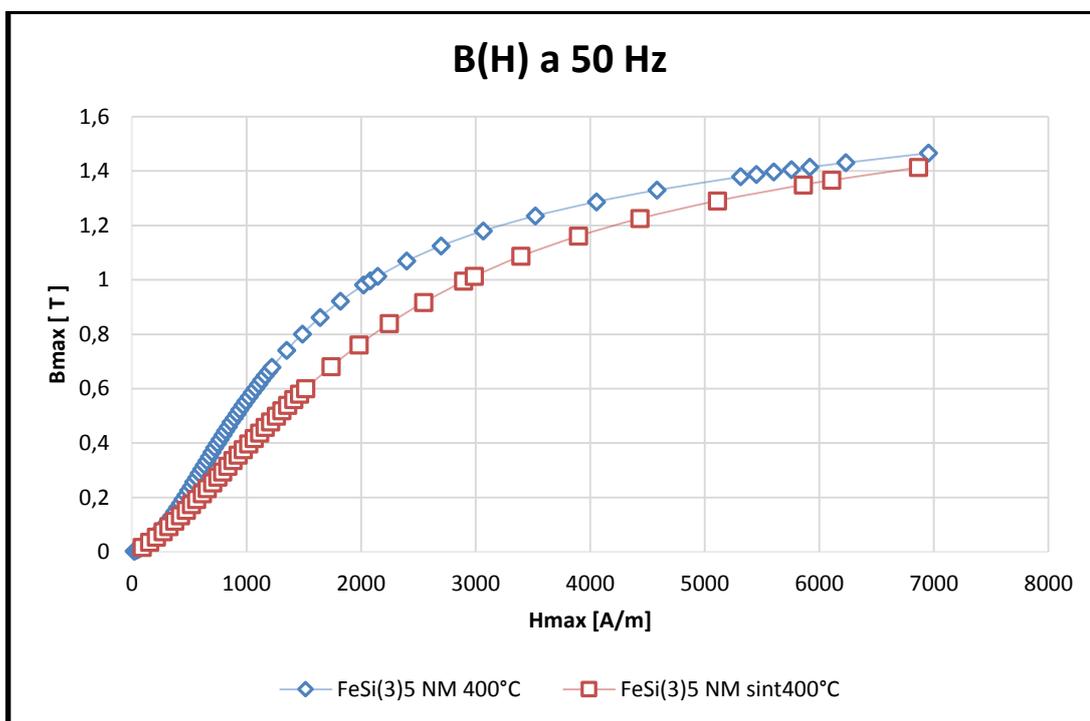


Figura 6-94: Induzione magnetica 50Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio

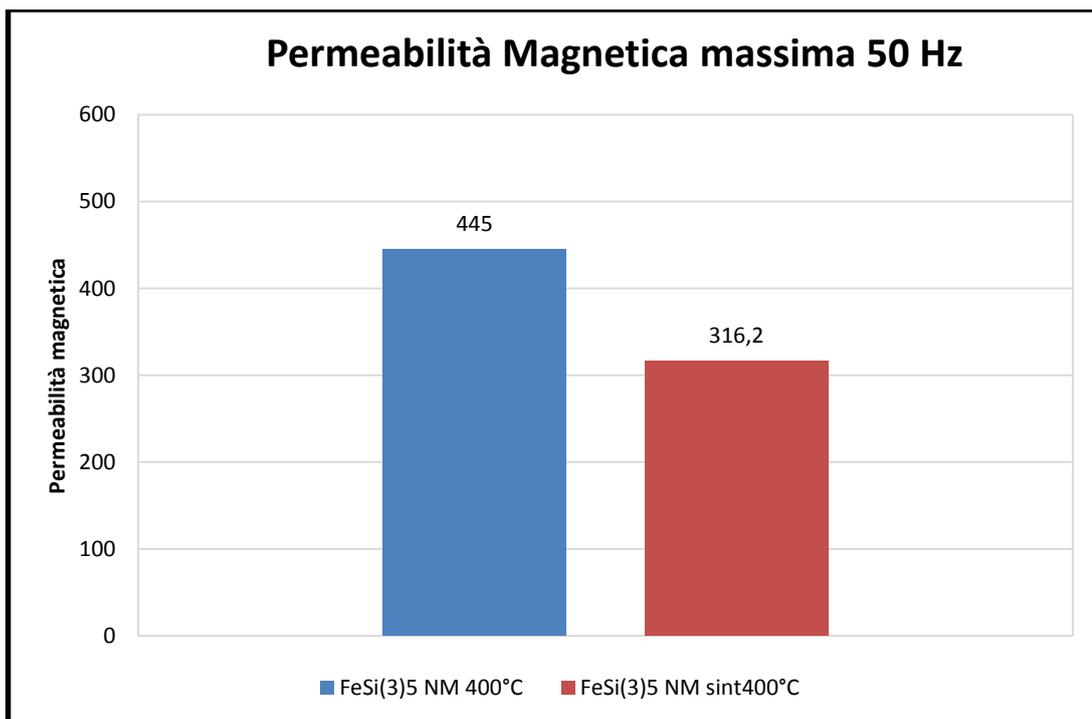


Figura 6-95: Permeabilità magnetica massima 50Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio

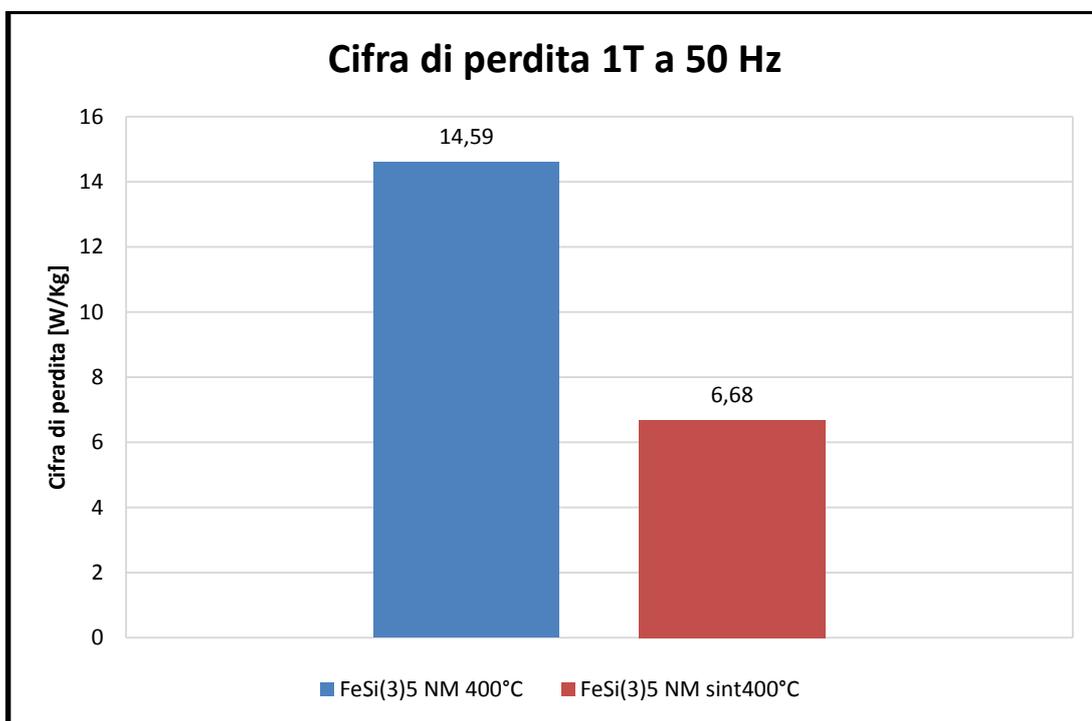
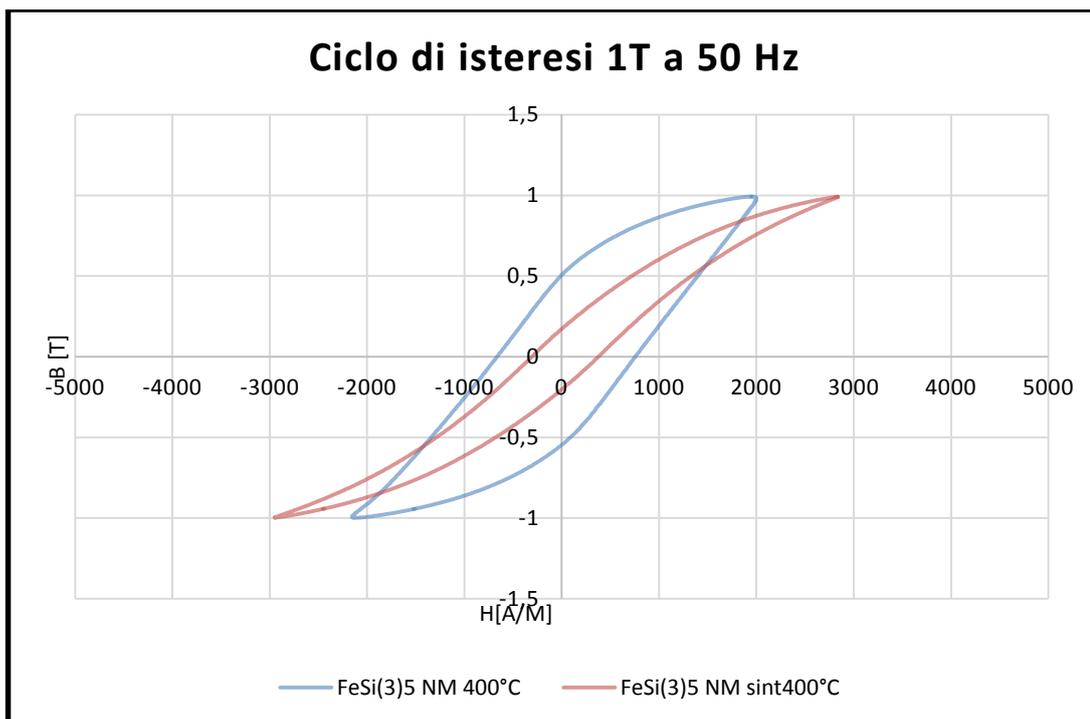


Figura 6-96: Cifra di perdita ad 1T 50Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio



*Figura 6-97: Ciclo di isteresi ad 1T 50Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio*

Alla frequenza di 200Hz, il trattamento in aria mostra un crollo rispetto al trattamento in vuoto delle grandezze magnetiche. Ora le caratteristiche sono molto simili, ma questo è il risultato di una diminuzione sostanziale della permeabilità massima del campione trattato in aria, mentre il campione trattato in vuoto mantiene delle permeabilità pressoché identiche a quelle viste a 50Hz. Per quanto riguarda la cifra di perdita ed il ciclo di isteresi, si nota come il trattamento in aria presenti delle perdite molto maggiori.

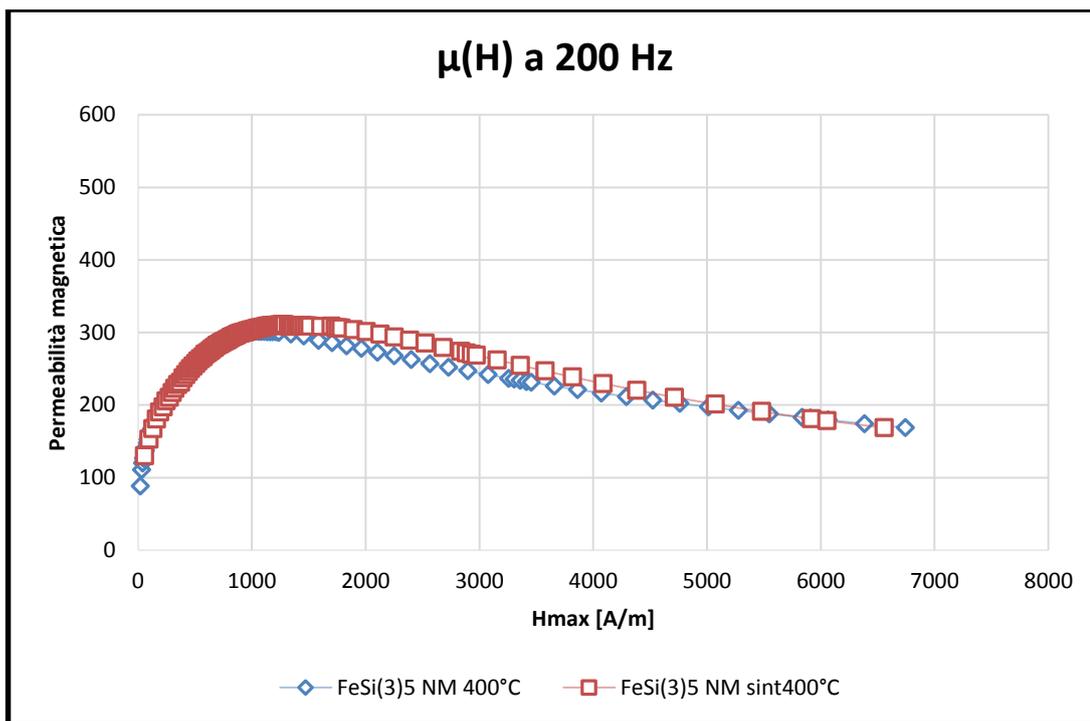


Figura 6-98: Permeabilità magnetica 200Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio

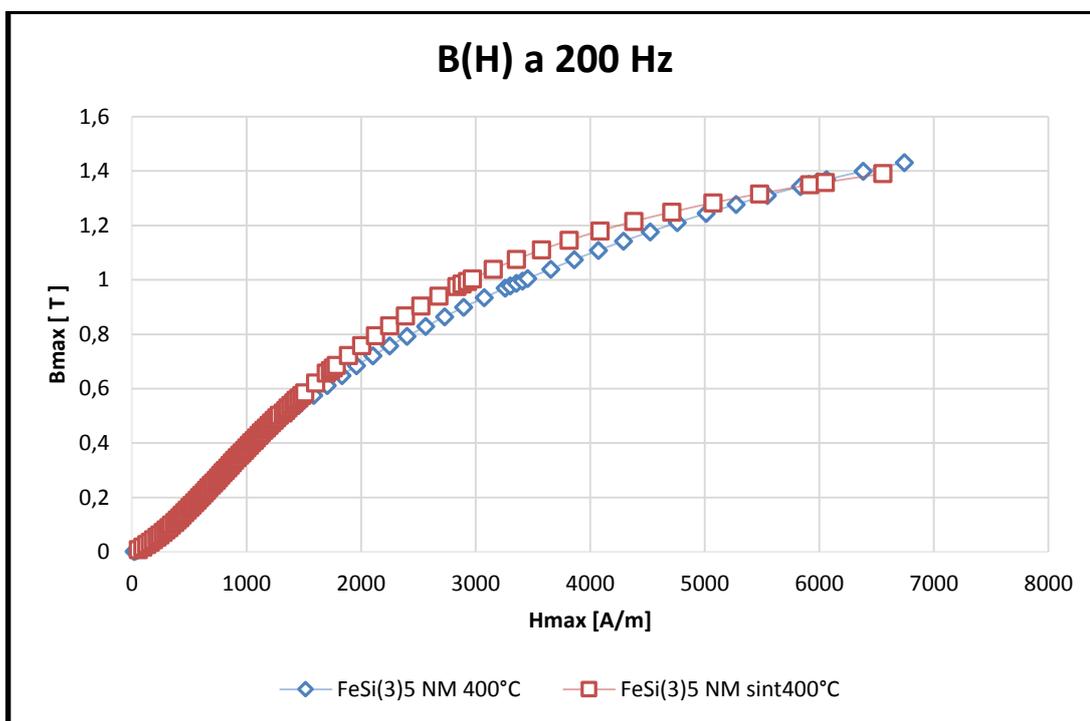


Figura 6-99: Induzione magnetica 200Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio

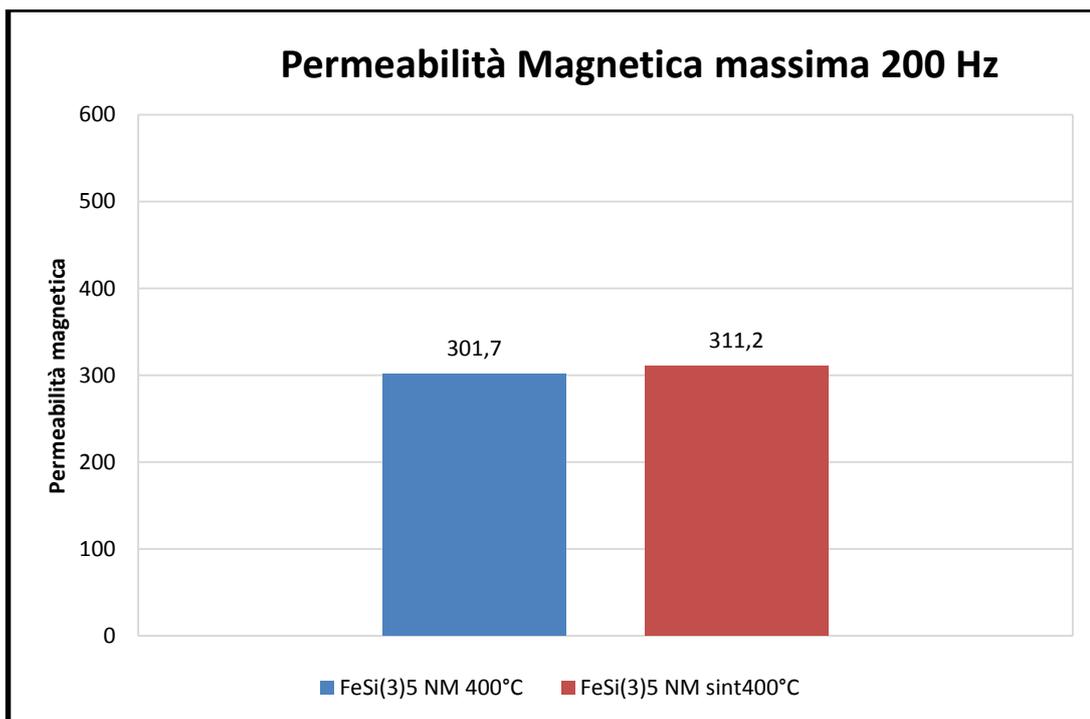


Figura 6-100: Permeabilità magnetica massima 200Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio

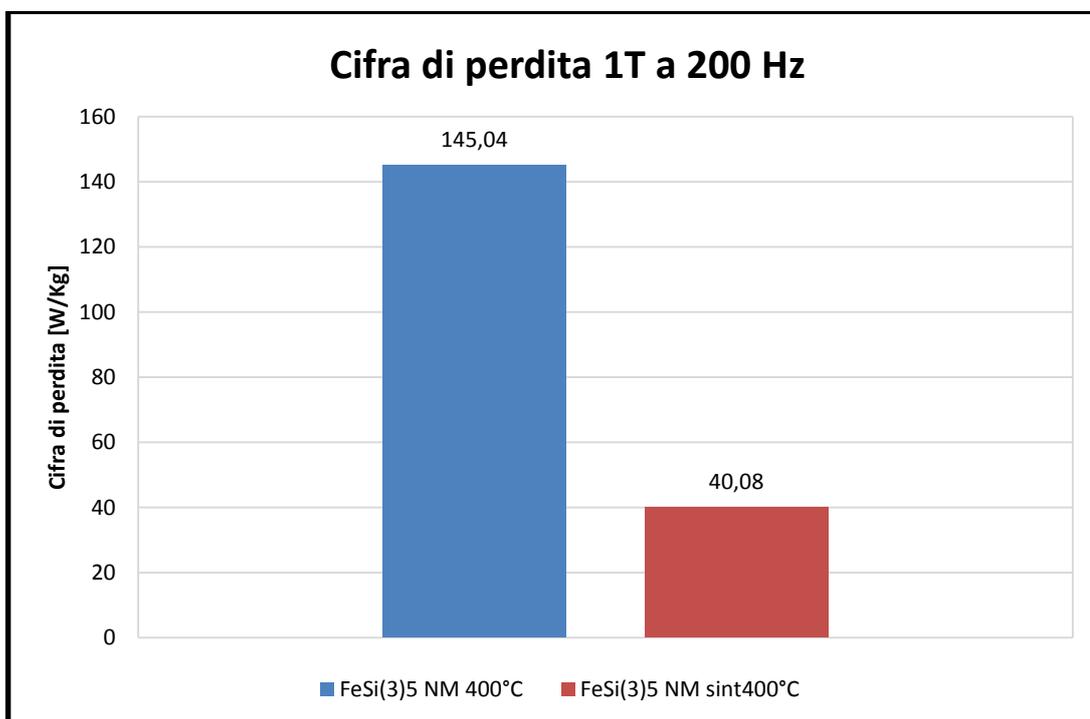
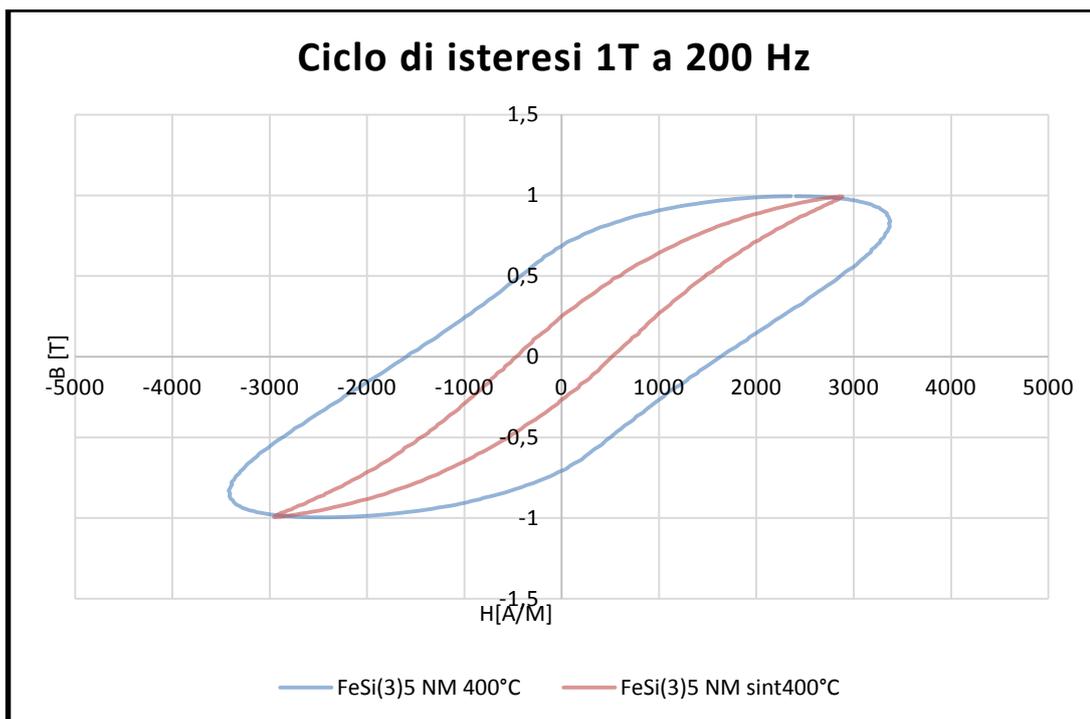


Figura 6-101: Cifra di perdita ad 1T 200Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio



*Figura 6-102: Cifra di perdita ad 1T 200Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio*

Alla frequenza di 500Hz le caratteristiche magnetiche del campione trattato in aria sono decisamente peggiori del campione trattato in vuoto. La cifre di perdita diventano inaccettabili per il campione trattato in aria, ed il ciclo di isteresi mostra come non abbia più proprietà da SMC.

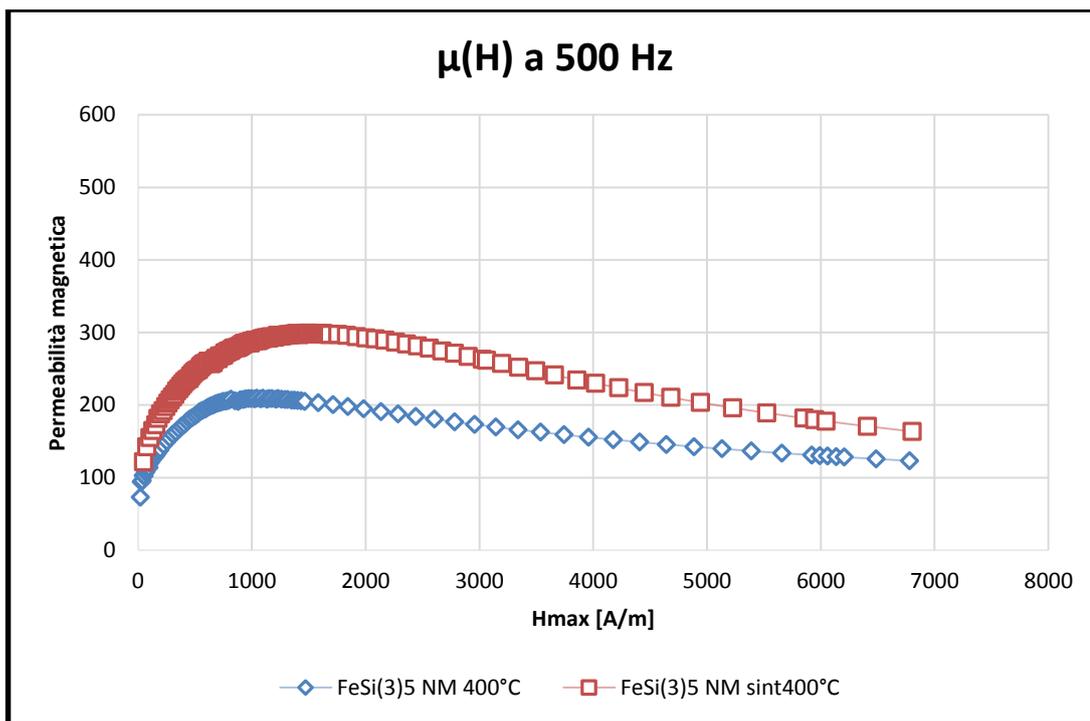


Figura 6-103: Permeabilità magnetica 500Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio

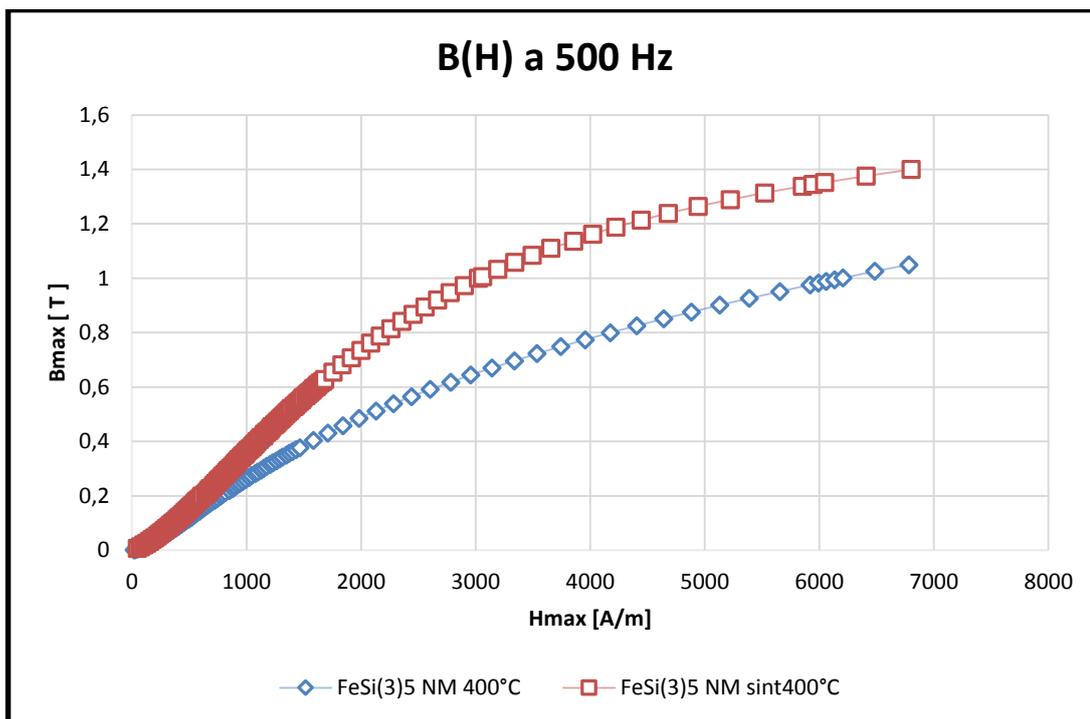


Figura 6-104: Induzione magnetica 500Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio

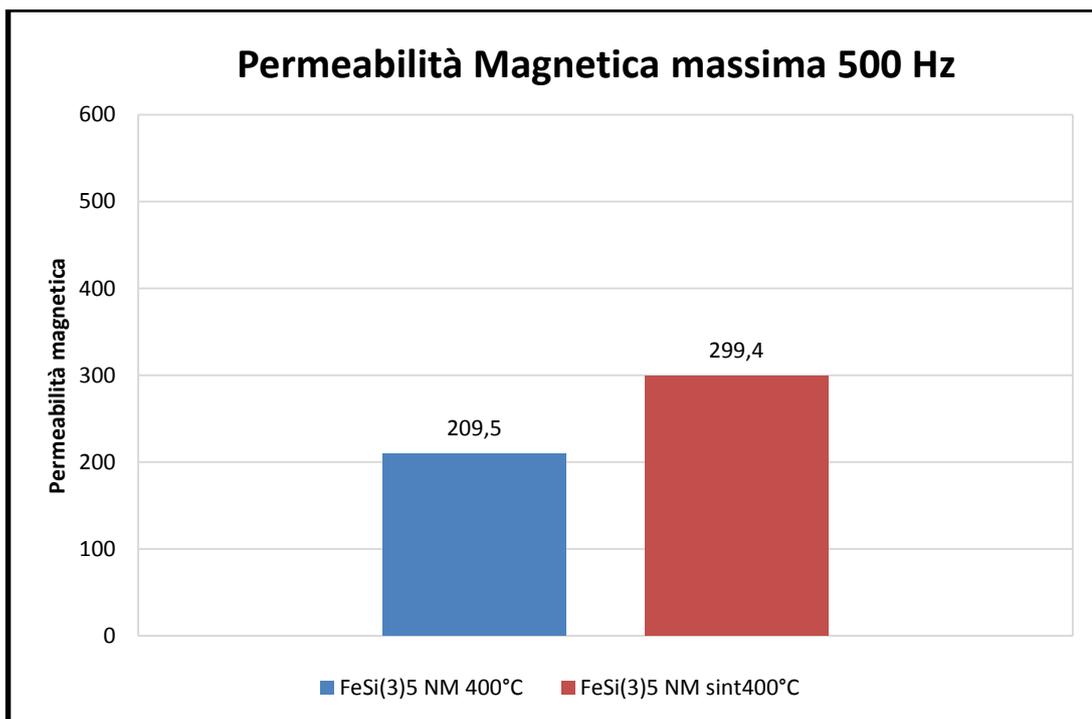


Figura 6-105: Permeabilità magnetica massima 500Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio

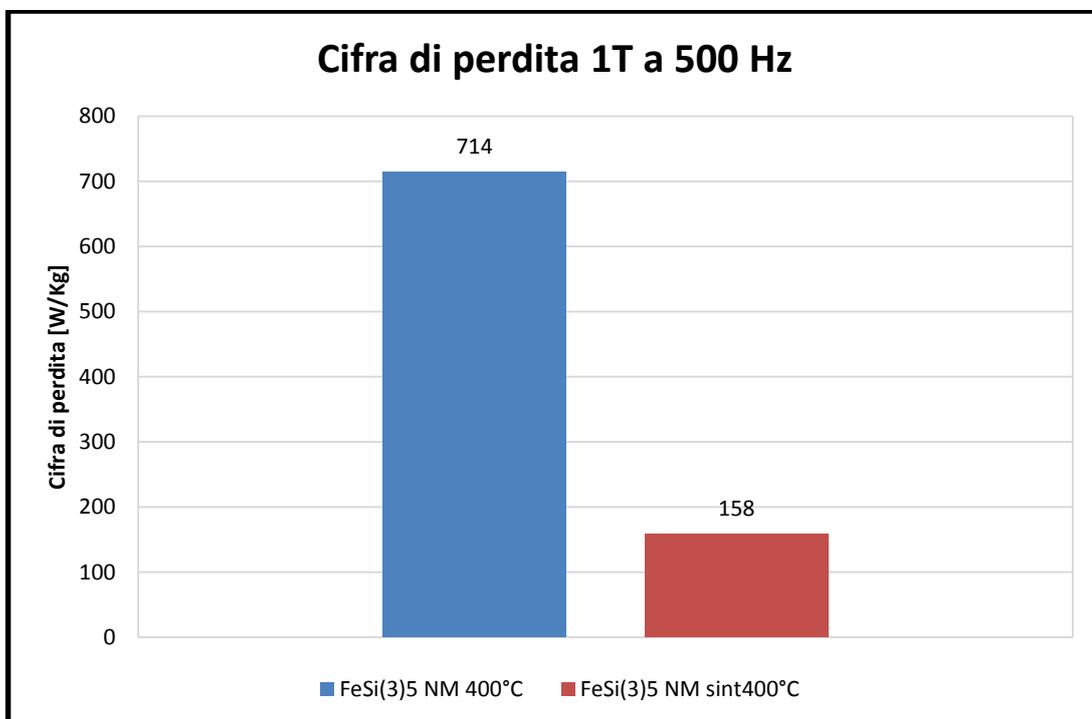
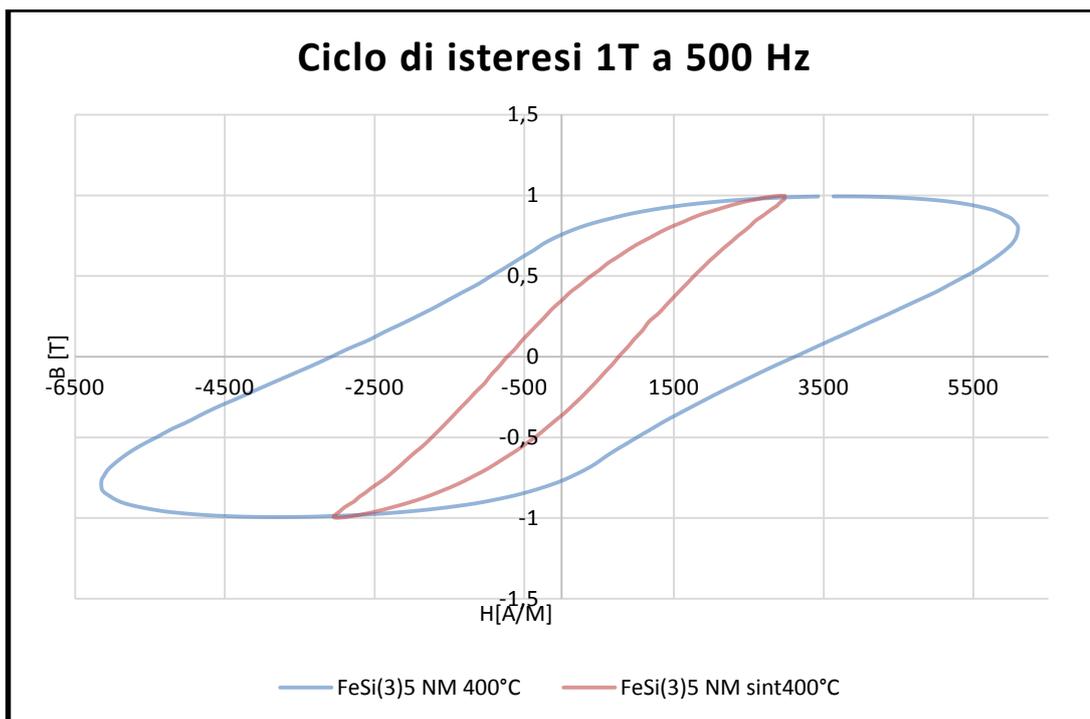


Figura 6-106: Cifra di perdita ad 1T 500Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio



*Figura 6-107: Ciclo di isteresi ad 1T 500Hz confronto trattamenti aria e vuoto, campione allo 0.5% in peso di silicio*

Il campione allo 0,5% in peso di silicio, trattato in vuoto a 400°C presenta dei risultati accettabili a differenza di quanto visto per il campione allo 0,1%. All'aumentare della frequenza mostra delle caratteristiche magnetiche che peggiorano di poco, con perdite che non aumentano eccessivamente. In conclusione, si può affermare che il campione allo 0,5% in peso di silicio si presta bene ad un trattamento in vuoto a 400°C, con valori di permeabilità e cifra di perdita che fino ai 200Hz sono più che accettabili.

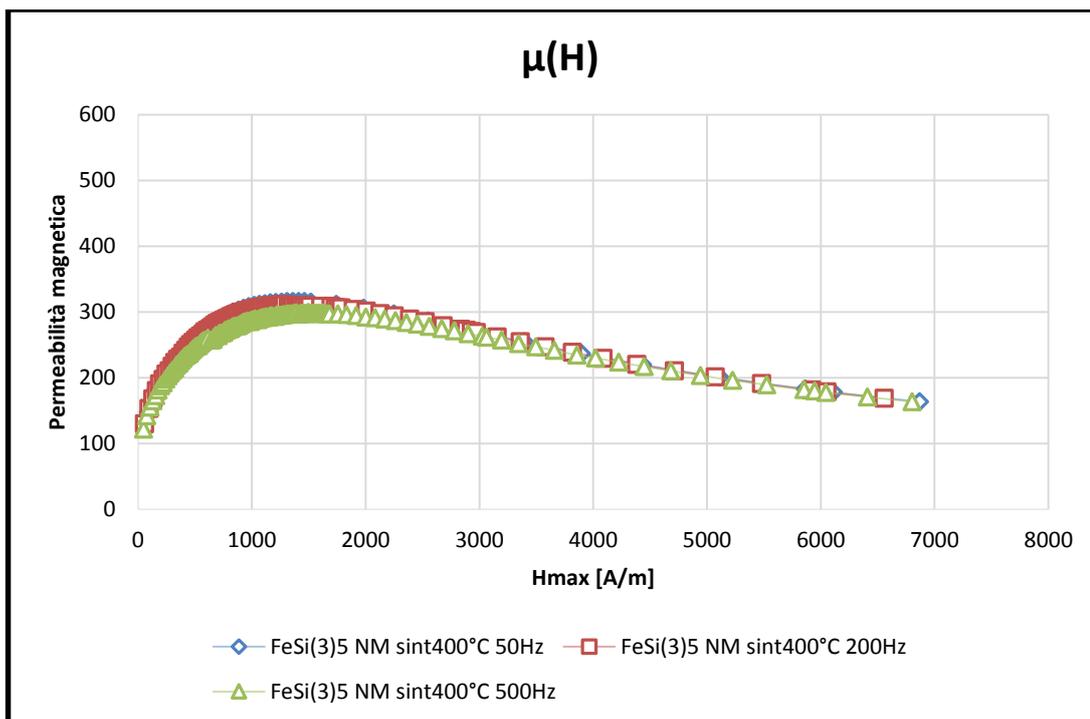


Figura 6-108: Permeabilità magnetica a diverse frequenze, campione allo 0.5% di silicio trattato in vuoto

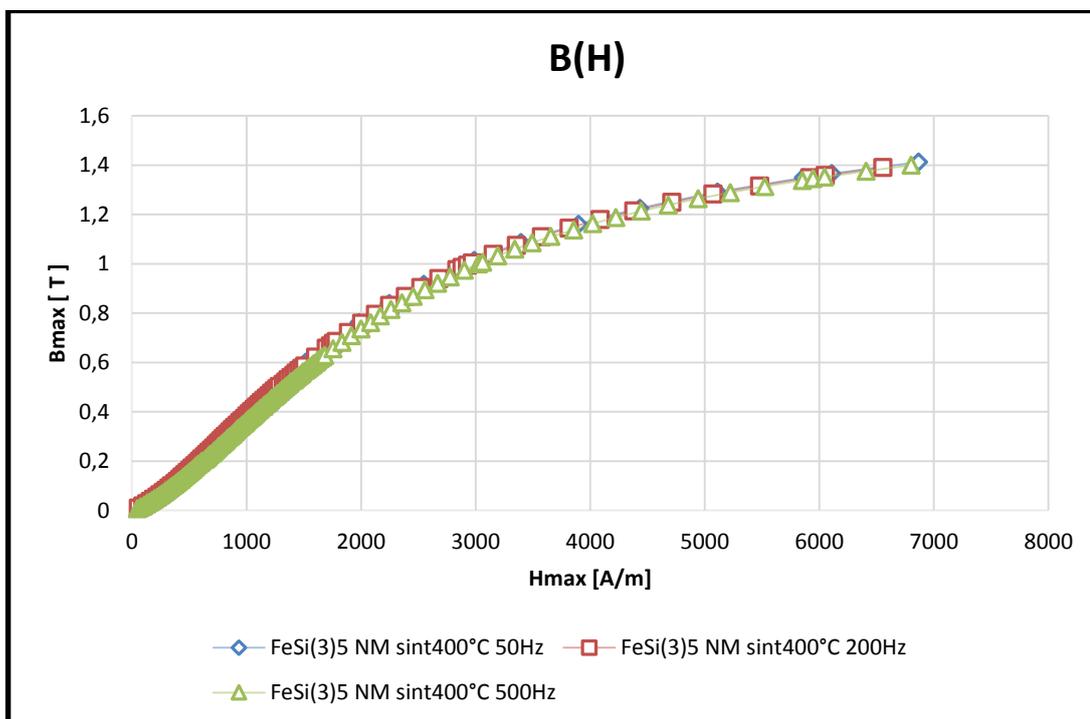


Figura 6-109: Induzione magnetica a diverse frequenze, campione allo 0.5% di silicio trattato in vuoto

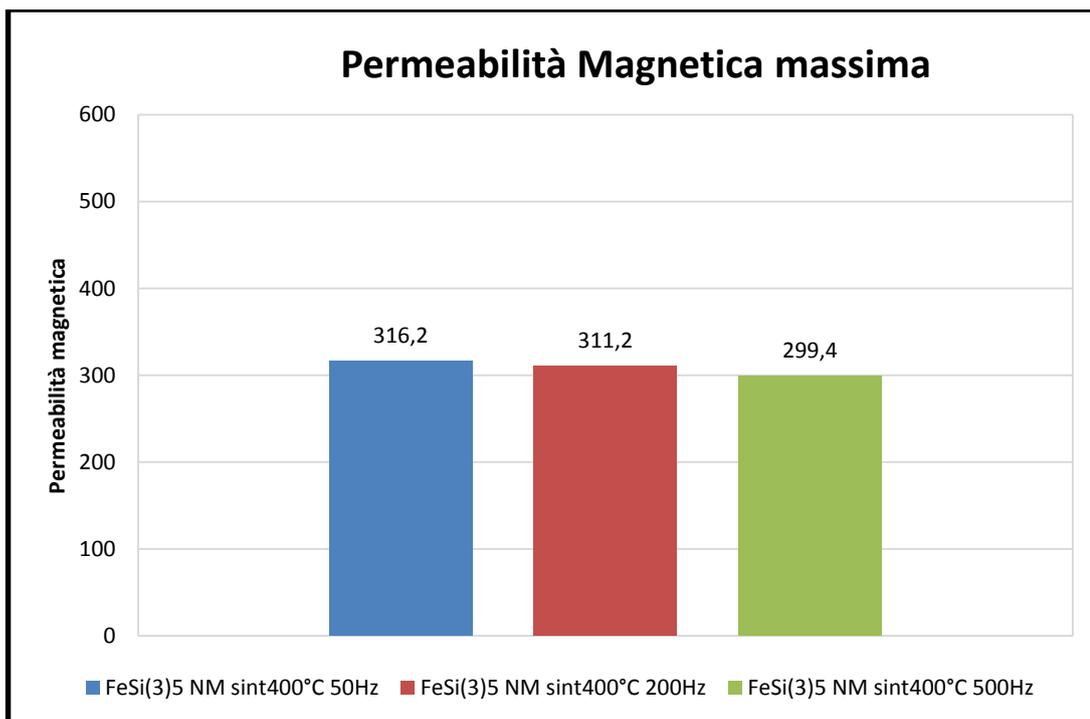


Figura 6-110: Istogramma permeabilità magnetica massima a diverse frequenze, campione allo 0.5% di silicio trattato in vuoto

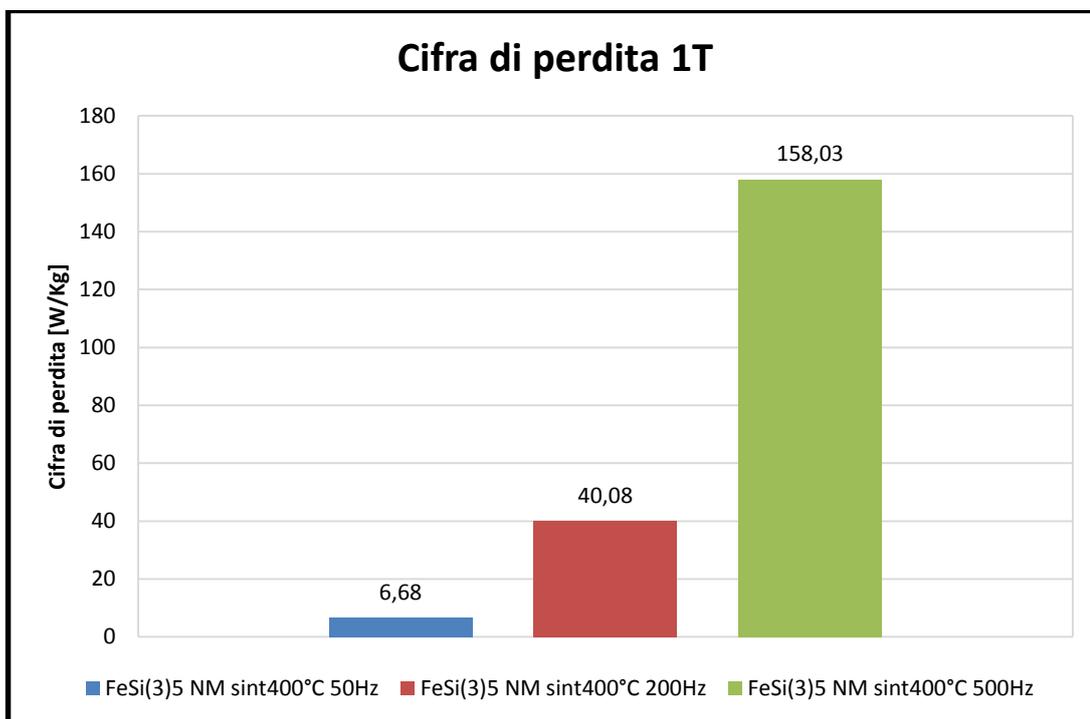


Figura 6-111: Cifra di perdita ad 1T a diverse frequenze, campione allo 0.5% di silicio trattato in vuoto

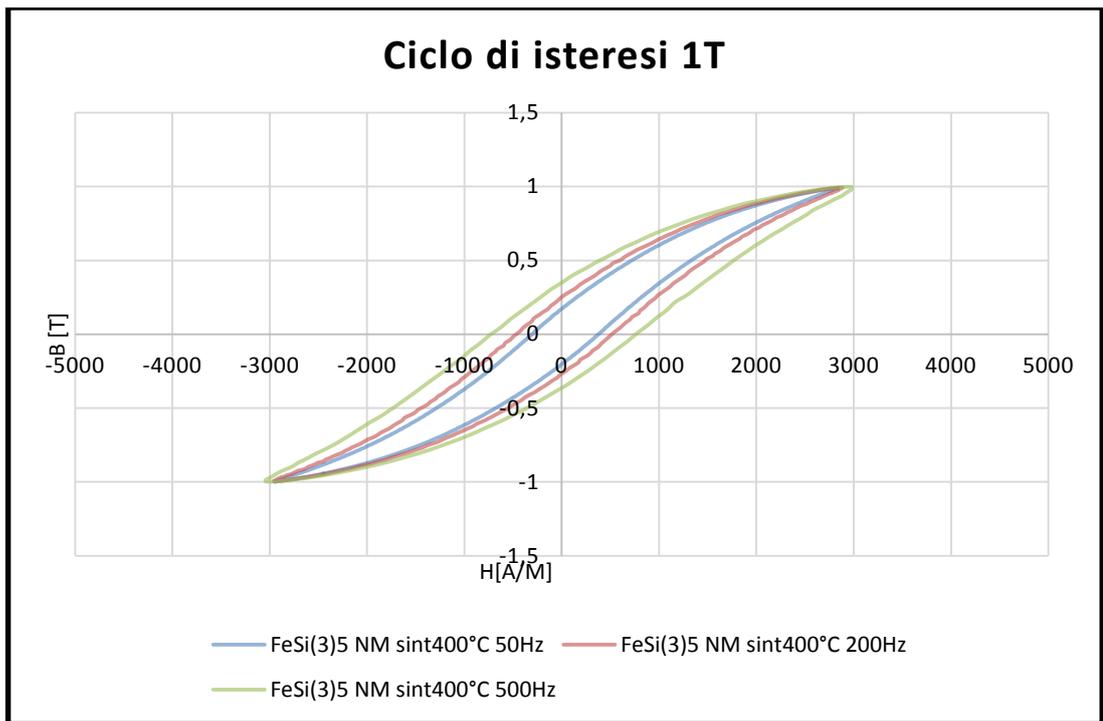


Figura 6-112: Ciclo di isteresi ad 1T a diverse frequenze, campione allo 0.5% di silicio trattato in vuoto

## 6.5 TOROIDI

Nella parte finale dell'attività di tesi, si è preparata una ulteriore miscela del campione che aveva presentato i risultati migliori dopo il trattamento termico, compattando le polveri a forma di dischetto e fresando successivamente per ottenere un toroide, ed avere dei dati da paragonare con le prove effettuate con SST. Il materiale che ha riscontrato i migliori risultati è il campione realizzato allo 0,5% in peso di silicio con miscelazione standard, trattato in vuoto a 400°C.

In ordine, per il provino non trattato e con trattamento, vengono presentate:

- curva permeabilità magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- curva induzione magnetica in funzione del campo magnetico applicato
- istogramma permeabilità massima
- istogramma cifra di perdita ad 1 T
- ciclo di isteresi ad 1 T

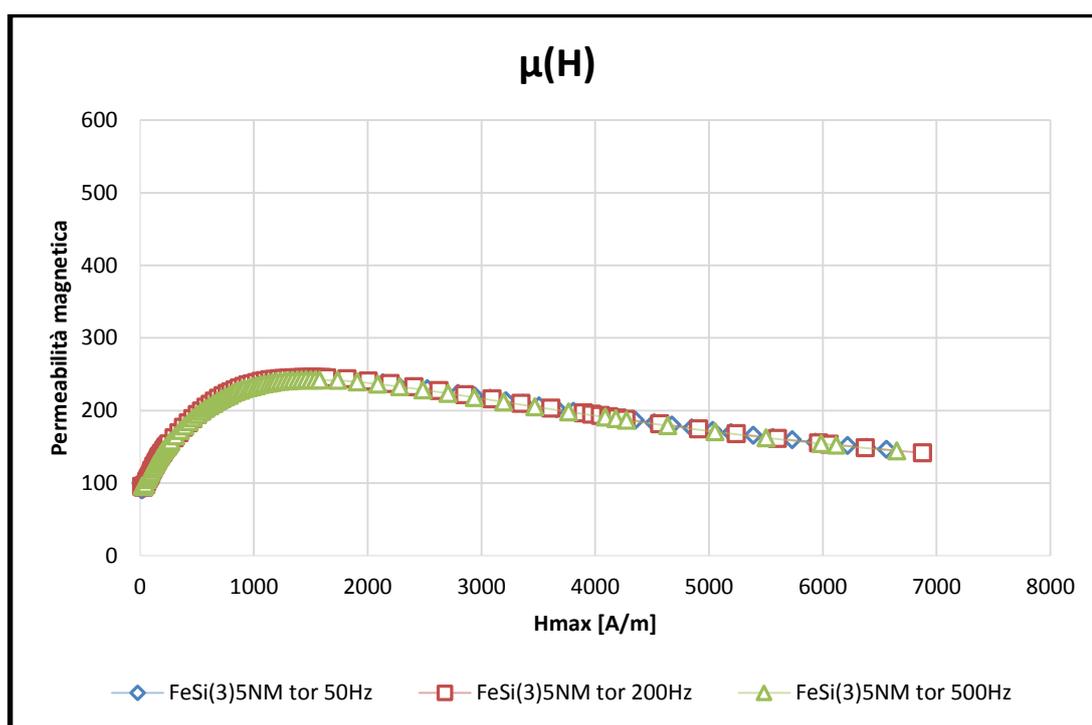


Figura 6-113: Permeabilità magnetica a diverse frequenze per toroide non trattato

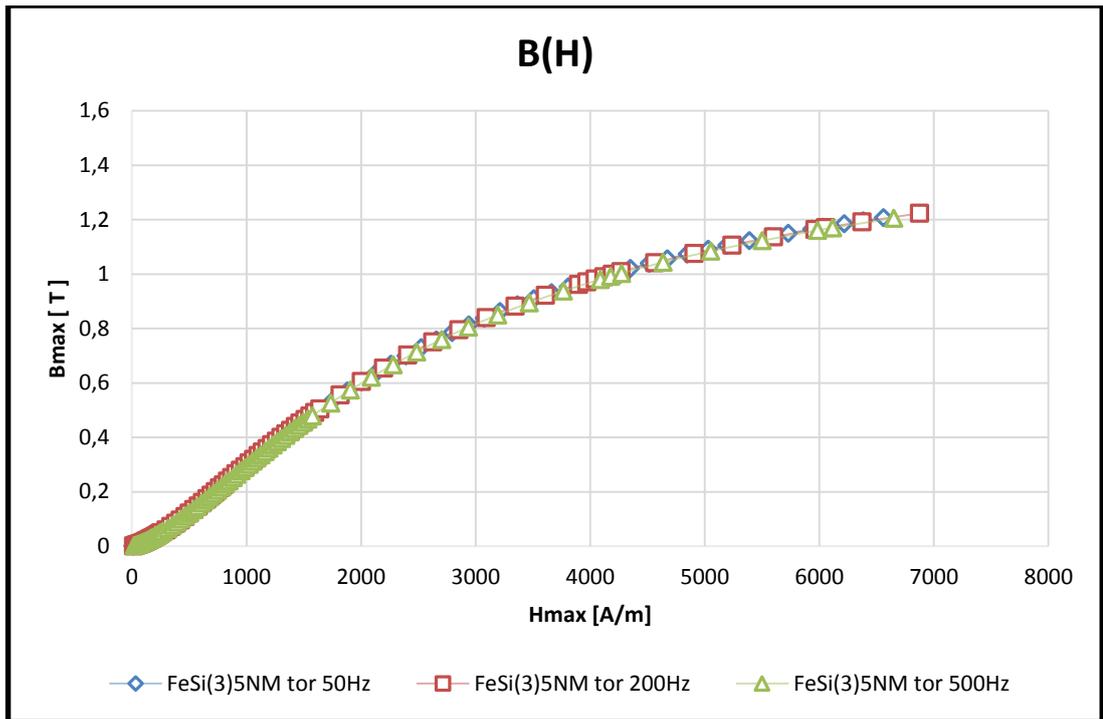


Figura 6-114: Induzione magnetica a diverse frequenze per toroide non trattato

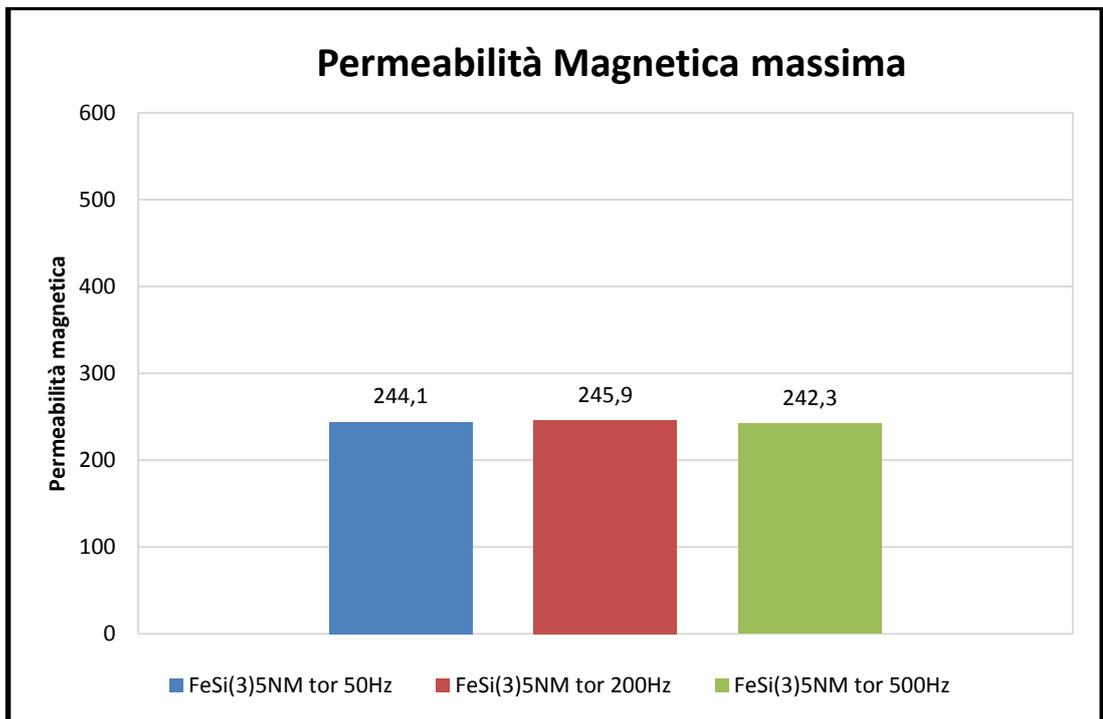


Figura 6-115: Permeabilità magnetica massima a diverse frequenze per toroide non trattato

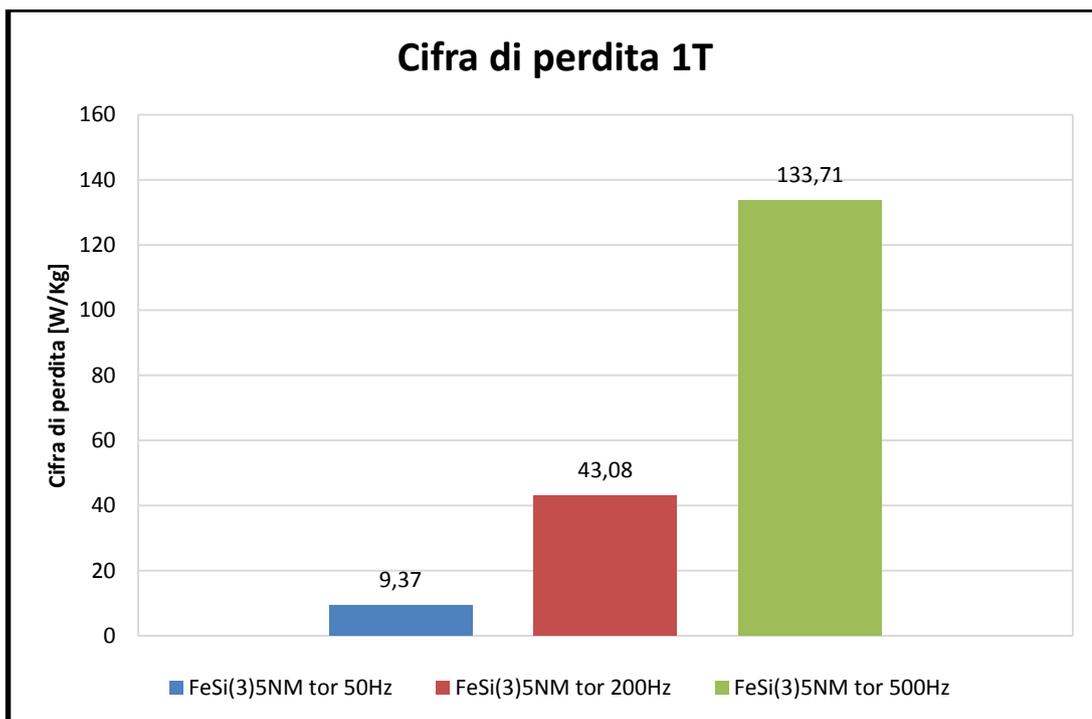


Figura 6-116: Cifra di perdita ad 1T a diverse frequenze per toroide non trattato

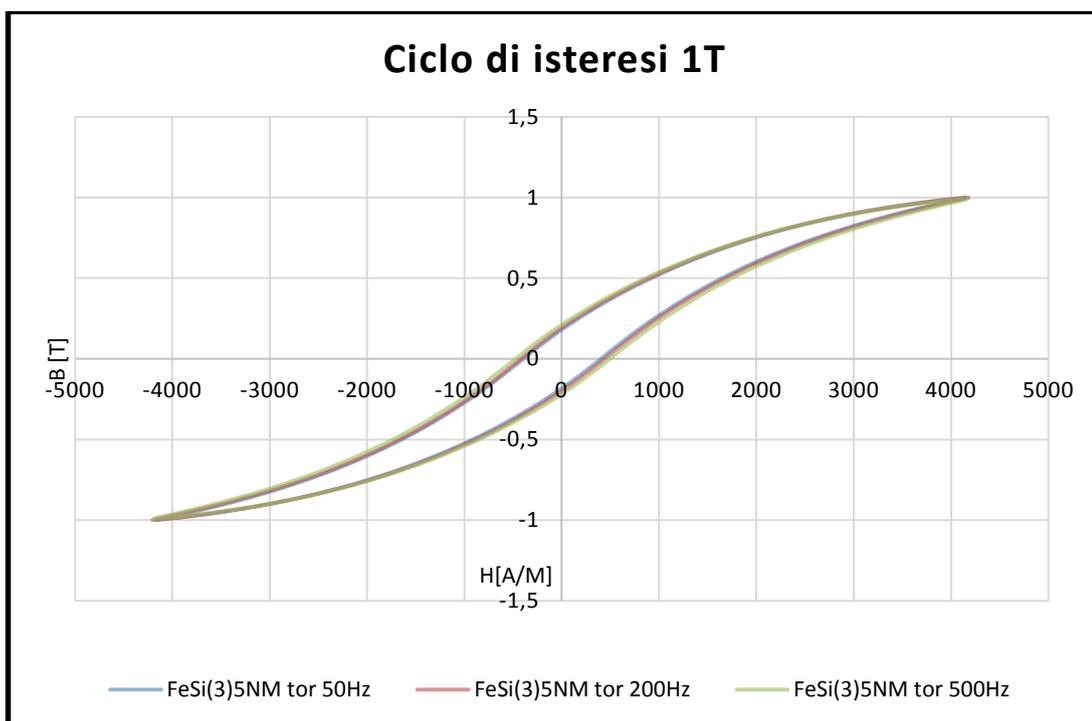


Figura 6-117: Ciclo di isteresi ad 1T a diverse frequenze per toroide non trattato

**Campione trattato termicamente a 400°C in vuoto**

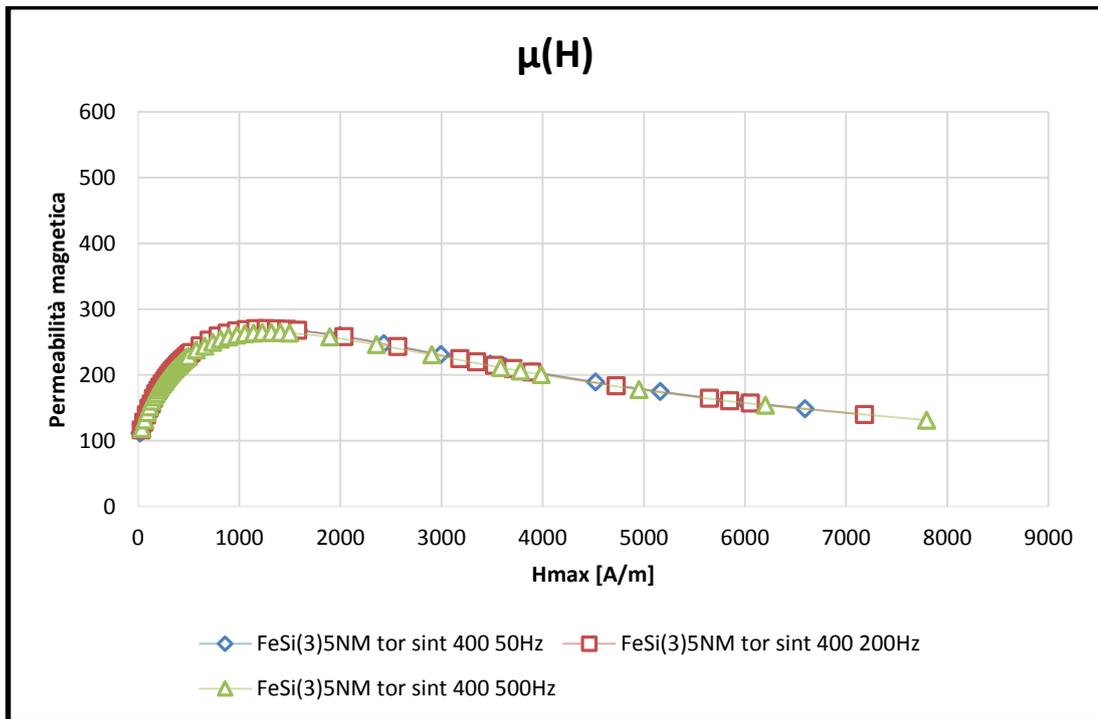


Figura 6-118: Permeabilità magnetica a diverse frequenze per toroide trattato in vuoto a 400°C

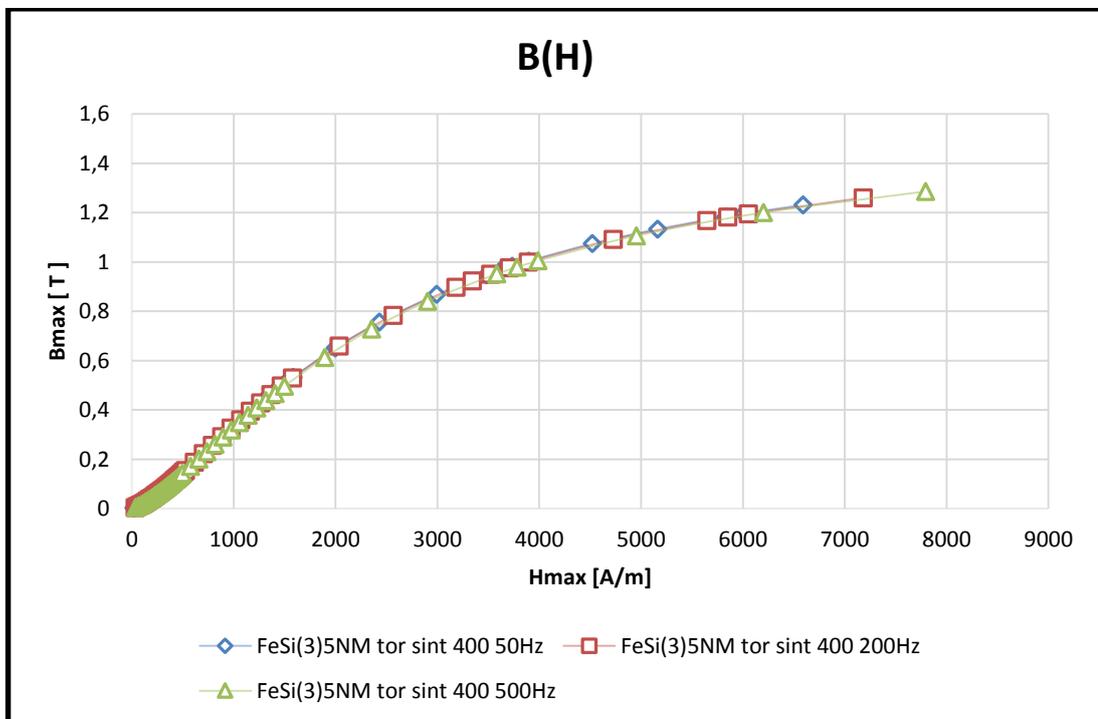


Figura 6-119: Induzione magnetica a diverse frequenze per toroide trattato in vuoto a 400°C

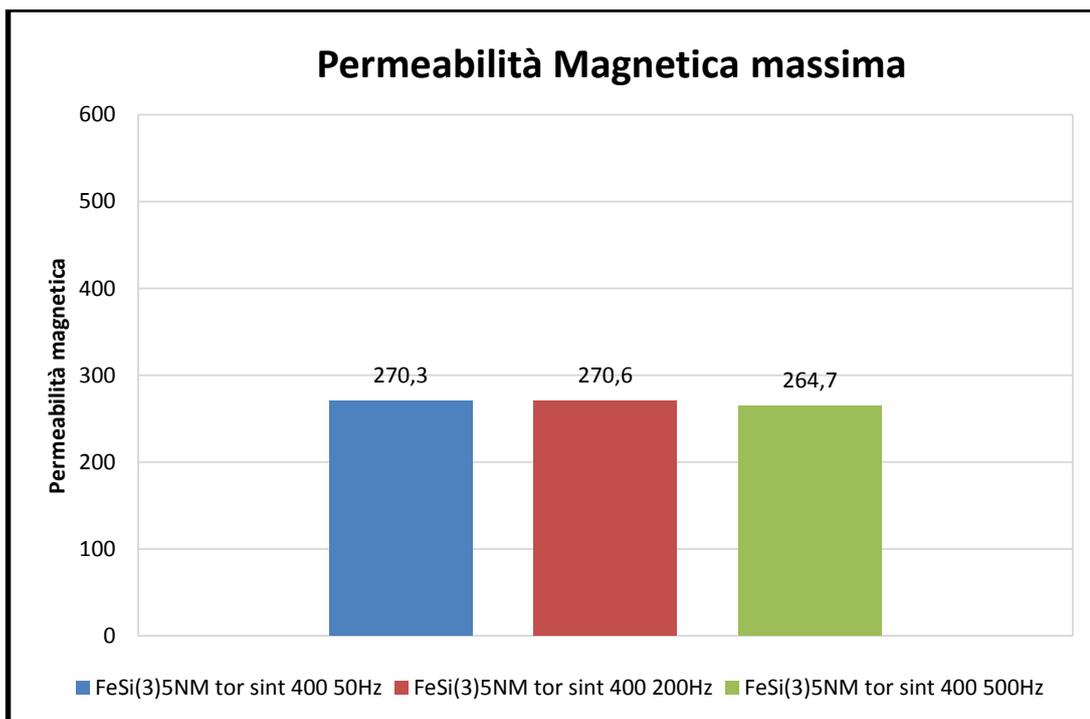


Figura 6-120: Istogramma permeabilità magnetica massima a diverse frequenze per toroide trattato in vuoto a 400°C

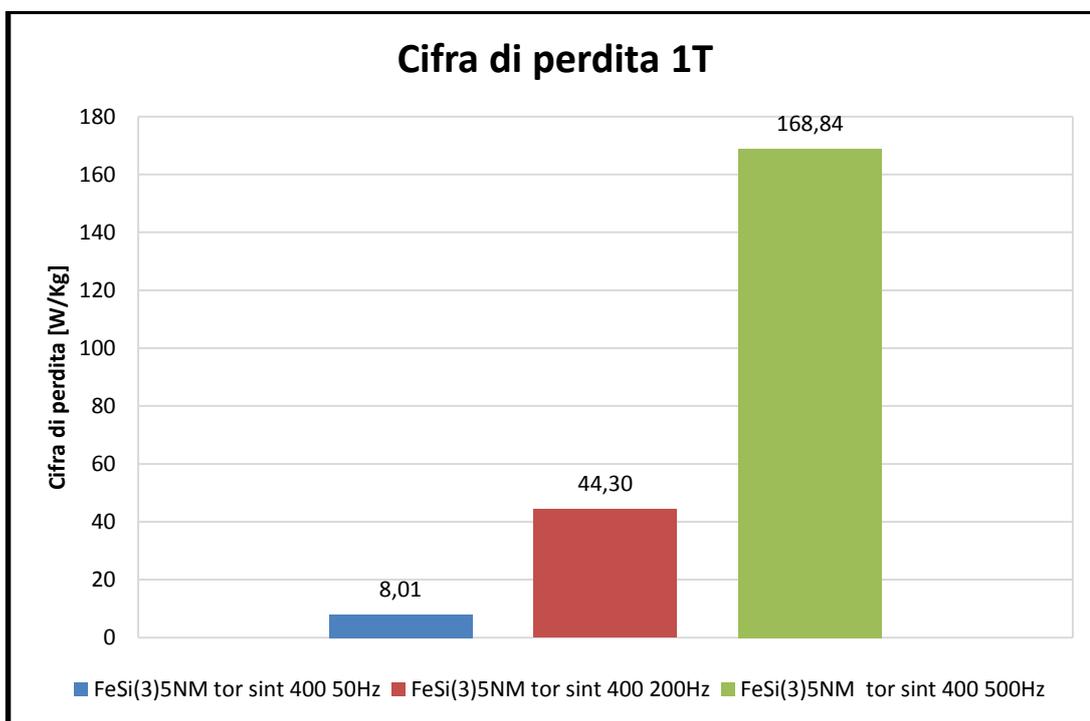
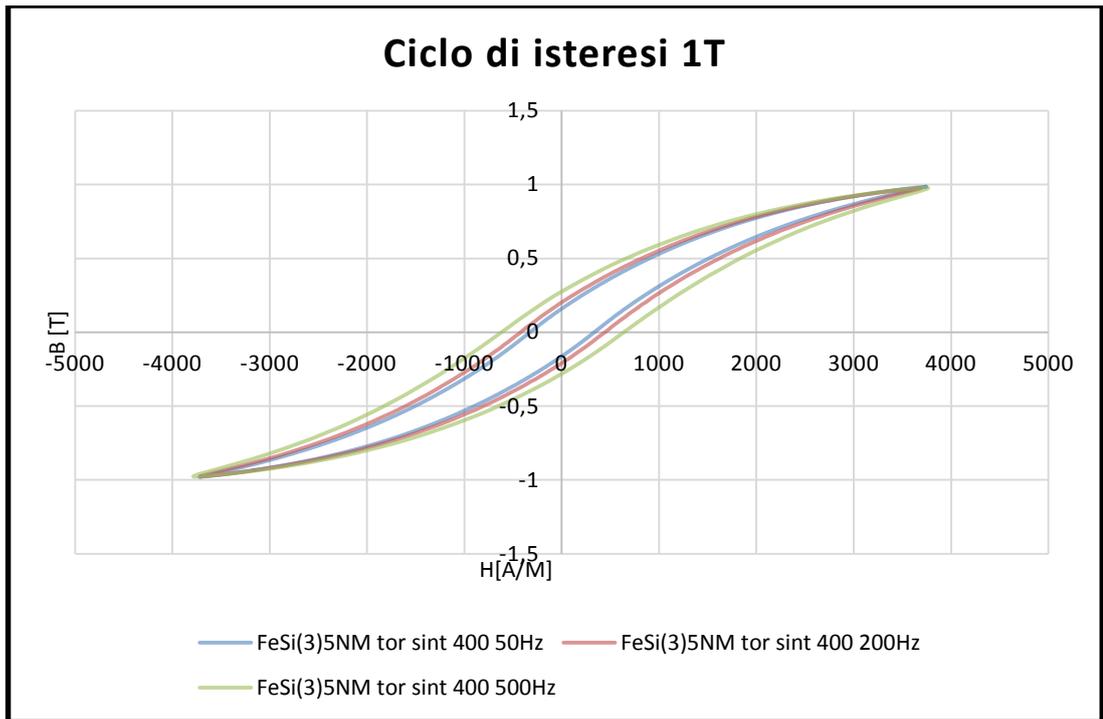


Figura 6-121: Cifra di perdita ad 1T a diverse frequenze per toroide trattato in vuoto a 400°C



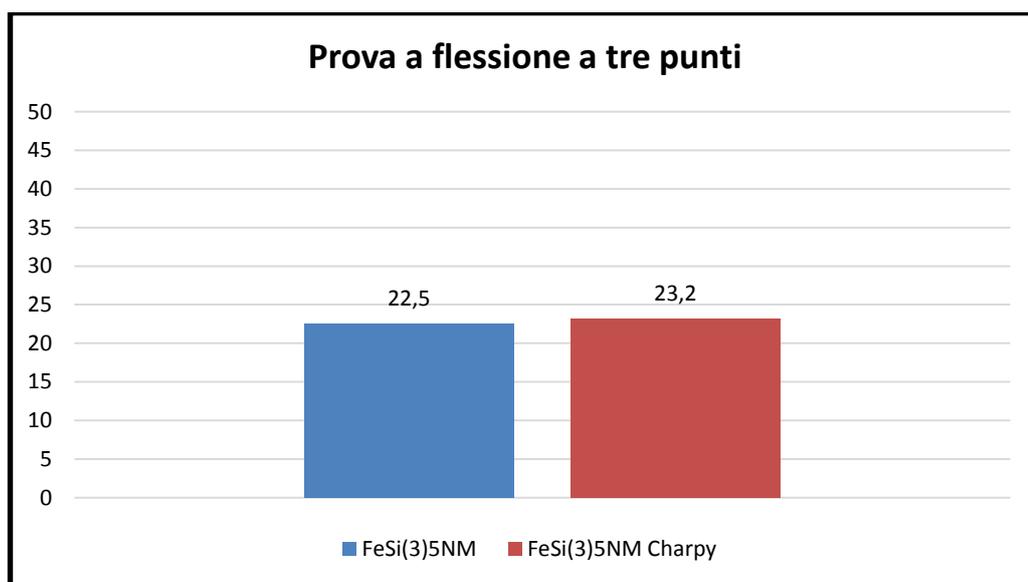
*Figura 6-122: Ciclo di isteresi ad 1T a diverse frequenze per toroide trattato in vuoto a 400°C*

## 6.6 PROVE MECCANICHE

Si presentano adesso i risultati ottenuti dalle prove meccaniche effettuate. Per quanto riguarda il campione allo 0,5% in peso di silicio ottenuto con miscelazione standard, oltre a realizzare un toroide, sono stati realizzati anche due ulteriori campioni parallelepipedi di sezione quadrata (tipico campione Charpy) trattati a 400°C in vuoto, per effettuare appunto le prove meccaniche.

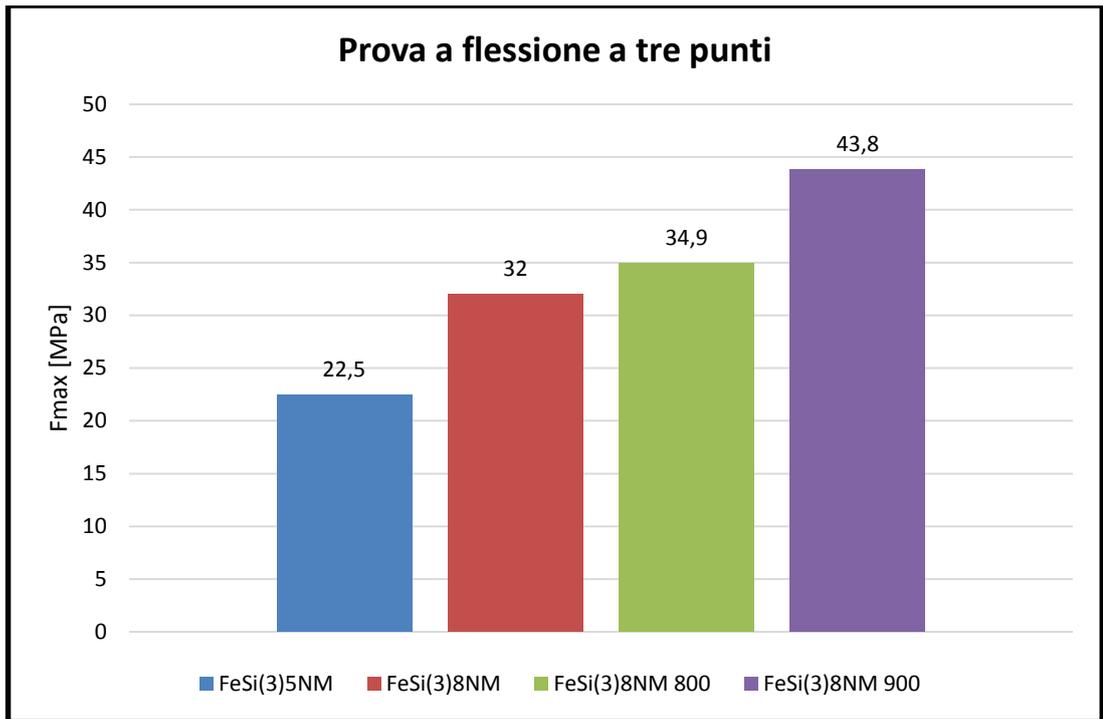
Il campione presenta statisticamente un valore di forza massima di 23,2MPa, risultando essere dunque ancora troppo fragile dopo trattamento a 400°C.

Le stesse prove sono state effettuate su campioni a forma parallelepipedica a sezione rettangolare (stessi campioni usati nel SST), per avere informazioni se su tali campioni si potesse ricavare dei dati significativi senza dover obbligatoriamente stampare gli ulteriori campioni solo a quello scopo. Come si può vedere dall'istogramma successivo, effettivamente i risultati non si discostano molto.



Oltre alle prove sui campioni allo 0,5% in peso di silicio, sono stati fatte delle prove anche su dei campioni allo 0,2% ottenuti con pressature differenti.

I valori vengono mostrati tramite un istogramma. All'aumentare della pressione di compattazione, la meccanica migliora di molto, anche se ancora si mantiene su valori decisamente bassi rispetto ai valori che si vorrebbero raggiungere. Inoltre si nota come all'aumentare della percentuale di silicio, il campione perda tali proprietà meccaniche.



*Figura 6-123: Istogramma prova a flessione a tre punti*

## 6.7 CONFRONTO RESISTIVITÀ ELETTRICHE

In questo capitolo vengono riportati i confronti tra le resistività elettriche ottenute dalle misure effettuate.

Con riferimento al **confronto tra i silicio utilizzati**, il campione preparato con silicio3 presenta una resistività maggiore, che giustifica il fatto di avere permeabilità minori. Questo è dovuto alla minore presenza di impurità del silicio3 (9N) rispetto al silicio1(4N)

Campioni al verde	Resistività [ $\mu\Omega\cdot m$ ]
FeSi5NM	41,05
FeSi(3)5NM	49,30

Tabella 4: Confronto resistività silicio utilizzato, campioni ottenuti con miscelazione standard

Campioni al verde	Resistività [ $\mu\Omega\cdot m$ ]
FeSi5HyALL	20,52
FeSi(3)5Hy ALL	21,27

Tabella 5: Confronto resistività silicio utilizzato, campioni ottenuti con ibridizzazione

Campioni al verde	Resistività [ $\mu\Omega\cdot m$ ]
FeSi5Hy	36,95
FeSi(3)5Hy II	58,66

Tabella 6: Confronto resistività silicio utilizzato, campioni ottenuti con ibridizzazione + miscelazione standard

Dal **confronto tra i tre processi di miscelazione**, si nota come il campione ibridizzato possieda il peggiore isolamento, mentre il campione ottenuto con ibridizzazione + miscelazione standard il migliore. Probabilmente la polvere di ferro S3 nell'ibridizzato crea contatto elettrico tra le polveri di granulometria maggiore, aumentando quindi la conducibilità del campione e di conseguenza la quota di perdita attribuibile a correnti parassite, mentre nel campione ottenuto con ibridizzazione + miscelazione standard, l'assenza di questo contatto ed il rivestimento completo dei grani di ferro S1 ed S2 con silicio porta ad un maggiore isolamento e conseguentemente una maggiore quota di perdita dovuta alle perdite eccedenti.

Campioni al verde	Resistività [ $\mu\Omega\cdot m$ ]
FeSi(3)5Nm	49,30
FeSi(3)5Hy ALL	21,27
FeSi(3)5Hy	58,66

Tabella 7: Confronto resistività con i tre processi utilizzati

Confrontando i **campioni ottenuti con miscelazione standard con quattro diverse percentuali di silicio**, si nota come ad una maggiore quantità di quest'ultimo la resistività del materiale aumenti. Come accennato precedentemente il valore di resistività del campione allo 0.2% è anomalo, ciò valorizza l'ipotesi di una errata quantità di silicio miscelata nel composto.

Campioni al verde	Resistività [ $\mu\Omega\cdot m$ ]
FeSi(3)3Nm	52,25
FeSi(3)5Nm	49,30
FeSi(3)8Nm	20,38
FeSi(3)9Nm	30,10

Tabella 8: Confronto resistività a diverse percentuali di silicio, campioni ottenuti con miscelazione standard

Analizzando il **confronto tra le diverse pressature**, si nota come al crescere della pressione esercitata la resistività diminuisca, tuttavia questo non porta ad un peggioramento delle perdite, ma ad un miglioramento. Questo probabilmente è imputabile con una diminuzione del contributo fornito dalle perdite eccedenti.

Campioni al verde	Resistività [ $\mu\Omega\cdot m$ ]
FeSi(3)9Nm (700MPa)	30,10
FeSi(3)9Nm (800MPa)	28,12
FeSi(3)9Nm (900MPa)	22,24

Tabella 9: Confronto resistività a diverse pressioni di compattazione, campioni allo 0,1% di silicio ottenuti con miscelazione standard

**Confrontando i due ambienti di trattamento termico**, in entrambi i casi si nota una diminuzione della resistività, ma che risulta essere maggiore nei campioni trattati in aria a causa della formazione di ossidi.

Ambiente di trattamento	Campione trattato	Resistività [ $\mu\Omega \cdot m$ ]
<b>Vuoto 400°C</b>	<b>FeSi(3)9Nm</b>	1,58
<b>Aria 400°C</b>	<b>FeSi(3)9Nm</b>	0,41

*Tabella 10: Confronto resistività in diverso ambiente di trattamento termico, campioni allo 0,1% di silicio ottenuti con miscelazione standard*

Ambiente di trattamento	Campione trattato	Resistività [ $\mu\Omega \cdot m$ ]
<b>Vuoto 400°C</b>	<b>FeSi(3)5Nm</b>	11,76
<b>Aria 400°C</b>	<b>FeSi(3)5Nm</b>	0,43

*Tabella 11: Confronto resistività in diverso ambiente di trattamento termico, campioni allo 0,5% di silicio ottenuti con miscelazione standard*

## 6.8 CONFRONTO CAMPO COERCITIVO

In questo capitolo vengono riportati i confronti tra i campi coercitivi dei campioni realizzati. Per quanto riguarda il **confronto tra i silicio utilizzati**, il grado di purezza incide in maniera evidente sul valore di  $H_c$  e quindi sulle perdite per isteresi nei campioni preparati con silicio 3 che risulta infatti essere di minore entità rispetto i campioni preparati con silicio 1.

Campioni al verde	$H_c$ [A/m]
FeSi5NM	428
FeSi(3)5NM	397

Tabella 12: Confronto campo coercitivo silicio utilizzato, campioni ottenuti con miscelazione standard

Campioni al verde	$H_c$ [A/m]
FeSi5HyALL	441
FeSi(3)5Hy ALL	428

Tabella 13: Confronto campo coercitivo silicio utilizzato, campioni ottenuti con ibridizzazione

Campioni al verde	$H_c$ [A/m]
FeSi5Hy	465
FeSi(3)5Hy II	423

Tabella 14: Confronto campo coercitivo silicio utilizzato, campioni ottenuti con ibridizzazione + miscelazione standard

**Confrontando i processi**, il campione ottenuto con miscelazione standard presenta il valore minore di  $H_c$ , a cui consegue delle perdite minori per isteresi magnetica rispetto gli altri due metodi di rivestimento delle polveri.

Campioni al verde	$H_c$ [A/m]
FeSi(3)5Nm	397
FeSi(3)5Hy ALL	428
FeSi(3)5Hy	423

Tabella 15: Confronto campo coercitivo con i tre processi utilizzati

Il confronto tra le percentuali di silicio, non mostra invece una netta correlazione tra percentuale usata e valore di Hc ottenuto. Sembra che la percentuale influisca in modo minore sulle perdite per isteresi.

Campioni al verde	Hc [A/m]
FeSi(3)3Nm	396
FeSi(3)5Nm	397
FeSi(3)8Nm	384
FeSi(3)9Nm	384

Tabella 16: Confronto campo coercitivo a diverse percentuali di silicio, campioni ottenuti con miscelazione standard

Nel confronto tra le pressioni esercitate, si nota invece che all'aumentare della stessa i campioni presentano una diminuzione del valore di Hc.

Campioni al verde	Hc [A/m]
FeSi(3)9Nm (700MPa)	384
FeSi(3)9Nm (800MPa)	379
FeSi(3)9Nm (900MPa)	372

Tabella 17: Confronto campo coercitivo con diverse pressioni di compattazione, campioni allo 0,1% di silicio ottenuti con miscelazione standard

Confrontando gli ambienti di trattamento, nei campioni trattati in vuoto si assiste una diminuzione maggiore di Hc, quindi a dei cicli di isteresi più stretti alle basse frequenze.

Ambiente di trattamento	Campione trattato	Hc [A/m]
Vuoto 400°C	FeSi(3)9Nm	293
Aria 400°C	FeSi(3)9Nm	318

Tabella 18: Confronto campo coercitivo in diverso ambiente di trattamento termico, campioni allo 0,1% di silicio ottenuti con miscelazione standard

Ambiente di trattamento	Campione trattato	Hc [A/m]
Vuoto 400°C	FeSi(3)5Nm	296
Aria 400°C	FeSi(3)5Nm	356

Tabella 19: Confronto campo coercitivo in diverso ambiente di trattamento termico, campioni allo 0,5% di silicio ottenuti con miscelazione standard

## 7. CONCLUSIONI

L'attività svolta ha permesso di esplorare una grande quantità di miscele a base di ferro e silicio dove le variabili presentate sono state molte. In base a quanto argomentato nei precedenti capitoli si è potuto osservare come il silicio3 impatti in modo migliore sulla cifra di perdita rispetto al silicio1. In realtà, durante lo svolgimento della tesi, è stato utilizzato anche il silicio2, ma avendo pochi dati su di esso si è preferito fare un commento solo nelle conclusioni. Esso ha dato dei risultati inaspettatamente positivi rispetto al silicio1, dalla quale differenzia solo per granulometria ( $> 45\mu\text{m}$ ), ma che presenta comunque delle perdite maggiori rispetto al silicio3.

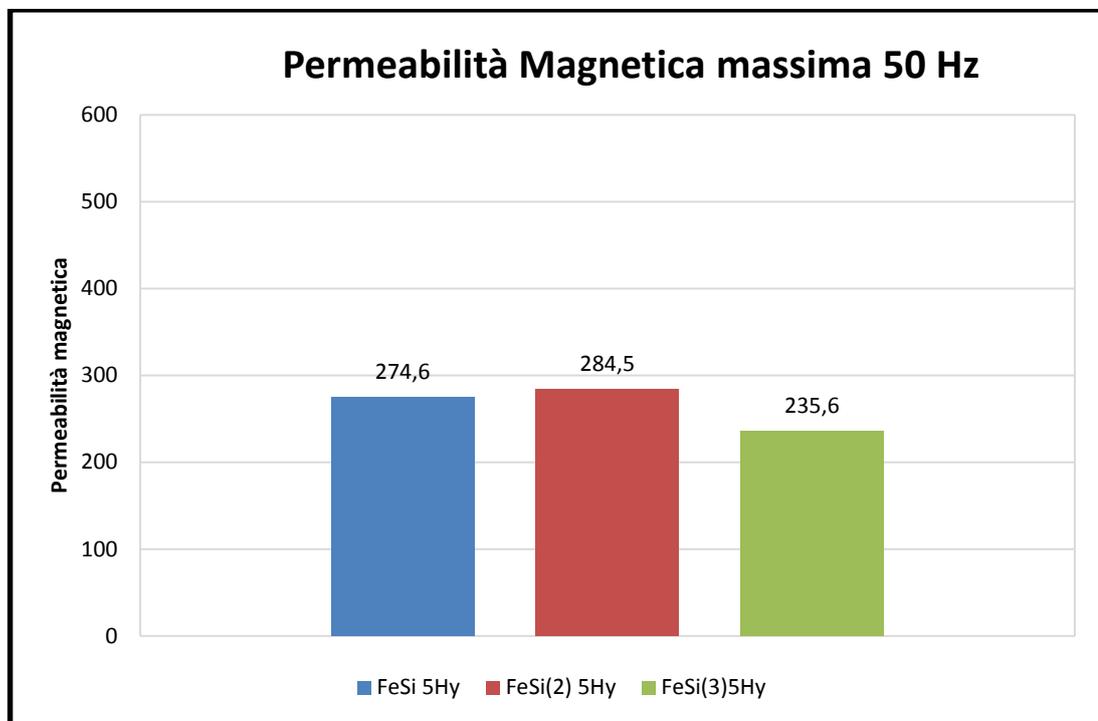
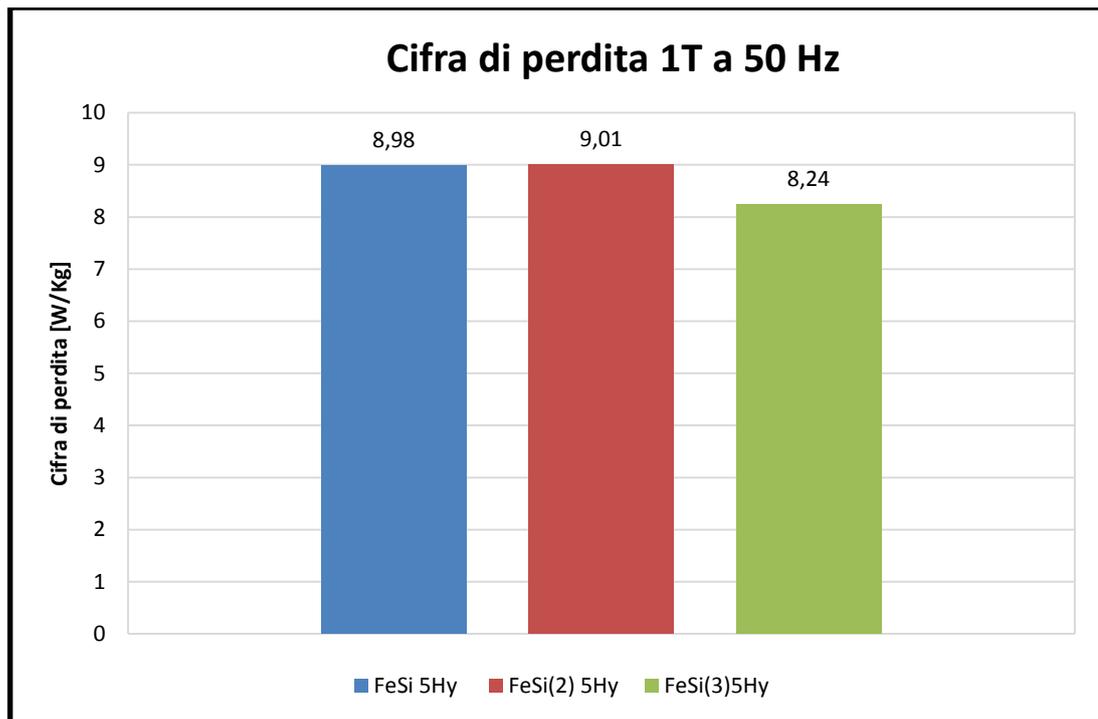


Figura 7-1: Confronto permeabilità massima tra i tre silicio utilizzati



*Figura 7-2: Confronto cifra di perdita tra i tre silicio utilizzati*

Questo potrebbe risultare uno spunto per la realizzazione di campioni con un silicio della stessa purezza del silicio<sub>3</sub>, con granulometria maggiore dei 45 $\mu$ m.

Per quanto concerne le percentuali di silicio utilizzate, quelle che al verde hanno mostrato le migliori caratteristiche sia di perdita che magnetiche sono le miscele allo 0,1% e 0,2% in peso di silicio. Il problema però è che tali proprietà vengono perse dopo il trattamento termico. A questo proposito si potrebbe pensare di aggiungere un terzo elemento legante che permetta di trattare il campione ad alte temperature senza che vengano intaccate tali proprietà.

Per quanto riguarda i processi invece, i risultati migliori sono stati ottenuti con miscelazione standard, sia per quanto riguarda la permeabilità massima che per la cifra di perdita a tutte le frequenze. L'ibridizzazione però risulta avere dei pro a suo favore, infatti il materiale realizzato con questo processo, presenta delle permeabilità magnetiche che decrescono meno all'aumentare della frequenza. Si potrebbero realizzare delle miscele ibridizzate allo 0,2% o 0,1% in peso di silicio con una granulometria ancora inferiore di silicio, in modo da realizzare una uniforme copertura del grano di ferro, nella eventualità che dopo trattamento termico le caratteristiche rimangano inalterate.

Parlando invece di trattamenti termici, si è visto come gli ossidi creati nel materiale dopo trattamento in aria alterino pesantemente le caratteristiche del materiale. In realtà a bassissime frequenze le permeabilità migliorano, ma crollano vertiginosamente

all'aumentare della stessa. Per quanto riguarda i trattamenti in vuoto a 400°C, i campioni allo 0,5% e 1% in peso di silicio hanno mostrato dei miglioramenti di permeabilità per tutto il range di frequenze, e delle perdite che aumentavano rispetto al campione al verde solo dopo i 100 Hz, mentre i campioni allo 0,1% e 0,2% hanno visto dei peggioramenti netti anche dopo il trattamento in vuoto.

Un altro discorso da accennare è l'effetto dell'ossidazione accumulata dai materiali a temperatura ambiente. Si sono realizzati dei confronti tra due campioni di una stessa miscela, nello specifico una miscela allo 0,5% in peso di silicio ottenuta con miscelazione standard. Uno dei campioni è stato trattato termicamente dopo qualche ora dalla compattazione (FeSi(3)5NM II), l'altro 2 mesi dopo (FeSi(3)5NM III). I dati, che al verde sono molto simili (ottenute lo stesso giorno), mostrano che gli effetti dell'esposizione ad ambiente ossidante incidono negativamente sulle proprietà, a tutte le frequenze considerate.

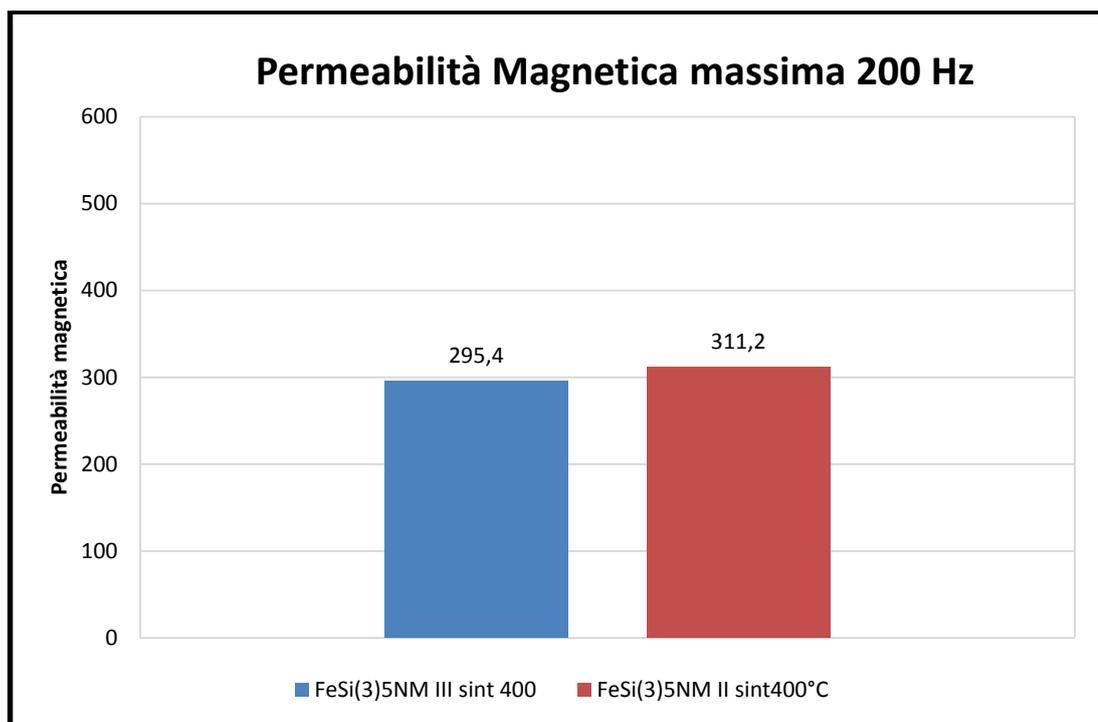


Figura 7-3: Confronto permeabilità massima tra campione ossidato e campione non ossidato

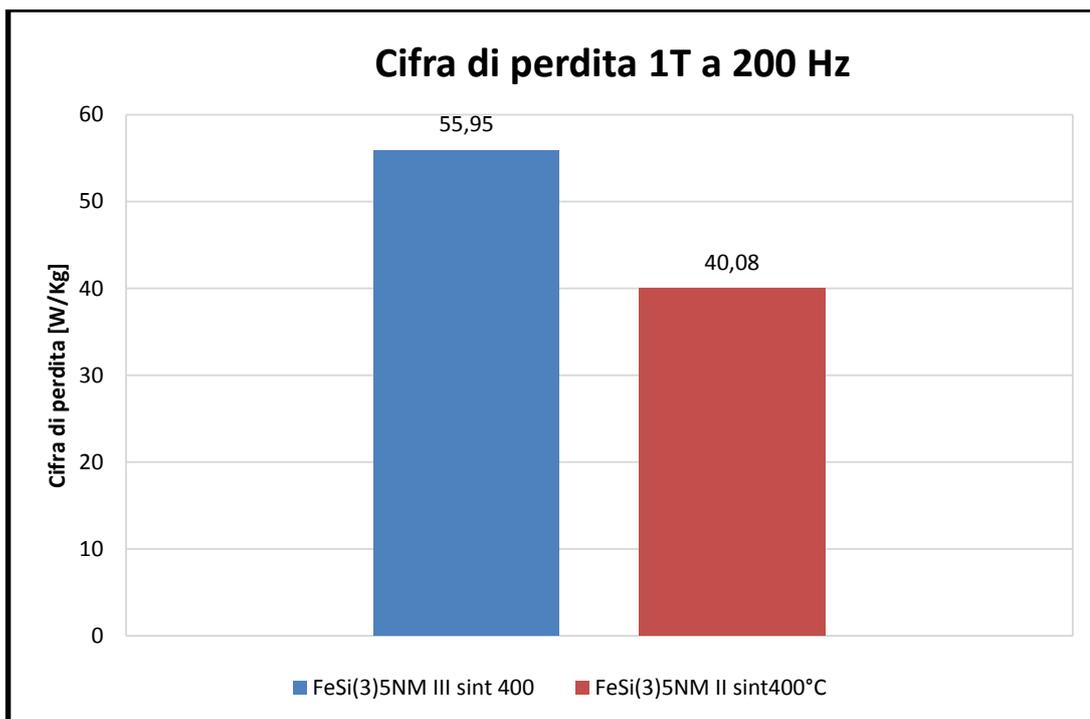


Figura 7-4: Confronto cifra di perdita tra campione ossidato e campione non ossidato

Un' ultima considerazione che va riportata è la differenza riscontrata tra le caratterizzazioni magnetiche ottenute con SST (single sheet test) e con toroide (misura più standardizzata). In generale come mostrano le tabelle successive, il SST presenta differenze nelle misure, infatti i risultati ottenuti presentano valori di perdita minori e valori di permeabilità maggiori rispetto a quelli ottenuti con toroide, a tutte le frequenze e a tutte le temperature di trattamento. In ogni caso la caratterizzazione ottenuta con SST, con eventuali fattori correttivi, risulta essere molto vantaggiosa per quanto riguarda tempistiche, realizzazione e quantità di materiali usato. La miscela utilizzata per un campione da testare con SST, pesa all'incirca un terzo del materiale usato per creare un toroide ed inoltre presenta una fase in meno di lavorazione, infatti il toroide è ottenuto asportando materiale da un dischetto tramite l'utilizzo di una fresa, quindi presenta oltre che tempistiche più lunghe anche maggiori scarti di lavorazione (circa il 50% del materiale).

	Frequenza [Hz]	Cifra di perdita [W/Kg]			Permeabilità massima		
		50	200	500	50	200	500
Campioni al verde	FeSi(3)5	7,69	38,46	125,8	289,2	277,8	273,2
	FeSi(3)5_tor	9,37	43,08	133,2	244,1	245,9	242,3
	Frequenza [Hz]	50	200	500	50	200	500
Campioni trattati a 400°C	Fesi(3)5_400	6,68	40,08	158	316,2	311,2	299,4
	Fesi(3)5_tor_400	8,01	44,3	168,8	270,3	270,6	264,7

Tabella 20: Confronto misure ottenute con SST e con toroide

	Cifra di perdita [W/Kg]			Permeabilità massima		
Frequenza [Hz]	50	200	500	50	200	500
Variazione verde	17,9%	10,7%	5,6%	-18,5%	-13%	-12,8%
Variazione 400°C	16,6%	9,5%	6,4%	-17%	-15%	-13,1%

Tabella 21: Variazione percentuale della misura ottenuta con SST rispetto le misure ottenute con toroide

In conclusione si presenta un confronto tra i dati ottenuti dalle misure sul toroide, con i dati dei migliori campioni con rivestimento organico ottenuti da precedenti tesisti [8].

Il campione con rivestimento in silicio presenta una permeabilità decisamente minore rispetto ai migliori campioni con resina epossidica e resina fenolica, come anche minore risulta essere l'induzione a 5000 [A/m].

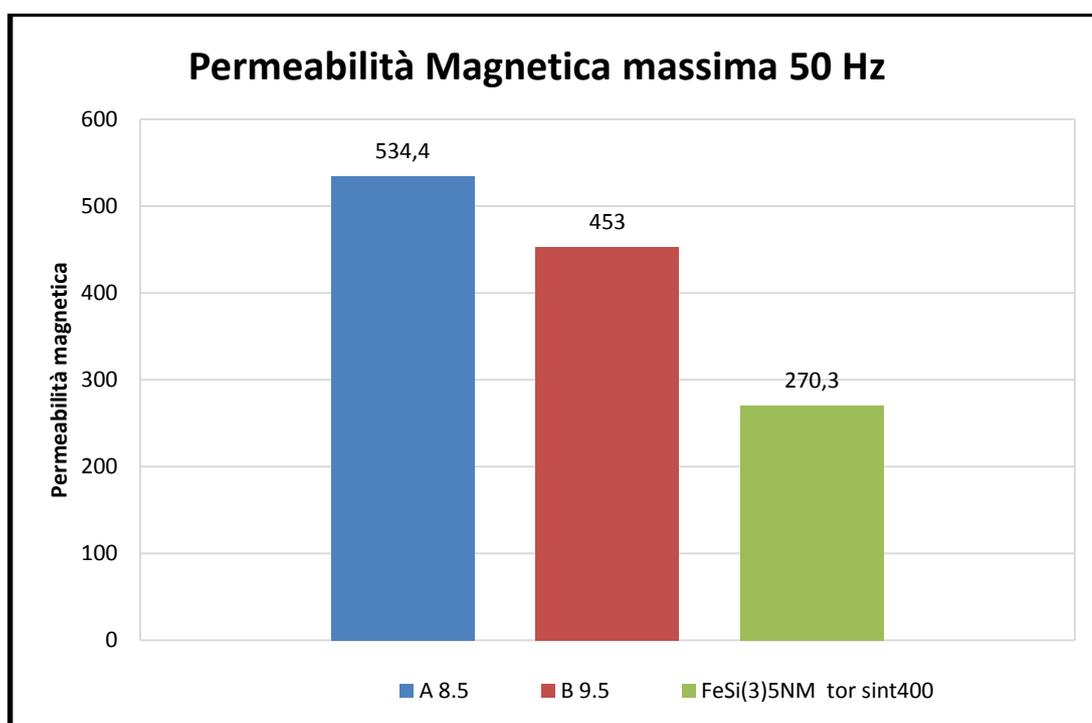


Figura 7-5: Permeabilità magnetica massima, confronto tra migliore epossidica, fenolica e silicio

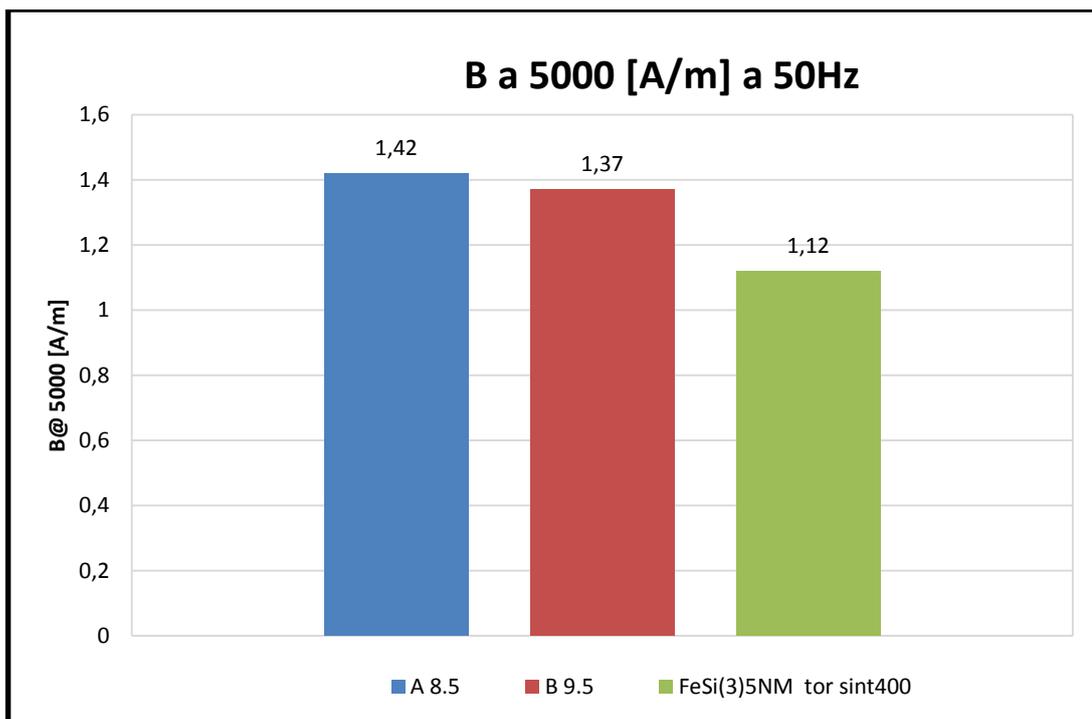


Figura 7-6: Induzione a 5000 A/m, confronto tra migliore epossidica, fenolica e silicio

Per quanto riguarda le perdite, a 50Hz il campione con layer in silicio presenta dei valori leggermente migliori, mentre alle alte frequenze il peggioramento di tale valore è evidente.

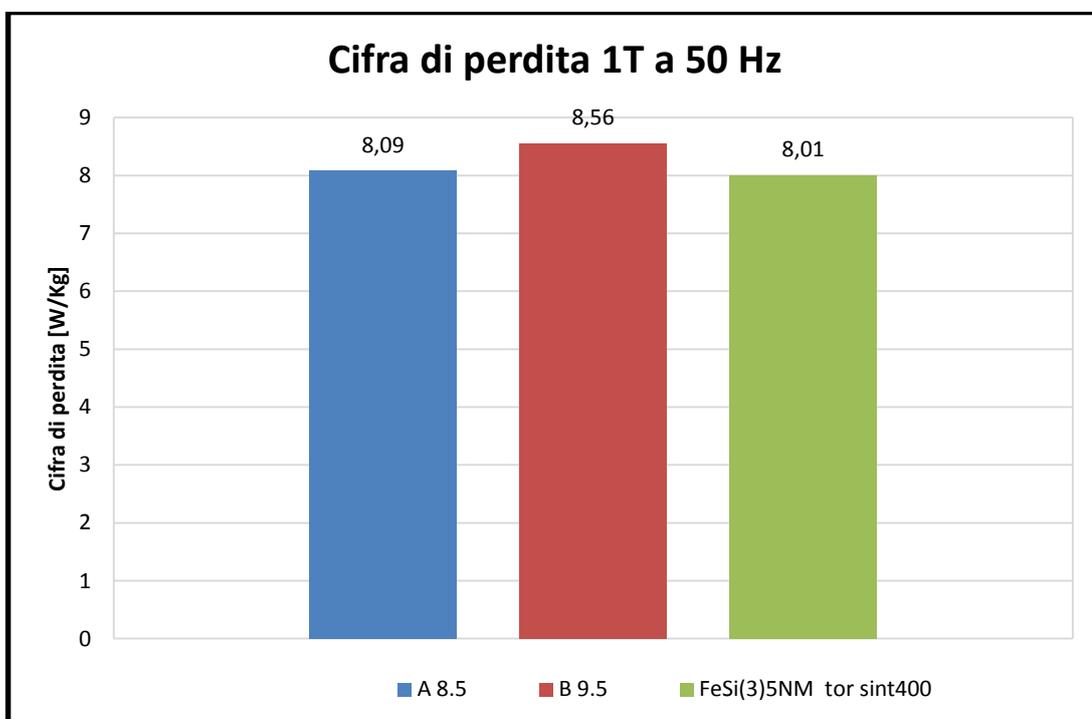
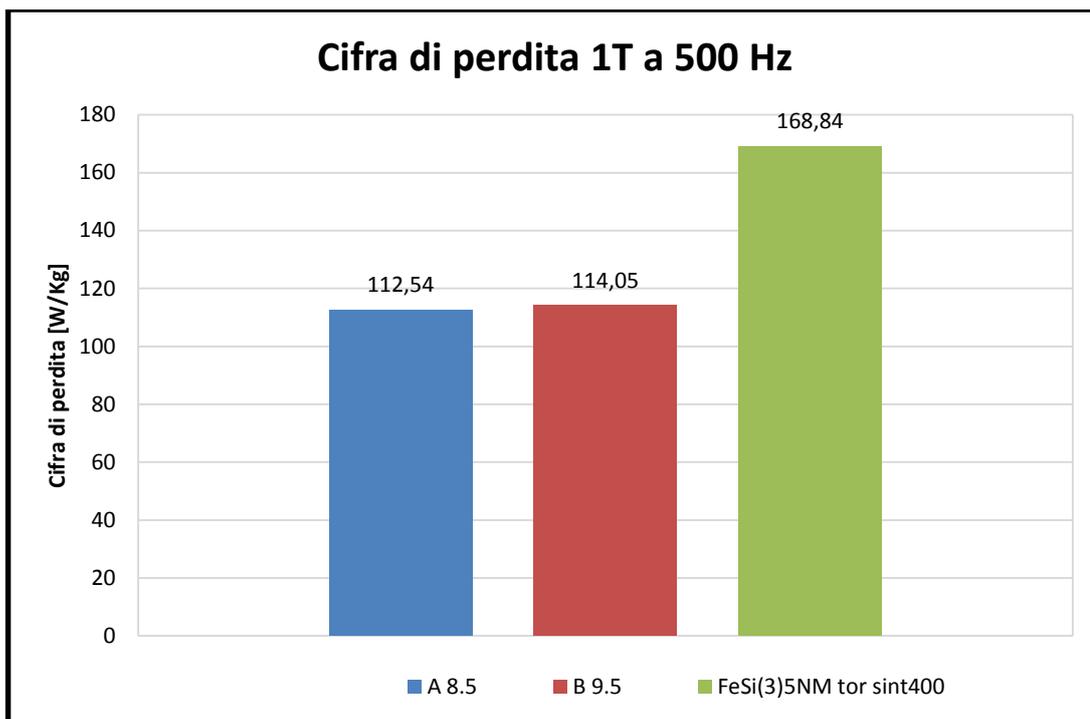


Figura 7-7: Cifra di perdita ad 1T a 50Hz, confronto tra migliore epossidica, fenolica e silicio



*Figura 7-8: Cifra di perdita ad 1T a 500Hz, confronto tra migliore epossidica, fenolica e silicio*

Inoltre anche la meccanica risulta insufficiente rispetto ai campioni con resina organica, infatti tali materiali presentano un forza massima variabile tra (80-100) MPa, mentre con il campione con rivestimento in silicio è stato ottenuto un valore di 23,2MPa.

# BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Mazzoldi - M. Nigro - C. Voci, Fisica Vol. II - Elettromagnetismo e onde 1998
- [2] H. Shokrollahi, K. Janghorban, Soft Magnetic Composites (SMCs) 2007
- [3] J.A. Bus, J.A. Calero, M.J Dougan, Sintered Soft Magnetic Materials. Properties and application 2003
- [4] D. Damiani, Tesi di laurea: “Studio ed ottimizzazione di materiali magnetici soft per la realizzazione di dispositivi per applicazioni elettromagnetiche”, Politecnico di Torino 2016/2017
- [5] G. Kastinger, Design of a novel transverse flux machine
- [6] N. De Piccoli, Tesi di laurea: “Caratterizzazione di materiali magnetici innovativi per costruzioni elettromeccaniche”, Università degli studi di Padova 2011/2012
- [7] S.S.Furio, Tesi di laurea: “Realizzazione di un motore a flusso assiale adottando materiali magnetici innovativi, Politecnico di Torino
- [8] D. Obialero, Tesi di laurea: “Materiali SMC innovativi: influenza dei parametri di processo sulle prestazioni magnetiche”, Politecnico di Torino 2016
- [9] F. Castagneri, Tesi di laurea: “Motore a flusso assiale di potenza frazionaria: progetto, realizzazione e caratterizzazione”, Politecnico di Torino 2018

## Sitografia

- [1] Höganäs: [www.hoganas.com](http://www.hoganas.com)
- [2] [www.fisicamente.net](http://www.fisicamente.net)
- [3] [it.wikipedia.org](http://it.wikipedia.org)