

Politecnico di Torino

Corso di Ingegneria Elettrica



Andrea Fragola

Anno Accademico 2017/2018

*Music was my first love
And it will be my last*

J. Miles

I. OBIETTIVO DELLO STUDIO	1
II. INTRODUZIONE MATERIALI MAGNETICI PERMANENTI	2
1. PRINCIPALI MATERIALI MAGNETICI	2
2. CARATTERISTICA B-H	4
3. MATERIALI COMMERCIALI	6
III.PICKUP	7
1. CENNI STORICI	7
2. FUNZIONAMENTO	9
3. PRINCIPI COSTRUTTIVI DEL SINGLE COIL	10
4. MODELLO CIRCUITALE EQUIVALENTE PER LA FORZA ELETTRO MOTRICE	11
5. MODELLO MATEMATICO PER IL CALCOLO DELLA FORZA	16
IV. ATTIVITÀ ED ESPERIENZE PRECEDENTI	18
1. LAVORI PASSATI	18
2. MARGINI DI MIGLIORAMENTO ATTESI	19
V. MODELLO FEMM	20
1. INTRODUZIONE	20
2. IPOTESI	20
3. DISEGNO DELLA STRUTTURA	21
4. SVILUPPO DELL'AMBIENTE DI SIMULAZIONE	22
5. TIPI DI SIMULAZIONE	26
FORZA ELETTRO MOTRICE	26
FORZA MECCANICA	27
6. PROGRAMMAZIONE LUA	27
7. RISULTATI	28
FORZA ELETTRO MOTRICE	28
FORZA MECCANICA	32

8. CONFRONTI	33
SIMULAZIONE C	34
<u>VI. PRODUZIONE CAMPIONI</u>	<u>39</u>
1. PESATURA E MISCELATURA	40
2. PRESSATURA	45
3. COTTURA	49
4. TAGLIO	52
5. MAGNETIZZAZIONE	55
6. CARATTERIZZAZIONE MAGNETICA	60
<u>VII. ANALISI DEI RISULTATI</u>	<u>63</u>
1. 30% FERRO	64
2. 0.8% RESINA FENOLICA	66
3. COMMENTI E CONFRONTI	68
MODELLO ANALITICO	72
<u>VIII. PROTOTIPAZIONE PICKUP</u>	<u>75</u>
1. CAMPIONI PER PICKUP	75
2. FRESATURA	75
3. ASSEMBLAGGIO E PROVE IN CAMERA ANECOICA	77
4. RISPOSTA IN FREQUENZA DI UNA CORDA	79
CIRCUITO DI PROVA	79
EBOW	80
CIF 0.8 30	84
CIF 0.8 40	85
CIF 0.8 70	86
5. COMMENTI E CONFRONTI	86
<u>IX. STUDIO DEL COEFFICIENTE TERMICO</u>	<u>88</u>
1. DESCRIZIONE DELLO STUDIO	88

2. PREPARAZIONE CAMPIONI	89
3. CODIFICA	89
4. ANALISI	90
5. COMMENTI E CONFRONTI	93
<u>X. CONSIDERAZIONI FINALI</u>	<u>96</u>
1. PROBLEMATICHE RISCONTRATE	96
2. SVILUPPI FUTURI	96
RESINA EPOSSIDICA	96
VARIAZIONE PIÙ FINE DELLE PERCENTUALI	97
PRESSIONI MAGGIORI E VALUTAZIONE MECCANICA	97
<u>XI. RINGRAZIAMENTI</u>	<u>98</u>
<u>XII. BIBLIOGRAFIA</u>	<u>99</u>
<u>XIII. INDICE DELLE IMMAGINI</u>	<u>101</u>
<u>XIV. GLOSSARIO</u>	<u>106</u>
<u>XV. APPENDICI</u>	<u>107</u>
1. APPENDICE A: PROGRAMMAZIONE LUA	107
PROGRAMMA PER IL CALCOLO DEL FLUSSO CONCATENATO	107
PROGRAMMA PER IL CALCOLO DELLA FORZA ESERCITATA SULLA CORDA	107
2. APPENDICE B: CARATTERIZZAZIONE MATERIALI MAGNETICI	109
CIF 1.8 30	109
CIF 1.5 30	110
CIF 1.2 30	111
CIF 1.0 30	112
CIF 0.8 30	113
CIF 0.5 30	114
CIF 0.8 40	115
CIF 0.8 50	116

I. OBIETTIVO DELLO STUDIO

La tesi qui presentata si pone come traguardo la comprensione del legame tra le proprietà fisiche dei materiali ferromagnetici e il funzionamento di un pickup per chitarra elettrica. Un pickup è essenzialmente un sensore a riluttanza variabile, composto da un magnete permanente intorno al quale è avvolto un numero consistente di spire. Sensori simili sono impiegati nell'industria, in quanto sono in grado di rivelare la presenza di materiale ferromagnetico nelle vicinanze, con una buona precisione ed immunità da disturbi. Nel caso specifico del pickup, essendo la parte ferromagnetica, cioè la corda, di sezione irrisoria, la sensibilità deve essere elevata e la perturbazione introdotta dal magnete minima. Queste necessità giustificano il successo indiscusso dei magneti tipo AlNiCo, anche un secolo dopo la loro invenzione.

Partendo dal lavoro precedentemente svolto in altre tesi e integrandolo con l'esperienza maturata in questo campo nel Laboratorio di Ingegneria Elettrica della sede di Alessandria, realizzerò un modello agli elementi finiti in grado di rappresentare il comportamento di un pickup elementare. Questo modello sarà lo strumento con il quale selezionare i materiali più adatti, dei quali poi studierò il funzionamento in un prototipo reale.

II. INTRODUZIONE MATERIALI MAGNETICI PERMANENTI

1. Principali materiali magnetici

Lo sviluppo tecnologico ha portato a grandi rivoluzioni nel mondo dei magneti permanenti. Partendo dalla magnetite degli antichi greci, che prese proprio il nome dal greco $\mu\alpha\gamma\eta\eta\tau\iota\varsigma$ [λίθος] (*magnētis [lithos]*) [1], essendo un tipo di minerale facilmente reperibile nella regione di Magnesia e che presenta naturalmente proprietà magnetiche; si è arrivati oggi ad una vasta gamma di leghe metalliche e molteplici composti ceramici con combinazioni di prestazioni meccaniche, termiche, elettriche e ovviamente magnetiche molto variegate.

In generale si distinguono le proprietà ferrimagnetiche dei tre metalli di transizioni: Ferro, Cobalto, Nickel, di alcune Terre Rare e di loro composti e leghe. In questi materiali i singoli atomi hanno momenti magnetici prevalentemente allineati all'interno di aree che prendono il nome di Domini di Weiss, dal nome del fisico francese Pierre-Ernest Weiss che ne teorizzò l'esistenza nel 1906. Questi molteplici domini hanno confini labili e l'imposizione di un campo magnetico esterno

porta al loro allineamento con relativo rafforzamento del campo stesso. Alla rimozione di questa sollecitazione esterna i domini rimangono prevalentemente allineati generando una magnetizzazione residua. Il materiale può essere riportato al suo stato originale tramite un campo con direzione opposta oppure tramite trattamento termico, infatti al raggiungimento di una temperatura, detta Temperatura di Curie, i domini si dissolvono e ogni comportamento magnetico prevalente scompare.

Risalgono agli anni '30 i primi esempi di magneti ceramici composti da **Ferrite** (Fe_2O_3 con aggiunta di BaO oppure SrO), studiati da Yogoro Kato e Takeshi Takei del Tokyo Institute of Technology. Quasi contemporaneamente nacquero le leghe AlNiCo, la cui scoperta risale al 1931,

sempre in Giappone, ad opera dell'esperto in metallurgia Tokushichi Mishima. Uno dei tanti casi serendipitiani fu la scoperta dell'Esaferrite di Bario (Fig 2 Cella elementare $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) al Philips Natuurkundig Laboratorium nel 1950. Di pari passo lo sviluppo tecnologico del settore della metallurgia delle polveri ha permesso di ridurre i costi e ampliare la gamma di materiali utilizzabili, in quanto la drastica riduzione delle temperature di processo comporta notevoli vantaggi. La successiva grande innovazione fu l'introduzione delle terre rare (Lantanidi) nella produzione di magneti con prestazioni molto superiori agli AlNiCo e alle Ferriti, prima negli anni '60 con i

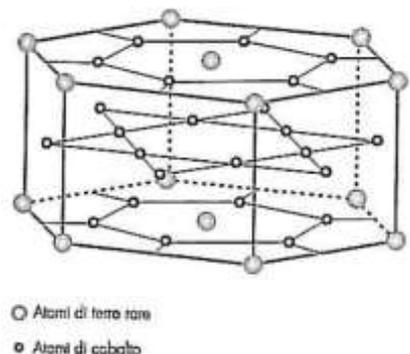
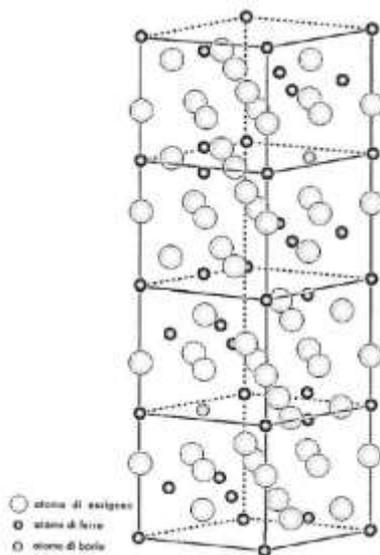
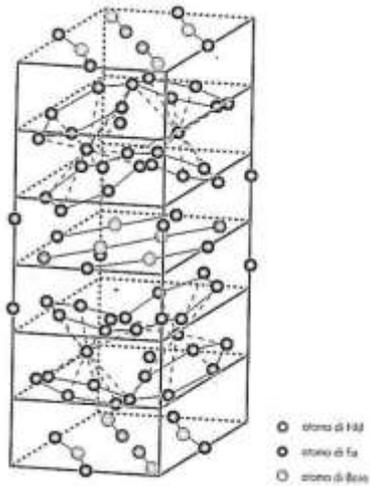


Fig 1 Cella elementare SmCo_5



Samario Cobalto ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ e Fig 1 Cella elementare SmCo_5) sulla base di un lavoro svolto dagli statunitensi Karl Strnat and Alden Ray e successivamente con il **Neodimio** in combinazione con Ferro e Boro (Fig 3 Cella elementare $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) sviluppati dalla General Motors in collaborazione con la Sumitomo nel 1982. I magneti NdFeB sono al giorno d'oggi la soluzione standard per la stragrande maggioranza delle applicazioni che richiedono magneti permanenti in grado di resistere alla smagnetizzazione e alle variazioni di temperatura; un classico esempio è quello delle macchine elettriche, che nell'ultimo decennio ha visto una vera e propria esplosione di domanda, con l'avvento delle energie

rinnovabili e dell'elettrificazione del settore automobilistico.

L'ultima grande rivoluzione è stata l'introduzione dei materiali plastici nel processo produttivo, andando a creare la famiglia dei **Plastomagnet**, in cui le polveri metalliche sono legate da resine. L'introduzione di questa tecnologia ha permesso di ottenere geometrie molto complesse e di ridurre i costi di produzione, inoltre la presenza di materiali plastici introduce una



componente di isolamento galvanico molto utile nel campo delle macchine elettriche. Un esempio sono i materiali ferromagnetici dolci legati da resine termoplastiche, detti anche Soft Magnetic Composites (SMCs). Questi composti hanno il vantaggio di abbassare notevolmente le cifre di perdita dovute a correnti parassite, in confronto ai nuclei ferromagnetici ottenuti per assemblaggio di lamierini isolati elettricamente tra loro. Per quanto riguarda invece i materiali magnetici permanenti, si tende a distinguere tra i plastomagnet veri e propri e i plastomagnet ibridi, in cui oltre alla polvere di magnete permanente si aggiunge una quota parte di polvere ferromagnetica dolce, questa modifica apporta proprietà particolari che approfondirò più avanti essendo questi i materiali scelti per la mia tesi. Un altro campo che sta iniziando a nascere negli ultimi anni è quello dei **magneti polimerici** di cui il primo esempio è il PANiCNQ [2], una combinazione di Polianilina

a base di smeraldo e Tetracianoquinodimetano, sviluppato nel 2004 presso l'università di Durham dallo scienziato pakistano Naveed A. Zaidi.

2. Caratteristica B-H

Per distinguere i vari materiali è necessario rappresentarne le proprietà magnetiche su di un piano B-H, in quanto la presenza di un effetto memoria e il forte comportamento non lineare richiedono l'ausilio di un metodo grafico, la curva nel secondo quadrante è quella caratterizzante.

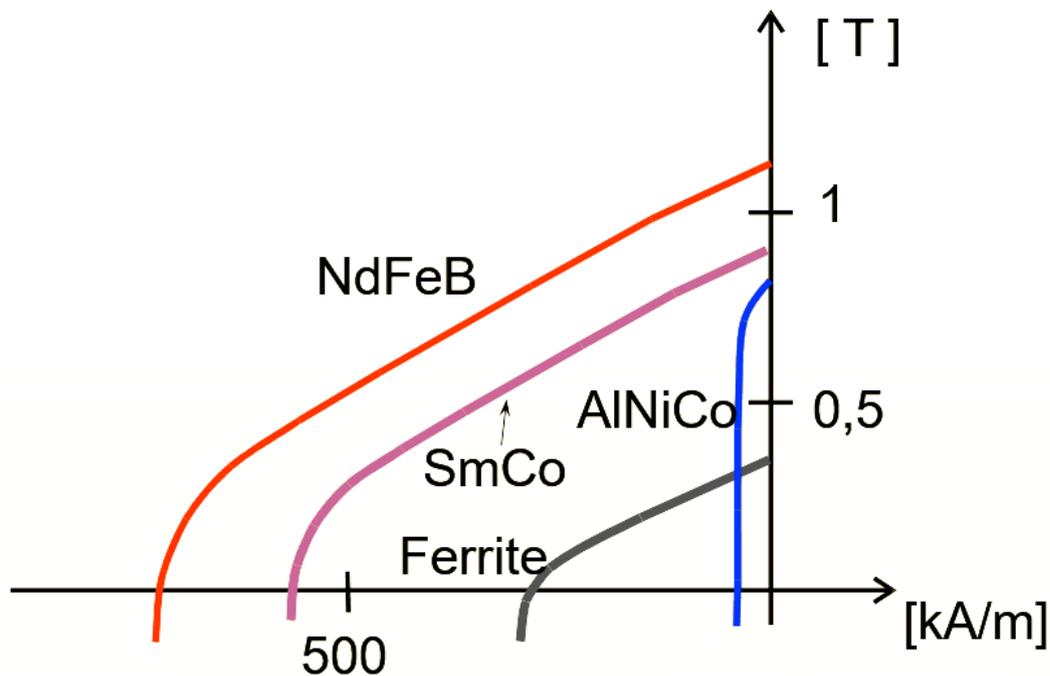
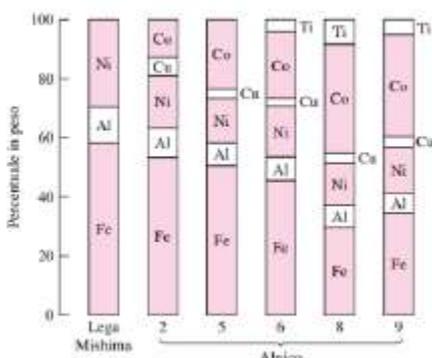


Fig 5 Caratteristiche B(H) generali [3]



Dalle curve B(H) nel secondo quadrante rappresentative delle famiglie di materiali sopracitati (Fig 5), è facilmente osservabile che partendo dalle Ferriti, per poi passare ai SmCo ed infine ai NdFeB ci sia stato un netto miglioramento in termini di induzione residua (B_r) e di campo coercitivo (H_{cB}) l'unica eccezione sono le leghe AlNiCo che, per quanto siano molto varie come macrofamiglia, si distinguono generalmente per un'induzione residua superiore ai 0.6T ma che

hanno valori di campo coercitivo molto minori, in modulo, agli altri materiali. Questo conferisce a queste leghe una tipica ripidità della caratteristica che, come dimostrerò più avanti, è particolarmente utile nell'applicazione da trasduttore del suono.

Introduzione materiali magnetici permanenti

In questa caratterizzazione generale tralascio momentaneamente l'effetto della temperatura, la quale ha un ruolo cruciale nell'impiego dei magneti ma che richiede una trattazione più specifica, che eseguirò più avanti.

La relazione tra l'induzione (B), misurata in Tesla (T) e il campo magnetico (H) misurato in Ampere su metro ($A \cdot m^{-1}$) è definita dalla relazione:

$$B = \mu H$$

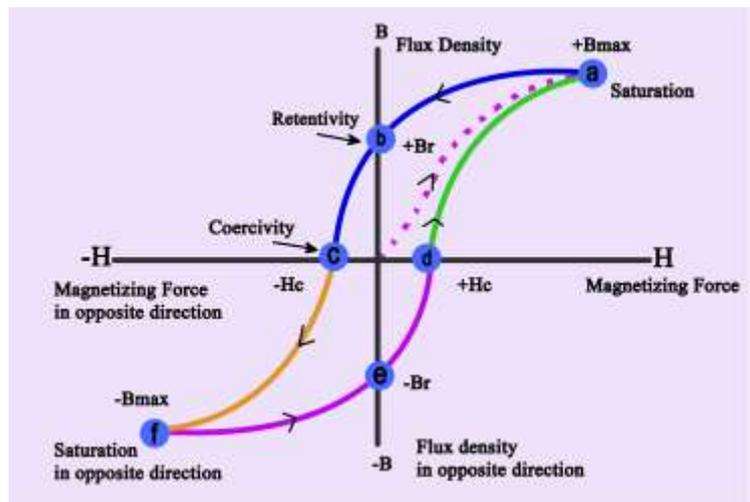
Dove μ è la costante di permeabilità magnetica generica del materiale di solito riferita alla costante di permeabilità magnetica del vuoto (μ_0), tramite una costante caratterizzante del materiale (μ_r):

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Dove:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \approx 1.25 \dots \times 10^{-6} \frac{N}{A^2} \text{ oppure } T \cdot \frac{m}{A} \text{ oppure } \frac{Wb}{(A \cdot m)}$$

Chiaramente nei materiali ferromagnetici l'equazione non è lineare, quindi la curva ha un primo tratto a cui poi sopraggiunge un cambio di pendenza detto gergalmente ginocchio, oltre il quale si raggiunge un andamento pressoché asintotico al valore di saturazione; qualsiasi aumento ulteriore di H oltre il valore di saturazione diventa sempre più esoso per ottenere un



miglioramento apprezzabile dell'induzione. Inoltre, i materiali ferromagnetici si caratterizzano per una Induzione Residua (B_r), cioè la persistenza di induzione in assenza di un campo esterno, dopo esser stati opportunamente magnetizzati. Il Campo Coercitivo (H_c) invece, è il valore di campo a cui il materiale deve essere sottoposto affinché l'Induzione sia azzerata. Questi punti inseriti su un grafico B-H individuano un ciclo detto **ciclo di isteresi** che è caratteristico del singolo materiale, ne identifica le proprietà magnetiche tipiche. Essendo un ciclo chiuso, viene percorso dal materiale al variare delle sollecitazioni magnetiche a cui è sottoposto, intersecando le rette di carico individua i punti di lavoro del magnete e con la sua area ($B \cdot H$) quantifica l'energia persa ad ogni ciclo (Perdite di Isteresi del materiale) in caso di funzionamento in regime alternato. Più l'area è grande e più il materiale è "duro" viceversa si definisce "dolce". Tipicamente i materiali

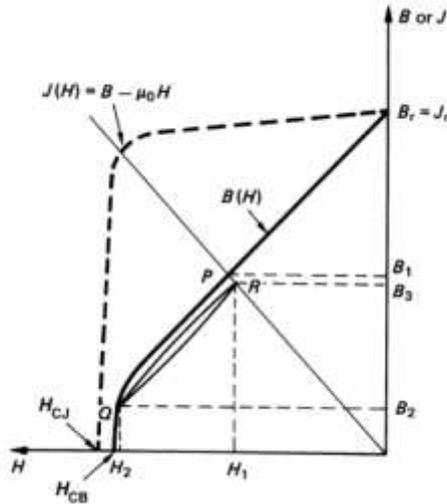


Fig 8 Curve $J(H)$ e $B(H)$ nel secondo quadrante

duri trovano impiego come magneti permanenti e i materiali dolci nei nuclei delle applicazioni magnetiche attive (e.g. solenoidi, statori di macchine e trasformatori), con lo scopo di convogliare il flusso.

Nei magneti permanenti si va a distinguere la componente di induzione magnetica (B) dalla polarizzazione magnetica propria del materiale (J), legati tra di loro dall'equazione:

$$J(H) = B(H) - \mu_0 \cdot H$$

Si identificano così due curve separate che intersecano l'asse delle ordinate in due punti diversi: H_{cb} e H_{cj} prende il nome di Campo Coercitivo Intrinseco, che sarebbe il punto in cui avviene la completa smagnetizzazione del materiale. Mentre per $H=0$ le due curve vanno a coincidere su B_r

3. Materiali commerciali

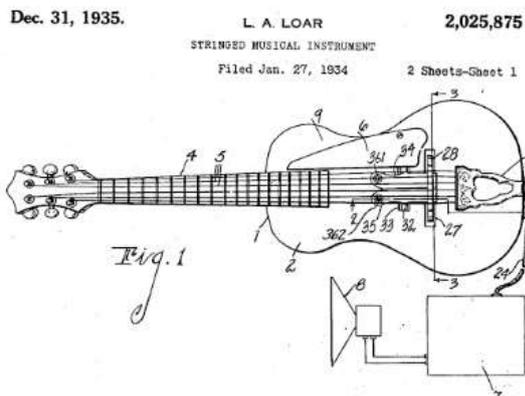
Ogni macro-famiglia di materiali si distingue per valori di Induzione Residua e Campo Coercitivo, riporto una tabella riassuntiva con una serie di prodotti, attualmente disponibili sul mercato.

Materiale	Tipologia	Br	Hcb	Hcj	BH	ρ	T. Curie	Fonte
		T	kA/m	kA/m	kJ/m ³	kg/m ³	°C	
HF 8/22	Ferrite dura	0.22	140	230	8.5	4.8	450	[4]
HF 30/26	Ferrite dura	0.405	260	270	31.5	4.8	450	[4]
Alnico 2	AlNiCo sinterizzato	0.7	40	43	12	6.8÷7.0	810	[5]
Alnico 5	AlNiCo sinterizzato	1.1	48	48	34	6.8÷7.0	810	[5]
Alnico 8	AlNiCo sinterizzato	0.88	121	127	42	6.8÷7.0	810	[5]
Alnico 8-HC	AlNiCo fuso	0.7	139	139	36	6.9÷7.3	740	[5]
Alnico 9	AlNiCo fuso	1.05	112	139	72	6.9÷7.3	740	[5]
SmCo5 140/175 w	SmCo ₅	0.83	690	2000	155	8.3	720	[4]
Sm2Co17 190/var h	Sm ₂ Co ₁₇	1.06	760	880	215	8.3	825	[4]
NdFeB 240/95 w	NdFeB	1.2	890	1100	265	7.5	310	[4]
NdFeB 220/175 h	NdFeB	1.18	920	1900	265	7.5	310	[4]
HF 3/18 p	Plastoferrite	0.14	90	180	3.5	3.3	450	[4]
HF 14/20 p	Plastoferrite	0.28	190	220	15.5	3.5	450	[4]
NdFeB 35/100 p	Plastoterrerare	0.47	330	1050	37	5	310	[4]
NdFeB 65/64 pw	Plastoterrerare	0.65	420	740	72	6	310	[4]

III. PICKUP

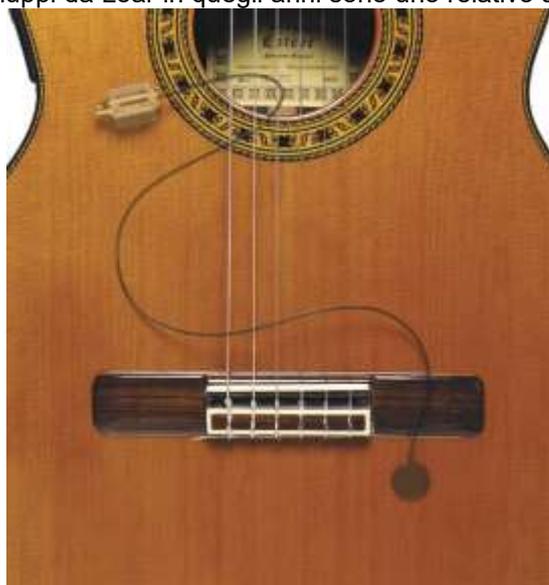
1. Cenni storici

Il concetto di pickup nasce per permettere di amplificare strumenti acustici che hanno sempre deficitato di volume, rendendoli inoltre più resilienti ai fenomeni di risonanza legati alla presenza di una cassa armonica.



Quando uno strumento è immerso in un ambiente con elevata pressione acustica (e.g. davanti agli impianti di amplificazione) entra in risonanza con il proprio segnale, questo dà vita al fenomeno detto di feedback acustico o più propriamente effetto **Larsen** (Søren Absalon

Larsen è il primo a studiarne il principio) dove strumento e amplificazione diventano un circuito chiuso con guadagno elevato in cui i suoni emessi dallo strumento entrano in fase con il proprio segnale amplificato aumentando di volume, fino a raggiungere la saturazione dell'impianto, rendendo impossibile qualsiasi esecuzione e generando il tipico fischio. Esistono grandi esempi nella storia della musica in cui questo fenomeno è stato sfruttato con risultati di rara bellezza ma generalmente si tratta di un problema da evitare. I primi lavori sui pickup risalgono all'inizio degli anni '20 ad opera di **Lloyd Loar**, un ex dipendente della Gibson, nota casa americana produttrice di chitarre. Loar fonda separatamente la ViViTone con il solo scopo di amplificare per via elettrica gli strumenti a corda. I due brevetti principali sviluppati da Loar in quegli anni sono uno relativo ad un pickup che funzionava trasmettendo le vibrazioni delle corde a due viti collegate direttamente al ponte della chitarra e intorno alle quali era avvolto un solenoide. Il fatto che ci fosse un collegamento meccanico diretto tra il ponte e il pickup fa assomigliare questo primo modello ad un pickup **piezoelettrico**; che si distingue da quelli elettromagnetici in quanto sono collocati direttamente a contatto con il corpo vibrante da amplificare, come pastiglie incollate al corpo dello strumento o stecche inserite sotto il ponte. Sfruttano le proprietà piezoelettriche di opportuni materiali (e.g. cristalli di quarzo) che se sollecitati meccanicamente lungo un asse generano una



Pickup

differenza di potenziale, questo segnale può essere opportunatamente amplificato ed è una tecnologia comunemente utilizzata su molti strumenti acustici con risultati eccellenti ma non risolve il problema delle risonanze. Il secondo brevetto di Loar invece assomigliava più ad un trasduttore a capacità variabile in cui due lamine di rame separate da aria e fatte vibrare dal movimento delle corde generavano il segnale da amplificare. La ViViTone non fu fortunata, i suoi prodotti entrarono in commercio alla fine degli anni '20, in concomitanza con la Grande Depressione portandola al fallimento.

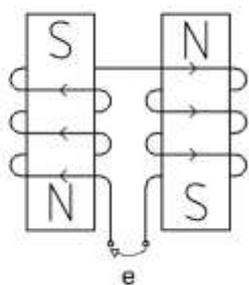
Il primo vero pickup elettromagnetico nasce dalla collaborazione tra **Beauchamp** e **Rickenbacher**, il secondo poi fonderà la Rickenbacker Manufacturing Company. Nel 1931 iniziano a sperimentare e nel 1937 rilasciano il brevetto del **Horseshoe Pickup**, caratterizzato da due magneti permanenti a forma di ferro di cavallo che circondano le corde, sicuramente una necessità costruttiva in un'epoca

in cui i materiali magnetici non erano particolarmente performanti e di conseguenza era necessario minimizzare il traferro. L'avvolgimento di questo pickup è singolo, il che lo identifica come Single Coil, una tipologia che è ancora oggi molto diffusa per via della sua timbrica molto particolare ed è soggetta ad un problema non trascurabile. Essendo la bobina composta da un numero elevato di spire con un solo verso, non è immune ai campi in cui potrebbe essere immersa

e li concatena, generando rumore che si somma al segnale audio.

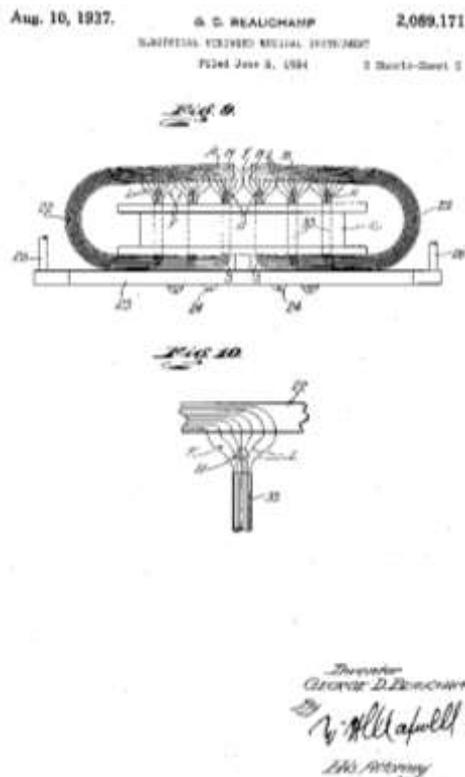
Campo esterno
 $\sim + \sim = -$

Vibrazione corda
 $\sim + \sim = \sim$



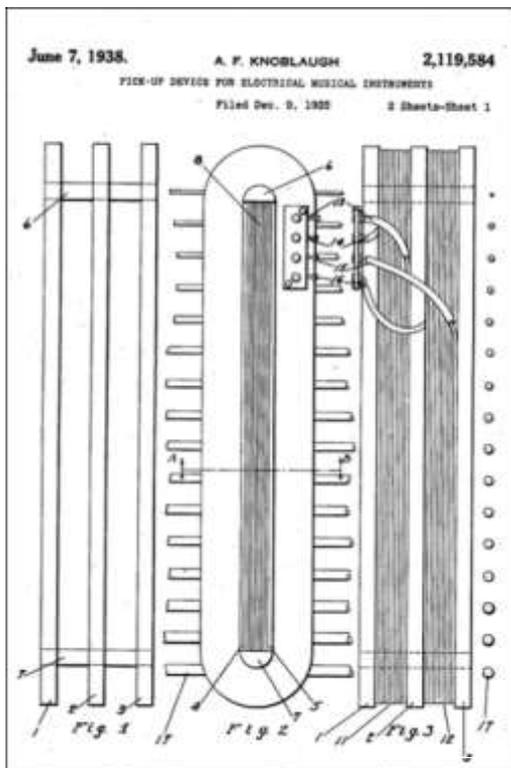
Per ovviare a questo problema nasce l'intuizione del principio di cancellazione del rumore che porta alla nascita del **Pickup Humbucker**. In questo dispositivo due bobine in serie con verso opposto sono avvolte su due nuclei ferromagnetici con polarità invertite, le componenti di flusso generato dal movimento delle corde sono in fase e il loro valore di picco idealmente raddoppia, mentre qualsiasi campo concatenato alla bobina ma non generato dalle corde si somma in controfase e idealmente si annulla (Fig 12).

L'introduzione del concetto di Humbucker viene attribuita ad un brevetto del 1935 Armand F. Knobaugh,



Pickup

come trasduttore del suono per pianoforte ma erroneamente la storia ha assegnato la paternità di questo oggetto a Seth Lover che lo ha portato al successo inserendolo nelle chitarre Gibson a metà degli anni '50.

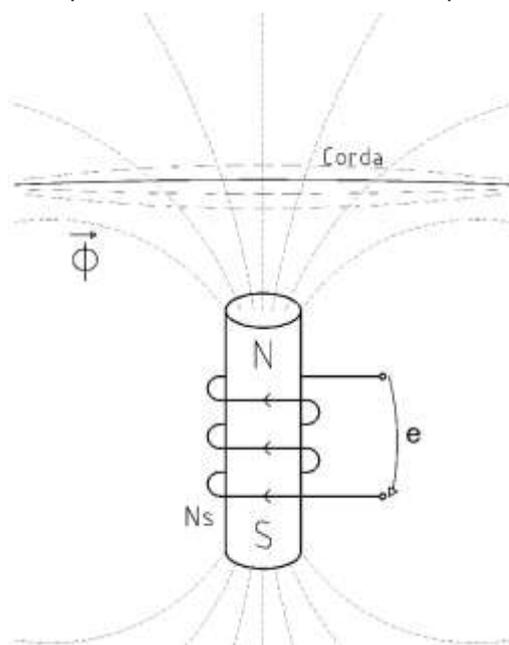


I tipi di disturbo a cui un pickup è sottoposto sono una conseguenza dei campi elettromagnetici in cui esso è immerso, caratterizzati per la loro intensità e frequenza. Gergalmente si tende a distinguere tra Hum e Buzz, anche se si tratta del medesimo fenomeno elettromagnetico, con Hum si intende il rumore generato da campi variabili con frequenze di rete elettrica (50-60Hz) mentre il Buzz più genericamente identifica i disturbi di alta frequenza ($f > 1\text{kHz}$), qualsiasi soluzione di filtraggio non è applicabile in quanto si andrebbe ad incidere sulla timbrica e la dinamica dello strumento che ha un banda passante approssimativa tra 80Hz e 6kHz con un ricco contenuto armonico che va il più possibile valorizzato e non attenuato.

In questa breve trattazione storica ho dovuto per necessità tralasciare moltissimi riferimenti a tante altre soluzioni intermedie o ibride che sono state introdotte nel corso degli anni, una panoramica completa del mercato dei pickup richiederebbe troppo tempo e fuorvierebbe dal lavoro di questa tesi.

2. Funzionamento

Il pickup di una chitarra elettrica è un **trasduttore a riluttanza variabile o VRS** (Variable Reluctance Sensor). Concettualmente un VRS consiste di un nucleo magnetico permanente circondato da una bobina di materiale conduttore, la presenza o meno di materiale ferromagnetico di fronte al sensore va a cambiare il traferro e di conseguenza la riluttanza del tubo di flusso, qualsiasi variazione viene percepita dalla bobina che trasforma la variazione di flusso concatenato (ϕ) in una differenza di potenziale elettrico (ϵ) misurabile ai capi della bobina stessa. Il principio fisico è espresso dalla Legge di Lenz che lega le due grandezze nella sua formulazione generale:



Pickup

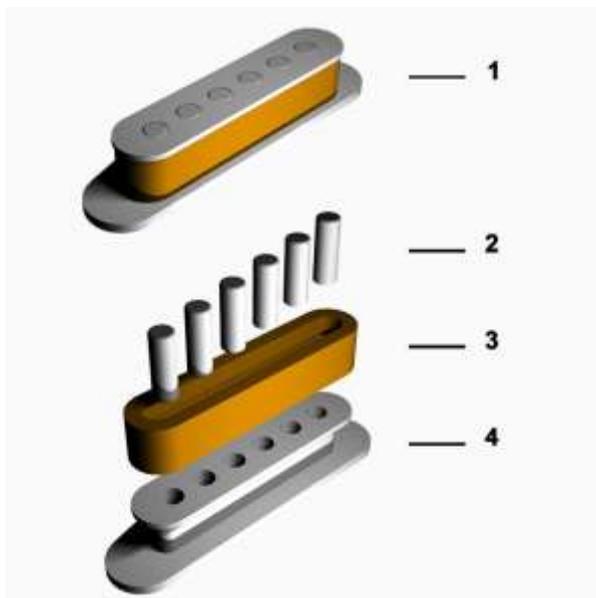
$$e(t) = -\frac{d\varphi}{dt}$$

Nel Pickup il flusso concatenato alla bobina va moltiplicato per il numero di spire N

$$e(t) = -N\frac{d\varphi}{dt}$$

Le corde, costituite da materiale ferromagnetico, solitamente acciaio inossidabile, con raramente l'aggiunta di Cobalto, e placcate con Nickel o Bronzo, sono immerse nel campo generato dai magneti e vibrando generano questa variazione di flusso concatenato.

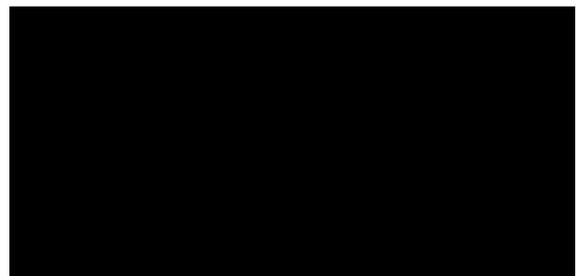
3. Principi costruttivi del Single Coil



Per il mio studio ho preso, come riferimento costruttivo, la tipologia di pickup definita **single coil** (Fig 15), in cui il nucleo ferromagnetico è composto da 6 poli cilindrici (2), magnetizzati lungo il loro asse maggiore, posti ciascuno sotto ad una corda e tenuti in posizione da un supporto di materiale plastico (4) intorno al quale è avvolta la bobina (3). Nel supporto plastico sono inseriti due rivetti sui quali vengono brasati i terminali della bobina che poi va collegata al resto del circuito interno alla chitarra.

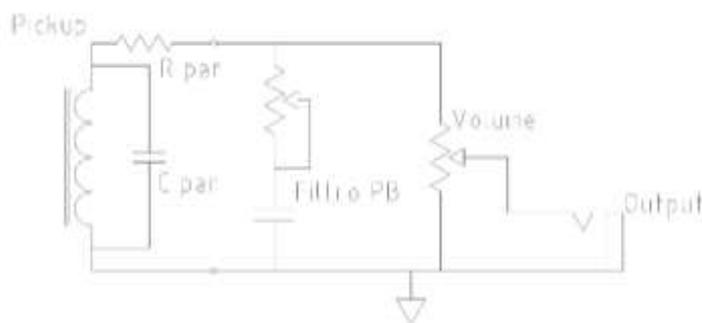
Il trasduttore così costruito non è assolutamente da ritenersi lineare ma la sua non linearità è non solo trascurata ma addirittura ricercata ed è principalmente causata dagli accoppiamenti capacitivi C_{par} tra le spire (Fig 17), da considerarsi come parametri concentrati parassiti in parallelo all'induttanza di bobina. La presenza di componenti reattive comporta una frequenza di risonanza che i più abili costruttori riescono a variare cambiando la tecnica di avvolgimento, ottenendo così particolari timbriche.

I magneti possono essere a filo del supporto in plastica oppure di altezze differenti per compensare il fatto che le corde non sono complanari ma disposte lungo un arco di circonferenza dettato da come è costruito il manico (symmetrical). Oppure secondo una disposizione empirica mirata ad ottimizzare la risposta dinamica al variare di distanza e



Pickup

dimensione della corda (vintage). Nel mio caso, per semplicità, ho disposto tutti i magneti alti uguali e disposti alla stessa quota (flat) una pratica comunque diffusa.



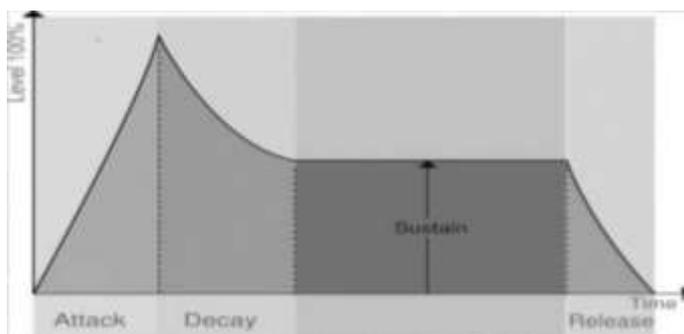
Aggiungo anche che il trasduttore così composto solitamente è inserito in un circuito integrato nel corpo della chitarra composto da potenziometri per il controllo del volume e da un filtro passa basso variabile tramite un potenziometro in serie ad un condensatore. Solitamente le impedenze di

uscita di questo circuito sono nell'ordine dei 10k Ω e si tende a disaccoppiarlo, tramite appositi buffer, per sfruttare al meglio la risposta in frequenza del Pickup ma esistono particolari casi in cui si preferisce sfruttare l'impedenza interna del sistema per controllare il suono in uscita.

Generalmente la risposta del pickup all'oscillazione della corda viene caratterizzata da 4 parametri:

- Attacco (attack): la velocità di risposta al gradino
- Decadimento (decay): il transitorio iniziale di oscillazione libera
- Mantenimento (sustain): la parte principale dell'oscillazione libera
- Rilascio (release): la coda dell'oscillazione libera

In realtà decay, sustain e release fanno tutti parti dello stesso fenomeno e cioè di un'oscillazione smorzata che segue un andamento cissoidale, in cui il sustain è la parte dominante e sul quale di solito si concentrano le maggiori attenzioni per caratterizzare un trasduttore. Sicuramente la forza esercitata dal magnete smorza l'oscillazione riducendo il tempo di sustain.

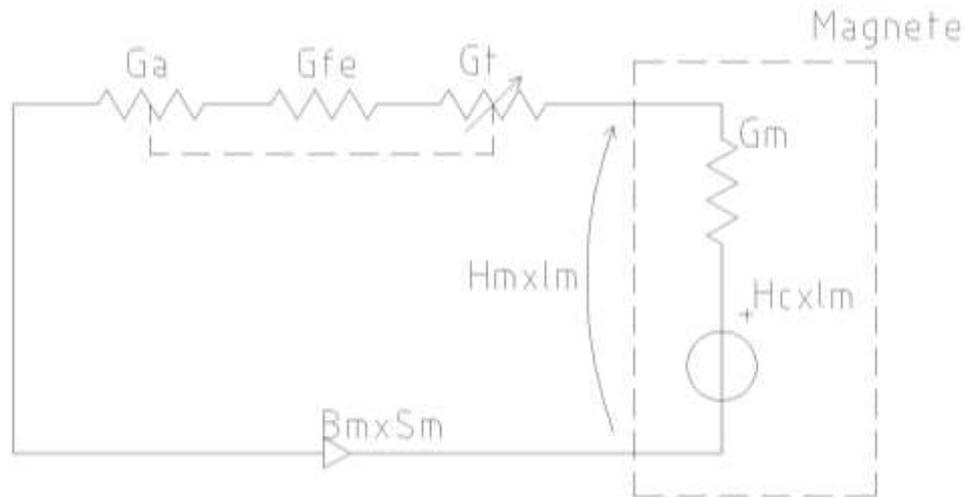


4. Modello circuitale equivalente per la Forza Elettro Motrice

Con alcune assunzioni semplificative, il circuito magnetico del VRS può essere facilmente rappresentato tramite il suo equivalente elettrico. La prima considerazione da fare è che al contrario del classico esempio accademico, in cui il magnete permanente è inserito all'interno di un supporto in materiale ferromagnetico, in maniera tale da convogliare al meglio il flusso, il tubo

Pickup

di flusso del VRS è principalmente in aria. Il funzionamento quindi è a bassi valori di induzione (B) e valori di campo magnetico (H) prossimi al campo coercitivo. Siamo in un'area di lavoro che solitamente viene ritenuta poco produttiva, se non da evitare, in applicazioni attive come le macchine elettriche. Si noti che questa condizione di lavoro comporta che il magnete debba avere



una sufficiente resilienza in quanto si corre il rischio che possa smagnetizzarsi.

L'equivalente elettrico del circuito magnetico del pickup, opportunamente semplificato risulta così composto:

Con:

Valore di induzione del magnete: $[B_m] = T$

Valore del campo coercitivo (H_{cb}) esercitato dal magnete: $[H_{cb}] = A \cdot m^{-1}$

Valore del campo magnetico esercitato dal magnete: $[H_m] = A \cdot m^{-1}$

Sezione del magnete perpendicolare alla direzione di magnetizzazione: $[S_m] = m^2$

Lunghezza del magnete: $[l_m] = m$

Inverso della riluttanza equivalente del magnete: $[G_m] = H$

Flusso magnetico complessivo del magnete: $B_m \cdot S_m = \Phi_m$ con $[\Phi_m] = Wb$

Inverso della riluttanza della porzione di aria tra la corda e il magnete: $[G_t] = H$

Inverso della riluttanza della porzione di corda attraversata dal flusso: $[G_{fe}] = H$

Pickup

Inverso della riluttanza del restante percorso in aria del flusso: $[G_a] = H$

L'inverso delle riluttanze é così calcolato:

$$G_t = \mu_0 \cdot \frac{S_t}{l_t}$$

$$G_{fe} = \mu_{fe} \cdot \frac{S_{fe}}{l_{fe}}$$

$$G_m = \mu_m \cdot \frac{S_m}{l_m} \cong \mu_0 \cdot \frac{S_m}{l_m}$$

$$G_a = \mu_0 \cdot \frac{S_a}{l_a}$$

Si noti che viene considerata una condizione di solenoidalità perfetta, quindi la componente di flusso ($B_m \cdot S_m$) attraversa tutti i componenti del circuito in serie.

$$\Phi = B_m \cdot S_m = B_a \cdot S_a = B_t \cdot S_t = B_{fe} \cdot S_{fe}$$

La legge della circuitazione invece impone:

$$\int_s \bar{j}_x ds = \oint_l \bar{H}_x dl = I$$

Con:

$$[j] = \frac{A}{m^2}$$

Dove se si considerano le componenti discrete di campo e corrente la relazione diventa:

$$\sum_k (N_k \cdot I_k) = \sum_n (H_n \cdot l_n)$$

Nel caso analizzato non è presente alcuna componente di forza magnetomotrice ($N \cdot I$), sapendo che $\Re\Phi = NI = Hl$ l'equazione diventa:

$$H_m \cdot l_m + H_t \cdot l_t + H_{fe} \cdot l_{fe} + H_a \cdot l_a = \Re_{eq} \Phi_{mag} = 0$$

L'unica grandezza non riportata è la forza elettromotrice associata alla bobina avvolta intorno al magnete e per la quale rimane sempre valida la legge di Lenz.

Pickup

$$\varepsilon = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -N \frac{\partial}{\partial t} \int_{\sigma} B ds$$

Le assunzioni che si possono fare sono le seguenti:

$$S_{fe} < S_m$$

$$l_{fe} > l_m$$

$$l_a \gg l_{fe} > l_m > l_t$$

$$S_a \gg S_m > S_{fe}$$

Tenendo sempre presenti le forti approssimazioni che sono state fatte in partenza:

- Il flusso attraversa completamente la corda, non ipotizzo componenti disperse
- Il percorso ipotizzato in aria quando invece attraversa componenti composti da materiali diversi
- Viene considerato un magnete singolo ma, come descritto precedentemente, i pickup sono realizzati con batterie di magneti disposti anche secondo geometrie particolari
- Viene considerata variabile solo la riluttanza del tratto sotto la corda (G_t) ma in realtà l'aumento di G_t comporta una riduzione di G_a e viceversa, per questo motivo ho riportato una linea tratteggiata che li collega. G_a è stata considerata costante in prima approssimazione perché percentualmente varia meno ma c'è comunque un legame di complementarità.

L'unica realtà inconfutabile è che la gran parte della riluttanza sia associata al tratto in aria (G_a) questo comporta valori di flusso bassi quindi si possono assumere:

$$B_m \ll B_r$$

$$H_m \approx H_{cb}$$

Per valutare i pregi e difetti di diversi materiali nella stessa applicazione, si può fare un'ipotesi di due condizioni di lavoro distinte (1 e 2), con le rispettive rette di carico, la prima con la corda più lontana dal magnete rispetto alla seconda, di conseguenza:

$$B_1 < B_2$$

Queste rette di carico, saranno passanti per l'origine, in quanto non vi è nessuna forma di campo magnetico esterno e simulano in maniera qualitativa, il punto massimo e minimo di oscillazione della corda rispetto al pickup. Ipotizzando due materiali con H_{cb} uguale e B_r diversa, intersecando le rispettive caratteristiche nel secondo quadrante, riportate come lineari per semplicità (cfr. Fig

Pickup

20); è possibile identificare i punti di lavoro al variare della posizione. Da questa rappresentazione semplificata si può dedurre gli effetti della **pendenza della caratteristica** di un materiale in quanto, all'aumentare della pendenza aumenta la differenza discreta di flusso tra la condizione di lavoro iniziale e quella finale. Ricordo che la variazione discreta di Induzione (ΔB), quindi di flusso, è legata alla forza elettromotrice indotta (e). In termini qualitativi un materiale con una caratteristica molto pendente (R) avrà prestazioni migliori. Questo giustifica il successo storico dei materiali AlNiCo, che infatti sono caratterizzati da un basso valore di campo coercitivo, con comunque un buon modulo di induzione residua e una caratteristica praticamente verticale nel tratto prossimo al campo coercitivo.

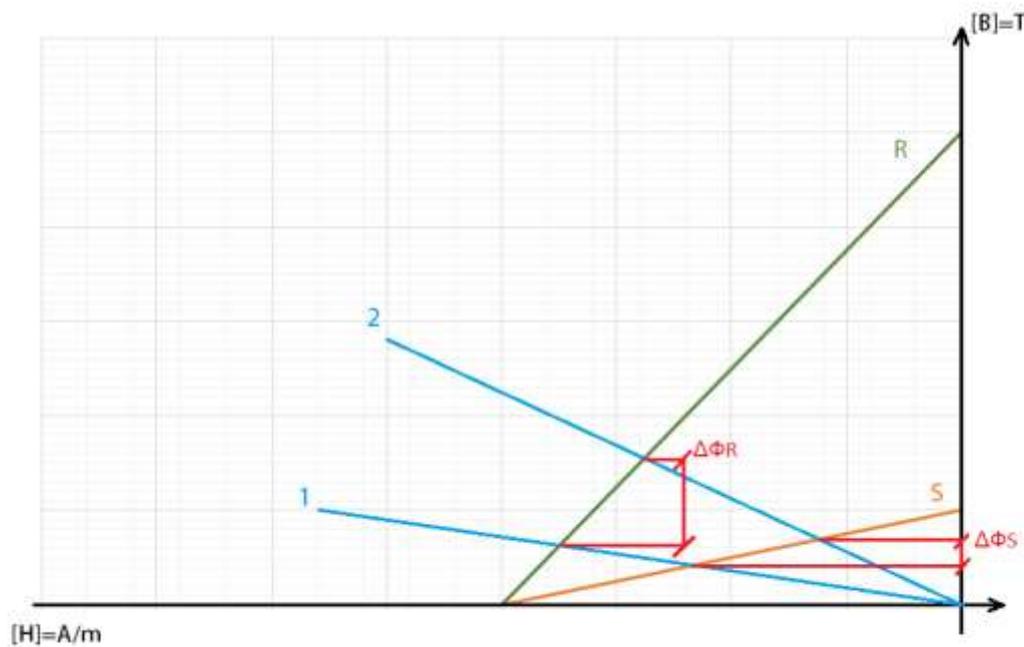


Fig 20 Punti di lavoro di due materiali con caratteristica $B(H)$ a pendenza diversa

Il grafico semplificato è esasperato per motivi di chiarezza, in realtà ci si aspetta che le variazioni discrete di flusso siano di modulo piccolissimo, visto che la variazione di traferro dovuta all'oscillazione della corda è minima rispetto a tutto il tubo di flusso del magnete.

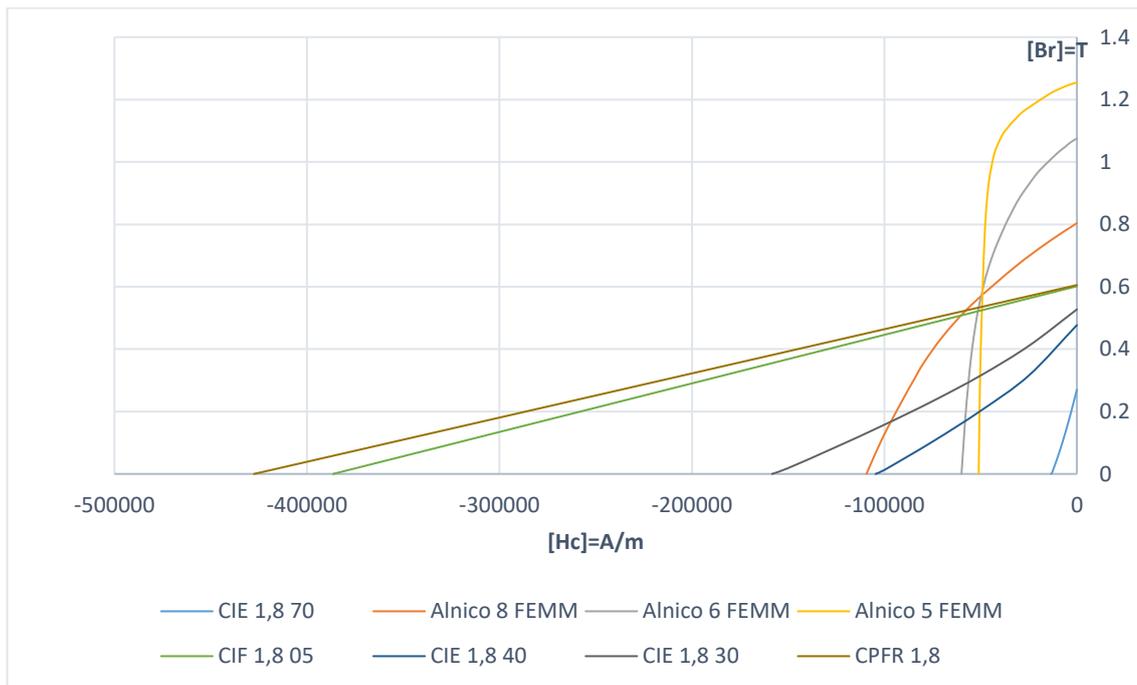


Fig 21 Caratteristiche magnetiche di alcuni materiali simulati

Facendo un paragone con alcuni dei materiali simulati, è chiaro che l'AlNiCo migliore sarà un **AlNiCo5** mentre un Plastomagnete come il CPFR 1.8 eserciterà una forza decisamente più alta. Tra gli Ibridi, all'aumentare della percentuale di Ferro puro, ci si avvicina ad una caratteristica più ripida, scendendo in modulo nel campo coercitivo. Un caso che si anticipa interessante saranno i materiali ibridi con un'alta percentuale di Ferro (e.g. CIE 1.8 70) perché anche se poveri di induzione residua presentano un campo coercitivo molto basso e una caratteristica molto verticale.

Tenendo presente la complessità delle geometrie coinvolte, il fatto che si tratta di un sistema dinamico e soprattutto che le caratteristiche dei vari materiali sono presentati in forma grafica in quanto la natura del problema è altamente non lineare; la soluzione analitica diretta porterebbe a risultati non rappresentativi della realtà quindi ho optato per l'impiego di un programma di simulazione che usa gli elementi finiti.

5. Modello matematico per il calcolo della forza

In aggiunta al problema di forza elettromotrice bisogna considerare la forza meccanica generata dal magnete sulla porzione di corda attraversata dalle linee di flusso.

La forza genericamente esercitata da un magnete di sezione A è così espressa:

$$F = \frac{\mu \cdot H^2 \cdot A}{2} = \frac{B^2 \cdot A}{\mu \cdot 2}$$

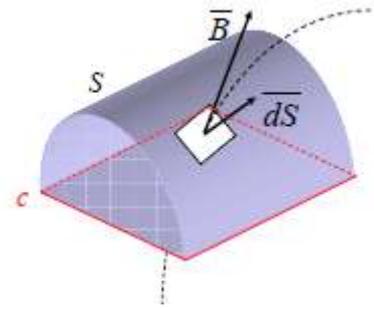
Pickup

Considerando sempre valido il legame tra induzione e campo magnetico:

$$B = \mu \cdot H$$

Sapendo inoltre che flusso è calcolato come l'integrale del prodotto scalare tra l'induzione e il versore riferito alla generica superficie S:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{dS}$$



Ipotizzando due materiali diversi, con punti di lavoro a valori di Induzione (B) simili, essendo la dipendenza dal quadrato del campo (H) un materiale con un H_{cb} più alto in modulo eserciterà una forza maggiore sulla corda. Quindi un materiale ipoteticamente valido, in quanto in grado di generare un buon valore di forza elettromotrice, in realtà eserciterà una forza meccanica talmente alta da smorzare ogni oscillazione, rendendo l'applicazione inutile.

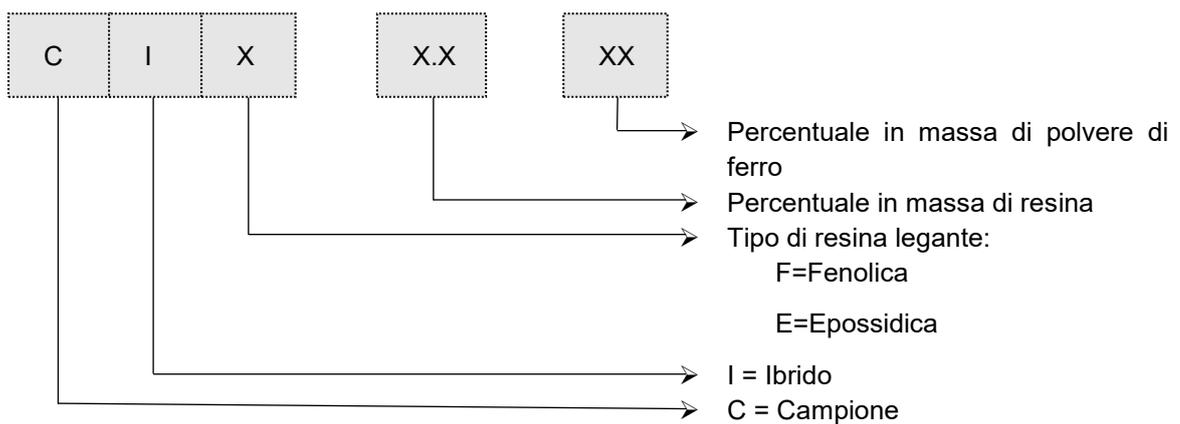
Per il calcolo della forza si ripresentano le stesse problematiche riscontrate precedentemente, di conseguenza verrà sfruttato lo stesso metodo di simulazione per risolvere anche questo calcolo.

IV. ATTIVITÀ ED ESPERIENZE PRECEDENTI

1. Lavori passati

Il Laboratorio di Ingegneria Elettrica della sede di Alessandria del Politecnico di Torino ha una vasta esperienza, maturata nel corso degli anni, nel realizzare plastomagneti con resine o materiali termoplastici. Il mio lavoro parte da quello svolto da **Donald Shabani** [6], dal quale ho ereditato una solida base dati. Mentre per quanto riguarda lo studio dei pickup nello specifico ho fatto riferimento a due altri lavori precedenti: una tesi di Laurea di **Massimo Bensi** [7] e una tesi di Tirocinio di **Pierre de Lambertye** [8]. Entrambi gli studi avevano evidenziato i Plastomagneti Ibridi come i migliori candidati per questo tipo di applicazione. In questi materiali L'aggiunta di polvere di Ferro pura, alla miscela di resina termoplastica e polvere di NdFeB porta i magneti ad assumere un comportamento molto più simile a quello degli AlNiCo, rimanendo comunque dei magneti ottenuti per pressatura e cottura, quindi con un processo molto più semplice di una fusione o una sinterizzazione.

Tra loro i campioni ibridi sono distinti in base alla composizione, con una codifica interna del laboratorio così strutturata:



Per fare un esempio, un materiale classificato come CIF 1.8 30 ha le seguenti proprietà:

- Campione Ibrido
- Legato con resina Fenolica
- 1.8% in massa di resina
- 30% in massa di polvere di Ferro
- La rimanenza è polvere di NdFeB

Rimaneva però aperta la domanda su come cambiassero le caratteristiche al variare della quantità di resina all'interno della miscela e fino a dove ci si potesse spingere con l'aggiunta di ferro puro per mantenere delle prestazioni accettabili ma riducendo i costi complessivi del materiale. Inoltre, non esisteva uno strumento in grado di valutare i materiali per l'applicazione specifica prima di procedere a realizzare dei campioni. Era comunque stata impostata una precisa metodologia di lavoro e una procedura di prova e verifica del funzionamento dei prototipi

Attività ed esperienze precedenti

realizzati ma soprattutto esisteva un bagaglio culturale sulle problematiche da risolvere per ottenere dei risultati più affidabili e rappresentativi del prototipo finale.

2. Margini di miglioramento attesi

I risultati ottenuti dai lavori precedenti erano già di un alto livello, i pickup realizzati con questi materiali restituivano un segnale con valori accettabili e un buon contenuto armonico, due caratteristiche fondamentali ricercate nei prodotti commerciali. Rimaneva il grosso capitolo aperto riguardante uno studio del **comportamento in temperatura**, per poter ipotizzare un utilizzo di questi stessi materiali in sensori ad impiego generale, per esempio come sensori in macchinari dove fosse presente una sovratemperatura non trascurabile rispetto all'ambiente. Inoltre, l'ipotesi era quella che la presenza della resina giocasse un ruolo non trascurabile e, premettendo che la presenza di un materiale plastico è fondamentale per garantire la coesione meccanica delle polveri, quindi è impossibile rimuoverla del tutto, era necessario vedere fino a dove fosse possibile spingersi per migliorare il comportamento magnetico mantenendo invariate o comunque accettabili le prestazioni meccaniche.

Essendo questa una tesi di ambito elettrico, non è stata preventivata una campagna di misurazioni meccaniche esaustive, ci si è limitati ad una constatazione di tipo qualitativo, ma in contemporanea, presso lo stesso laboratorio, sono stati svolti altri lavori di tesi da parte di miei colleghi la cui finalità era proprio la **caratterizzazione meccanica** di materiali similari, quindi posso dare comunque un'idea di come si comportino queste miscele. È comunque chiaro fin da subito che, per la natura di questo genere di applicazioni, sia il caso specifico del pickup e sia un VRS di impiego più generale, non ci si aspetta che i materiali siano in grado di resistere a sollecitazioni meccaniche particolarmente onerose. Si tratta in ogni caso di nuclei ferromagnetici inseriti all'interno di appositi supporti e circondati da spire di materiale conduttore che svolgono una funzione di sensore, quindi ci si aspetta che mantengano la propria caratteristica magnetica al variare della temperatura, dove necessario, e che non perdano la loro coesione strutturale una volta installati.

V. MODELLO FEMM

1. Introduzione

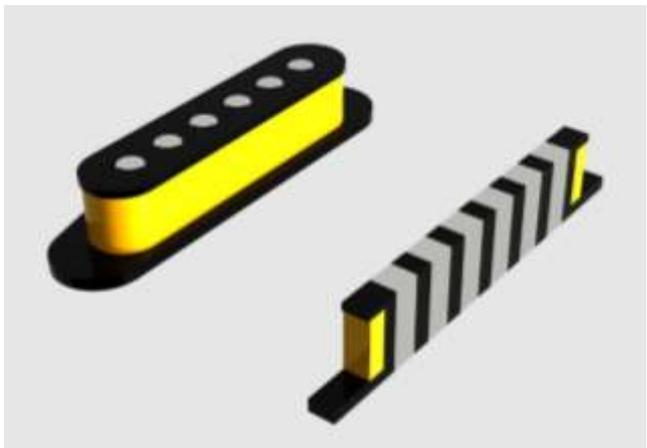
Vista la natura duale del problema l'idea è stata quella di sfruttare uno strumento reso disponibile da David Meeker [9], un Ingegnere che ha sviluppato il programma FEMM (femm.info). FEMM (da Finite Elements Method Magnetics) è un sistema di calcolo agli elementi finiti che permette di risolvere una vasta gamma di problemi elettrici, magnetici e termici in ambiente di simulazione bidimensionale.

FEMM integra gli strumenti necessari per risolvere il problema suddividendo i compiti di calcolo ed elaborazione. La schermata principale è dedicata ad uno strumento di disegno bidimensionale basilare in cui inserire la geometria, alla quale poi vanno aggiunte le proprietà dei materiali necessarie alla risoluzione del problema. La parte di suddivisione in elementi finiti (mesh) è gestita da Triangle (cs.cmu.edu/~quake/triangle) e che appunto usa elementi di geometria triangolare. Per quanto riguarda invece l'implementazione di problemi che richiedono passi successivi di calcolo o un certo grado di automazione, è disponibile il compilatore LUA (lua.org). In questo modo, una volta disegnata la geometria ed assegnate le proprietà di tutte le parti del componente, Triangle genera una distribuzione di mesh; FEMM poi va a risolvere tutti i calcoli necessari nei singoli punti, nel caso in cui ci fossero delle variazioni di proprietà o geometrie, si possono eseguire le modifiche manualmente e lanciare nuovamente la simulazione, oppure creare un codice LUA che va a modificare il problema ed eseguire tutto autonomamente. Tutti i calcoli eseguiti possono essere resi accessibili esportandoli su semplici file di testo per successive elaborazioni.

Nel caso preso in analisi da me questa procedura ha permesso di ridurre notevolmente la mole di lavoro e ottenere i risultati ricercati.

2. Ipotesi

Date le ipotesi iniziali e il fatto che fosse impossibile ottenere risultati perfettamente aderenti alla realtà, l'obiettivo che mi sono posto è stato quello di individuare la geometria che meglio si prestasse ad essere simulata in un ambiente bidimensionale. Sicuramente la sezione trasversale è quella più indicata, inoltre essendo impostabile su FEMM la profondità del modello simulato è anche possibile arrivare ad un compromesso in cui un



Modello FEMM

pickup fittizio può raggiungere un funzionamento paragonabile a quello reale. Chiaramente si è deciso di approssimare i magneti a sezione circolare con una struttura estrusa equivalente a partire dalla sezione trasversale (vedi Fig 23). Una approssimazione forte ma consapevole, in quanto sicuramente la distribuzione di campo di maggiore interesse è sicuramente quella in corrispondenza della mezzeria del pickup.

3. Disegno della struttura

Il punto di partenza è stato disegnare la geometria su FEMM. Essendo il sistema di disegno di FEMM limitato, ho fatto un disegno CAD del pezzo per poi importare il file .dxf.

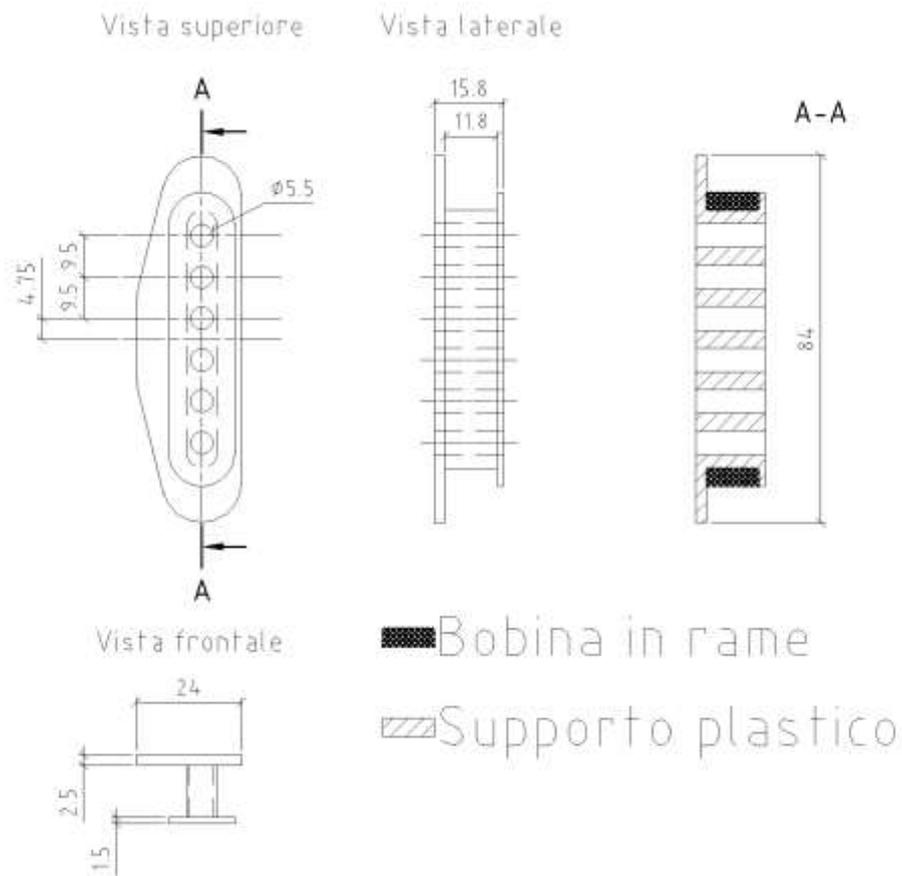


Fig 24 Disegno CAD del pickup

Alla geometria vengono poi associate le proprietà magnetiche del materiale per ogni singola area chiusa (Fig 25):

Aria e plastica: $\mu_r=1$

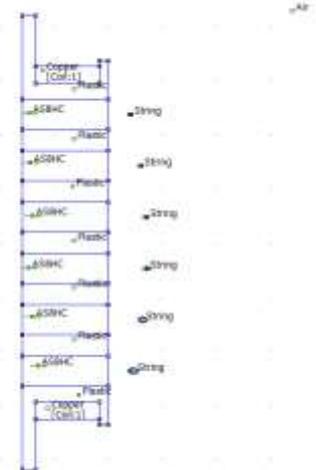
Modello FEMM

Corda: $\mu_r=1000$

Bobina di rame: $\mu_r=0.999994$

Ad ogni materiale è associabile un parametro adimensionale che determina la densità di mesh, cioè il grado di precisione della simulazione.

Alla sezione A-A ho aggiunto le corde, ipotizzate omogenee di acciaio con diametri, a partire dalla più sottile, di 0.254mm, 0.330 mm, 0.432 mm, 0.762 mm, 1.067 mm, 1.321 mm, corrispondenti ad una scalatura 10-52.



4. Sviluppo dell'ambiente di simulazione

La prima versione (a) del programma (vedi Fig 26) era composta dal modello immerso in una grande sezione circolare di aria con raggio circa 10 volte lo spessore della sezione trasversale. In prima approssimazione si pensava che la porzione di aria fosse sufficiente, ma l'elaborazione ha mostrato che alcune linee di campo non si richiudevano all'interno dell'area. Si noti che FEMM all'esterno dell'area simulata applica delle condizioni al contorno approssimate tramite un sistema di calcolo analitico (ABC).

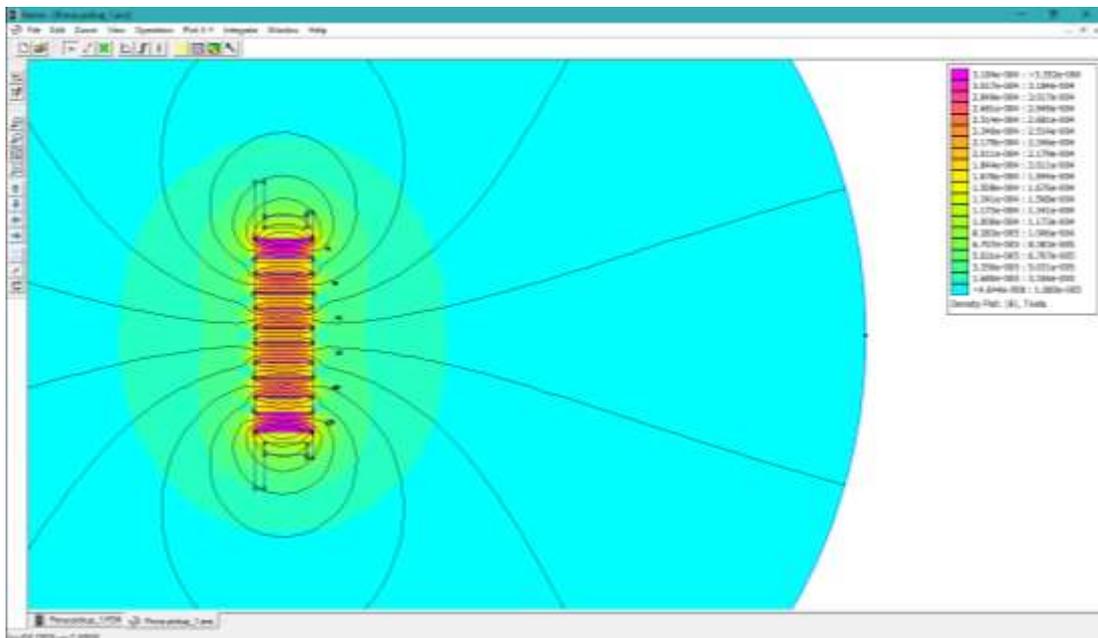


Fig 26 Simulazione FEMM, prima versione (a)

Non essendo accettabile questo comportamento è stata scelta come seconda alternativa (b) un ambiente più ristretto (Fig 27), quindi meno esoso in termini di calcolo a parità di densità di mesh, con delle condizioni al contorno iABCs più specifiche, dette di Neumann, questo è uno strumento

Modello FEMM

che è stato inserito più avanti nel pacchetto di FEMM. L'area esterna viene racchiusa da una serie di anelli con proprietà magnetiche calcolate internamente dal programma ma che permettono di indirizzare tutte le linee di campo all'interno della simulazione ottenendo la precisione massima possibile e riducendo drasticamente il numero di mesh da applicare, essendo diminuita l'area. Le caratteristiche di questi anelli sono alternate e assimilabili a quelle di anelli concentrici di aria e materiale ferromagnetico, che permettono una rifrazione delle linee di campo e una richiusura su un percorso molto più corto (Fig 28).

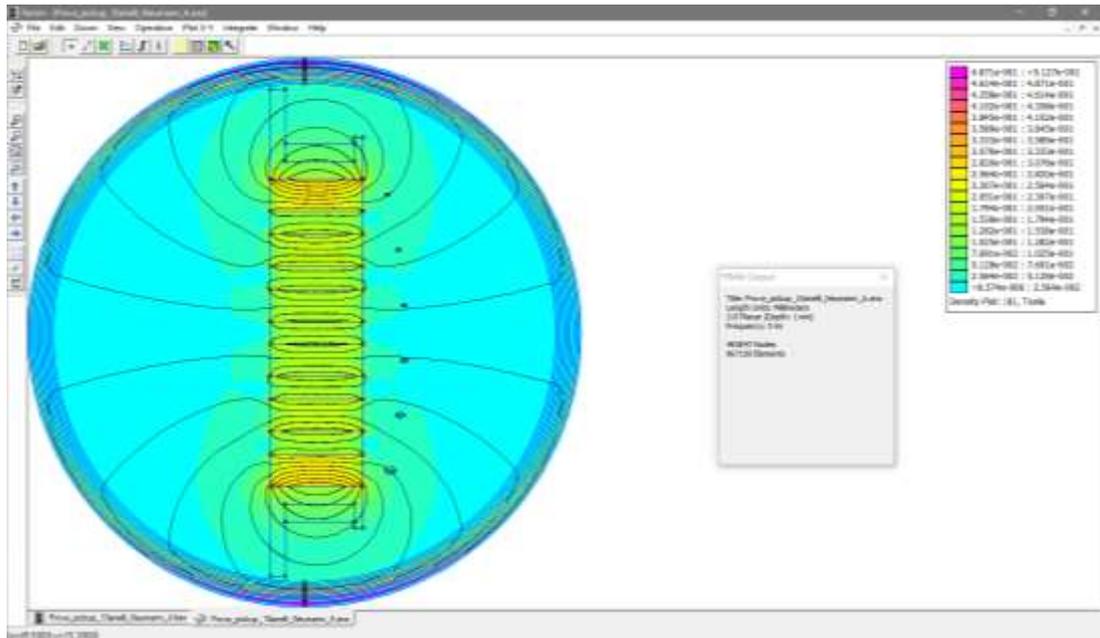


Fig 27 Simulazione FEMM, seconda versione (b) con condizioni al contorno di Neumann

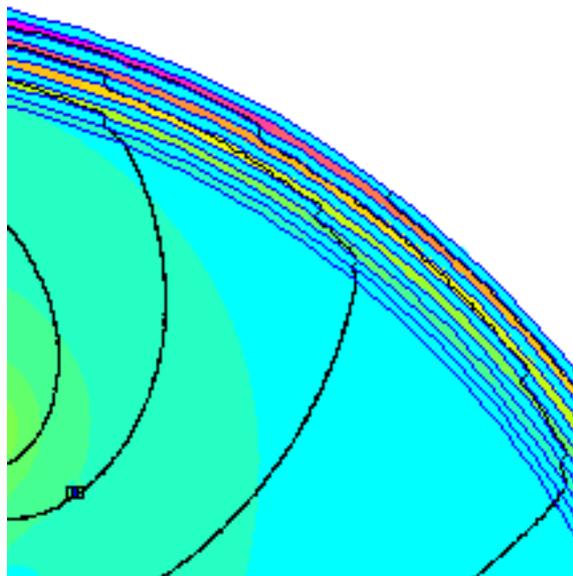


Fig 28 Dettaglio del fenomeno di rifrazione delle linee di campo

La prima simulazione (a) si è rivelata da subito non utilizzabile in quanto i valori molto piccoli di flusso concatenato ($\approx 10^{-11}$ Wb) causavano problemi di quantizzazione dell'errore.

Modello FEMM

I problemi di **quantizzazione** generalmente si associano al metodo di calcolo, essendo l'intero spazio di simulazione suddiviso in un numero elevato di porzioni, le mesh appunto, in questo caso la sezione della corda era di dimensione paragonabile ad un numero non elevato di mesh, quindi al suo spostamento vi erano grandi variazioni di flusso concatenato ricavando quindi una forma d'onda non ben raccordata. Riporto un esempio per chiarezza:

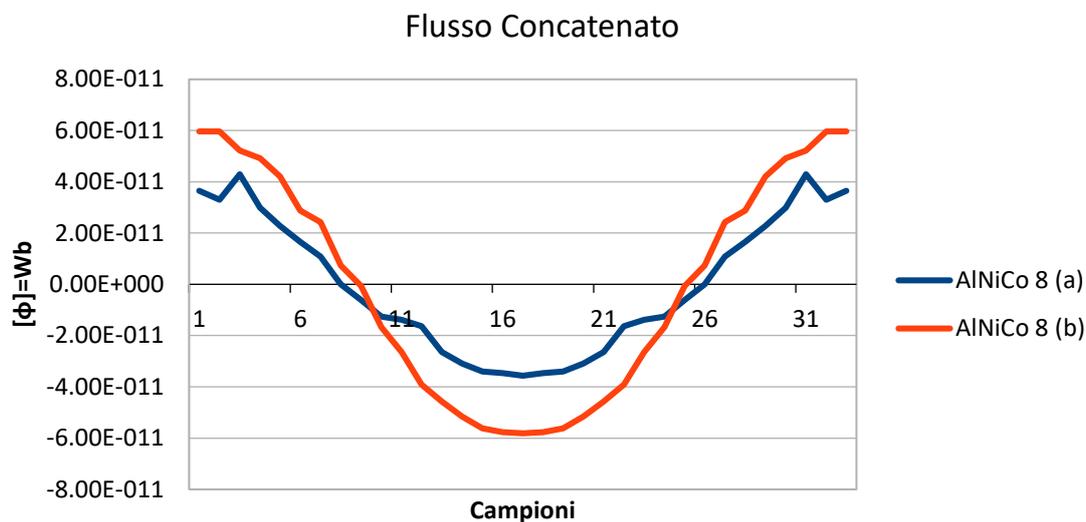


Fig 29 Flusso concatenato per AlNiCo8 calcolato con o senza condizioni al contorno di Neumann

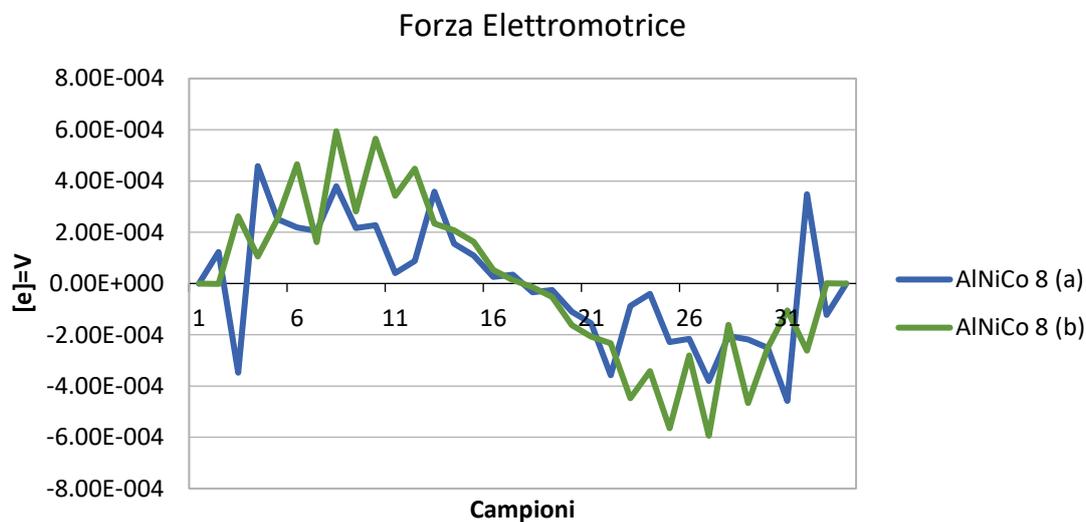


Fig 30 Forza elettromotrice calcolata per AlNiCo8 con o senza condizioni al contorno di Neumann

Nell'immagine (Fig 29) è possibile vedere la differenza tra i flussi concatenati ottenuti dalle due simulazioni, si nota una discreta differenza in termine di ampiezza della prima armonica, inoltre una discontinuità nella curva a. Questa piccola discontinuità comporta un effetto non trascurabile nel calcolo della FEM, infatti nell'immagine (Fig 30) è possibile vedere come vengano a crearsi degli ulteriori passaggi per lo zero che in realtà non esistono e inoltre la forma d'onda è meno comprensibile, paragonata con la curva b.

Modello FEMM

Ad una prima approssimazione le due curve potrebbero sembrare inutilizzabile o poco rappresentative, ma questo grado di precisione è stato ritenuto accettabile nella prima fase di simulazione per poter simulare una grande famiglia di materiali in tempi relativamente brevi. In ogni caso comunque il valore picco-picco di questa forma d'onda non è molto distante dal valore picco-picco della sua prima armonica.

Una terza versione opportunamente modificata della simulazione (c) è stata lanciata solo al termine del lavoro di laboratorio. L'obiettivo era quello di validare il modello paragonando direttamente i valori e le forme d'onda ottenuti con quelli risultanti dalla prova del pickup reale. Per semplicità riporto un diagramma per evidenziare le differenze tra le varie simulazioni e le rispettive prove svolte:

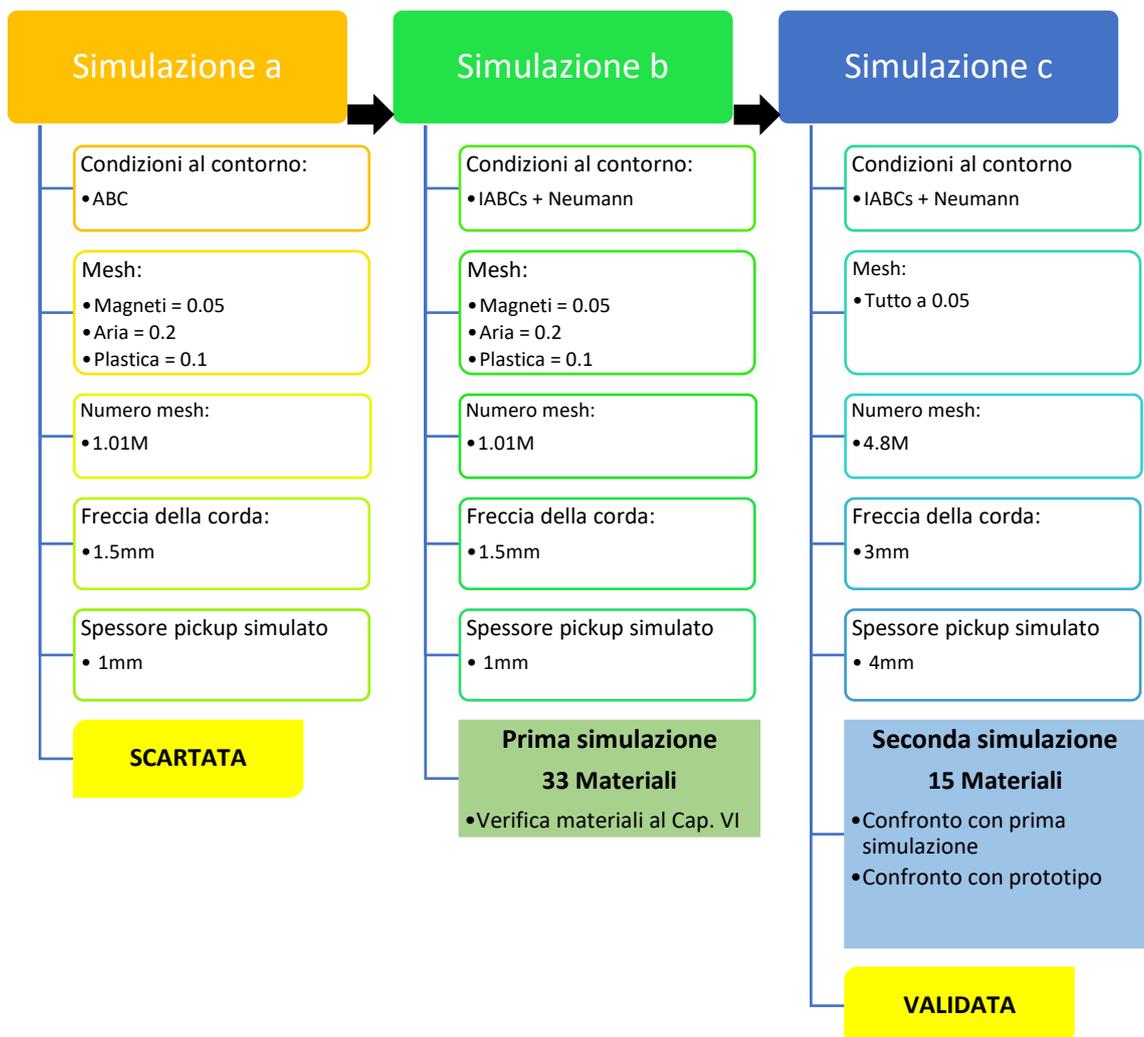


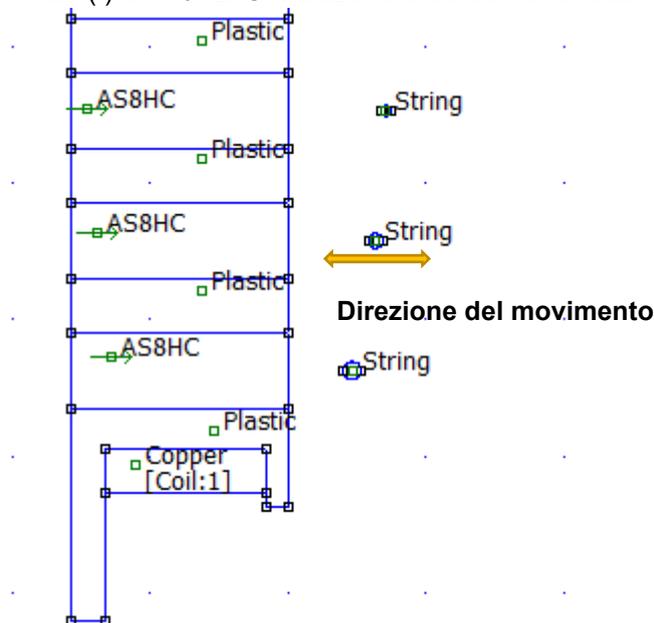
Fig 31 Distinzione tra le simulazioni

5. Tipi di simulazione

Essendo il problema meccanico e quello elettrico non conciliabili nella stessa simulazione si è deciso di scorporare il problema in due sotto problemi. In entrambi i casi però è stato deciso di limitare il numero di variabili e semplificare il problema vincolando l'oscillazione della corda al solo piano perpendicolare ai magneti. Del resto, se si considera il singolo magnete, essendo la geometria a simmetria cilindrica, gli effetti sull'asse perpendicolare saranno concettualmente gli stessi. Una corda in realtà quando è messa in vibrazione non si muove su di un solo piano ma avrà un movimento oscillatorio scomponibile su tre assi cartesiani ma sicuramente molto complesso da studiare. L'onda stazionaria legata alla nota emessa sarà una conseguenza della lunghezza stessa della corda ma a questa si aggiunge un movimento rotatorio della corda, dovuto al fatto che non viene mai percossa nello stesso modo quando suonata. Questo moto rotatorio è lungo un'ellisse, per giunta non simmetrica in quanto la velocità della corda è soggetta ad uno smorzamento funzione della distanza dal magnete. Tutta questa premessa serve a giustificare la scelta di dare una sola direzione di oscillazione per la corda, in quanto il lavoro di simulazione ha come scopo quello di avere dati confrontabili relativi ad una vasta gamma di materiali, non è mia intenzione creare un modello perfetto della realtà in quanto le variabili sono talmente tante da rendere il lavoro di simulazione fine a sé stesso.

Forza Elettro Motrice

La corda scelta per la simulazione è la seconda, che corrisponde alla **nota La** (A_2) con frequenza nominale (f) di 110Hz. Una sezione di corda viene fatta muovere con andamento sinusoidale di

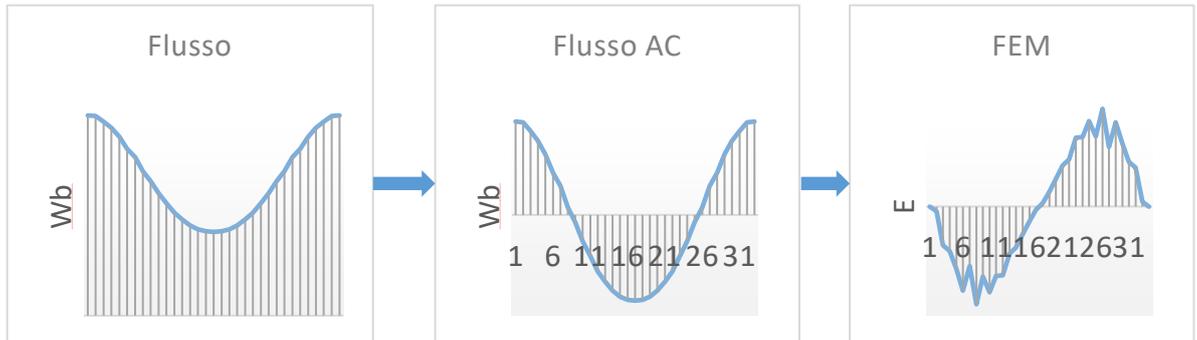


ampiezza 1.5mm lungo l'asse orizzontale, dividendo l'oscillazione tra il massimo e il minimo in 16 passi di simulazione (k) e andando poi a lanciare il calcolo della forza elettromotrice ad ogni passo. Una volta calcolati i valori per metà movimento basta ribaltare i valori per ottenere la forma d'onda completa, ricopiando tutti i valori tranne l'ultimo.

Modello FEMM

Quello che ci si aspetta è un andamento di flusso pseudo-sinusoidale e con un valor medio diverso da zero. Il fatto che la sinusoide non sarà perfettamente simmetrica sarà dovuto alla diversa influenza del magnete a seconda della distanza.

Ottenuto ad ogni passo (k) un valore di flusso concatenato, vado ad applicare la legge di Lenz nella sua forma discreta, ipotizzando un avvolgimento composto da 10^4 spire (N):



$$e(t) = -N \frac{\partial \varphi}{\partial t} \cong -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta T} = -N \frac{(\Phi_k - \Phi_{k-1})}{\Delta T}$$

Con ΔT calcolato per un periodo di oscillazione (f^{-1}) diviso in 32 passi di simulazione (Z):

$$\Delta T = \frac{1}{Z \cdot f} = 2.84 \cdot 10^{-4} s$$

Questi calcoli saranno successivamente eseguiti su fogli di calcolo Excel per accelerare le operazioni di simulazione. I valori tipici di FEM per un pickup single coil sono tipicamente nell'ordine di qualche mV, valori paragonabili a quelli trovati nelle simulazioni.

Forza meccanica

La stessa corda è spostata lungo lo stesso asse in posizioni equidistanziate, per calcolare la forza esercitata dal magnete, la freccia scelta è di 1.5mm considerati positivi e negativi prendendo come zero la posizione a riposo.

Ci si aspetta in questo caso una serie di valori che andrà decrescendo all'aumentare della distanza, tendendo asintoticamente a zero per distanze che tendono all'infinito.

Nel caso della forza, FEMM già possiede il sistema di calcolo integrale per calcolarne il modulo, quindi i valori non dovranno essere successivamente elaborati.

6. Programmazione LUA

I due problemi così ottenuti sono da dividersi in un numero intero di passi di simulazione, da ripetere secondo un ciclo per simulare l'andamento nel tempo. Per fare questo si sfrutta la

programmazione LUA di FEMM, dando gli opportuni cicli FOR è possibile spostare la corda nelle posizioni volute e andare ad effettuare i calcoli necessari.

Allego in appendice (rif. Appendice A: Programmazione LUA) il codice completo utilizzato per le due simulazioni.

7. Risultati

Una volta approvato questo metodo, è stata avviata una prima campagna di simulazioni su una popolazione composta da 33 materiali così suddivisi:

- 3 Materiali AlNiCo contenuti nella libreria di FEMM: AlNiCo 5, AlNiCo 6 e AlNiCo 8
- 24 Materiali caratterizzati nei lavori di tesi precedenti (Plastomagnetri ibridi e tradizionali)
- 6 Materiali AlNiCo commerciali, 3 fusi e 3 sinterizzati [10]

Forza Elettro Motrice

Le simulazioni hanno dato ottimi risultati e i primi dubbi relativi ai problemi di quantizzazione sono stati eliminati dalle forme d'onda e valori ottenuti. Riporto i risultati ottenuti per un plastomagnete tradizionale CPF 10 (90% NdFeB e 10% resina fenolica).

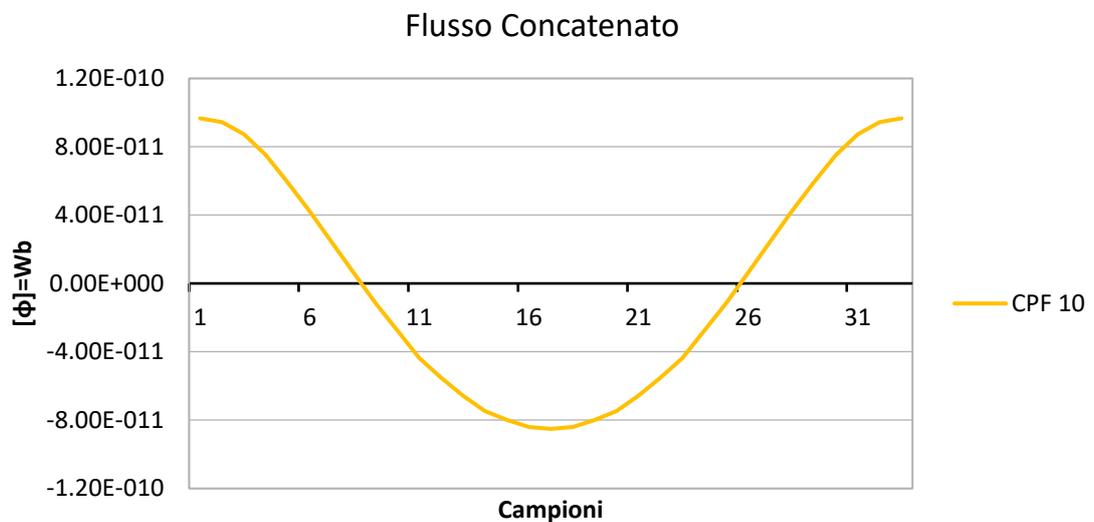


Fig 34 Andamento del flusso concatenato per il materiale CPF10 (simulazione b)

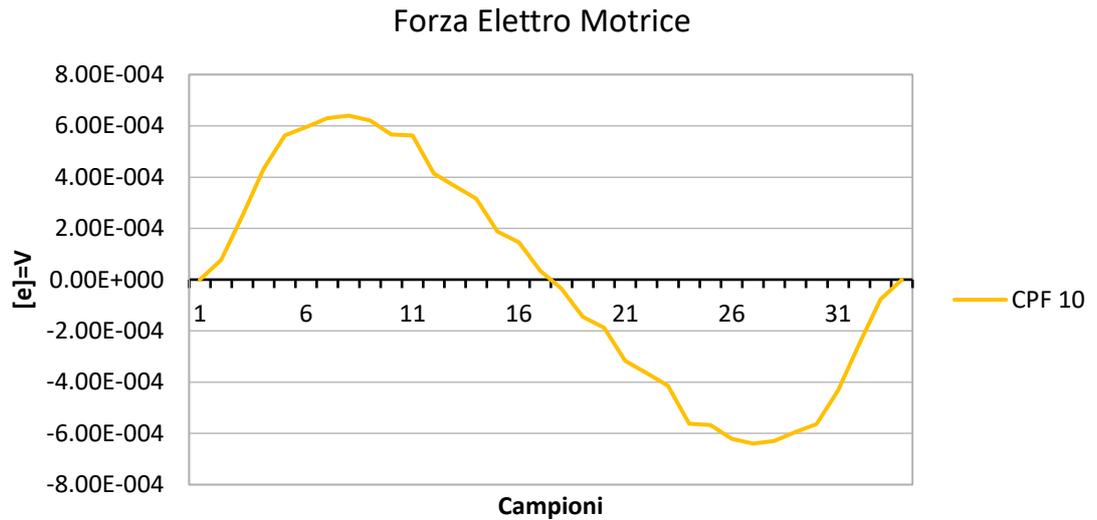


Fig 35 Andamento della Forza Elettromotrice per il materiale CPF10 (simulazione b)

Si noti la forma d'onda pseudo cosinusoidale di flusso, con la semionda superiore più pronunciata a causa della vicinanza della corda al magnete; che comporta una distorsione della Forza Elettromotrice. In generale sono stati ottenuti valori accettabili compresi approssimativamente tra 0.2 e 3mV.

Una volta verificato che tutti i materiali avessero una forma d'onda accettabile ho elaborato tutti i risultati, che qui riporto in un grafico riassuntivo per semplicità, caratterizzando tutti i materiali per i valori picco-picco di flusso (Φ_{pkpk}) così calcolato:

$$\Phi_{pkpk} = MAX[\Phi_k] - MIN[\Phi_k]$$

Analogamente per la Forza Elettromotrice (U_{pkpk}).

$$E_{pkpk} = MAX[E_k] - MIN[E_k]$$

Modello FEMM

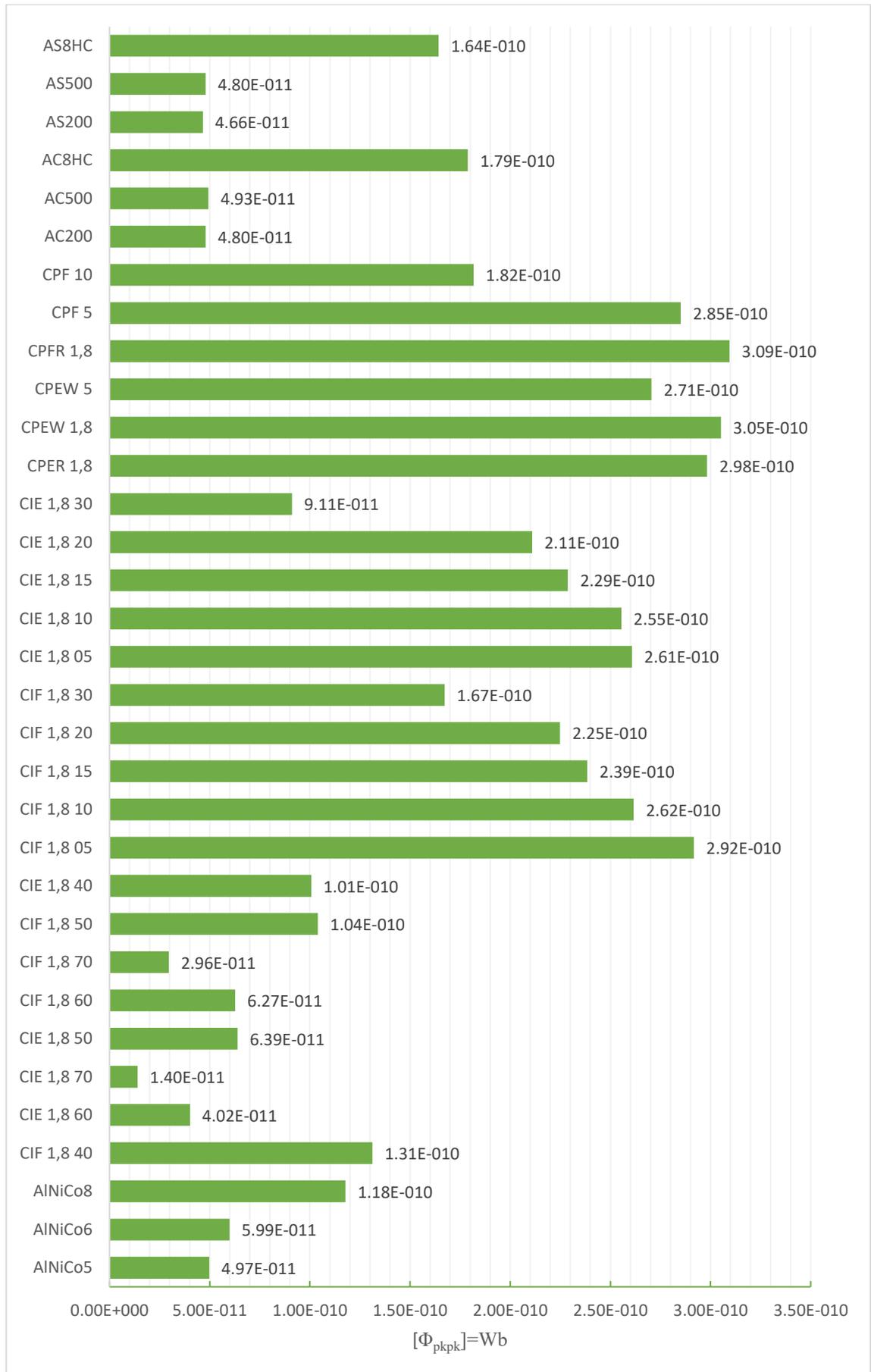


Fig 36 Istogramma di tutti i valori di flusso concatenato

Modello FEMM

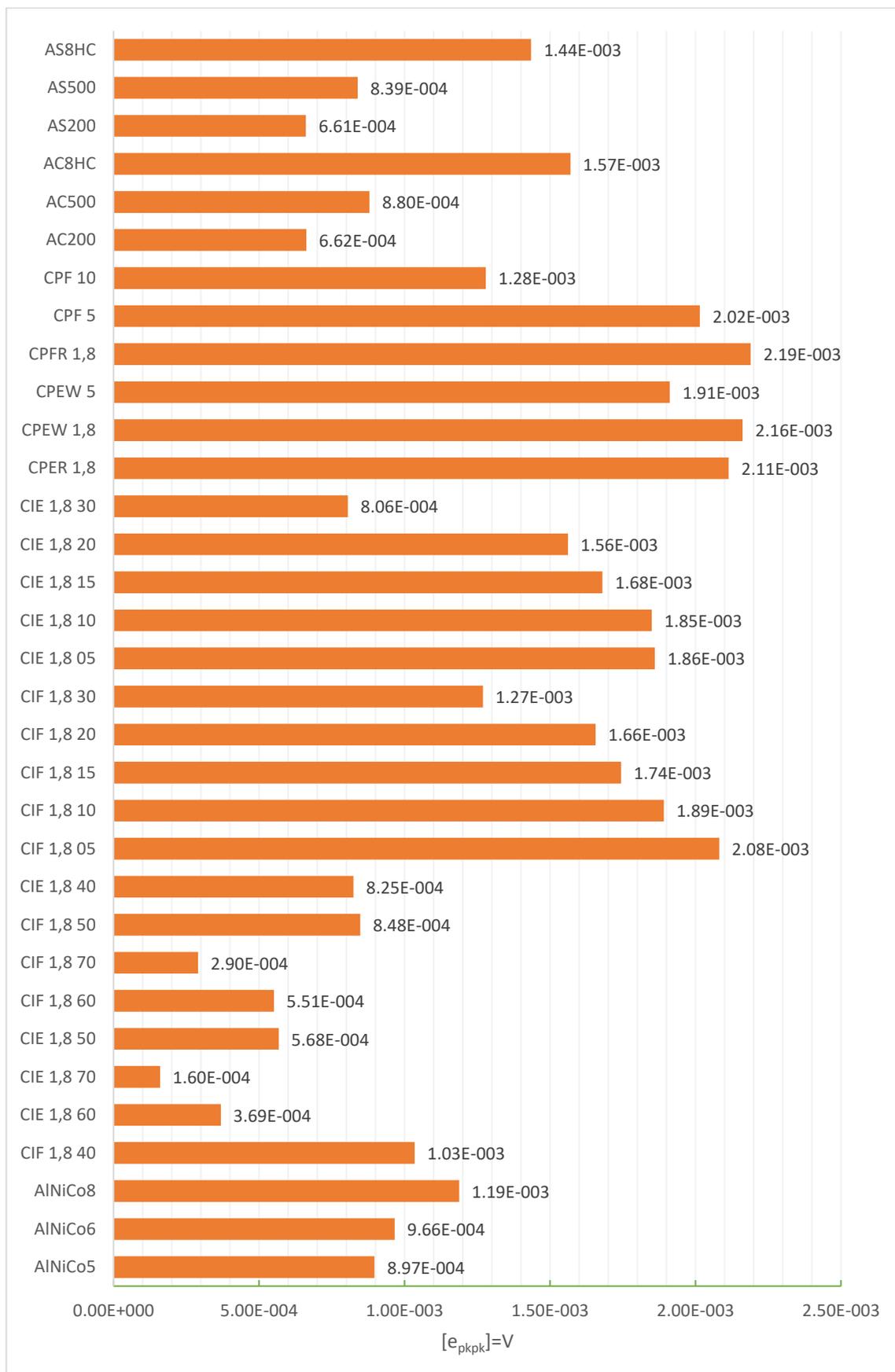


Fig 37 Istogramma di tutti i valori di Forza Elettromotrice

Forza meccanica

La forza meccanica invece è più semplice da elaborare in quanto, una volta confermato l'andamento, è bastato simulare il valore di forza per il punto più vicino alla corda che corrisponde al valore massimo di forza. Il grafico riportati valori negativi perché il versore di calcolo di FEMM considera la direzione verso il pickup come negativa.

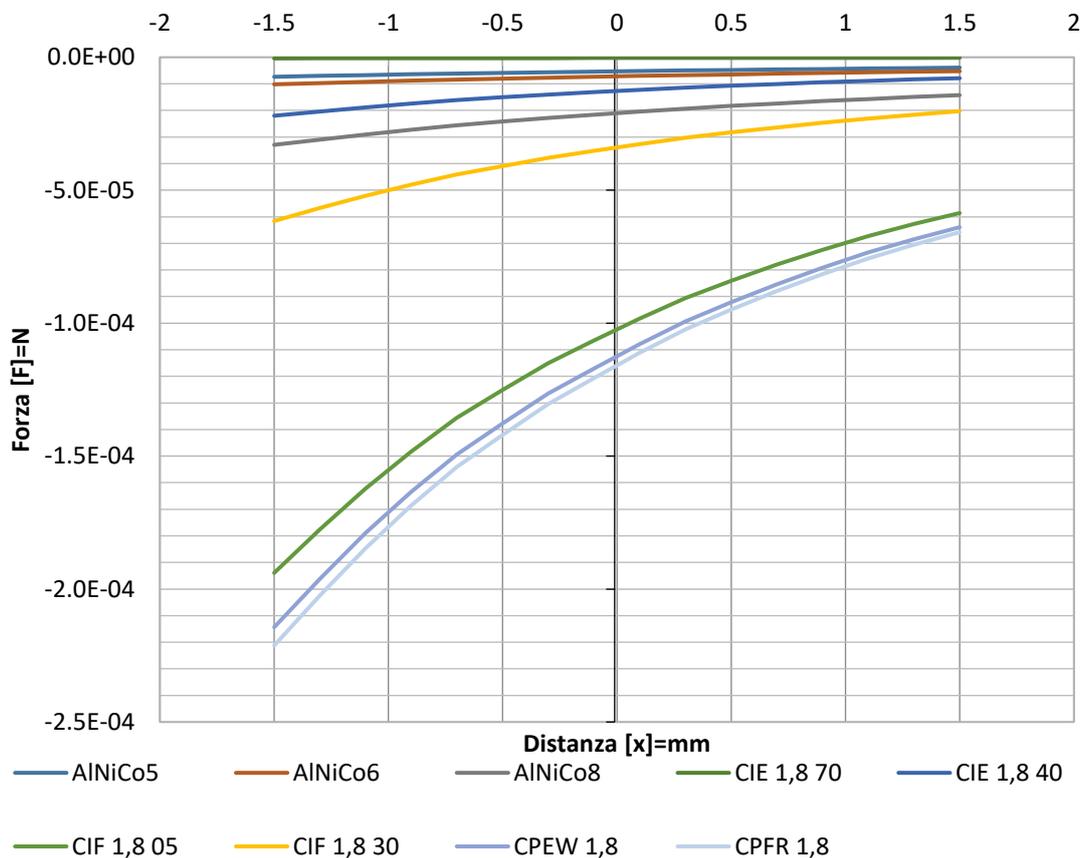


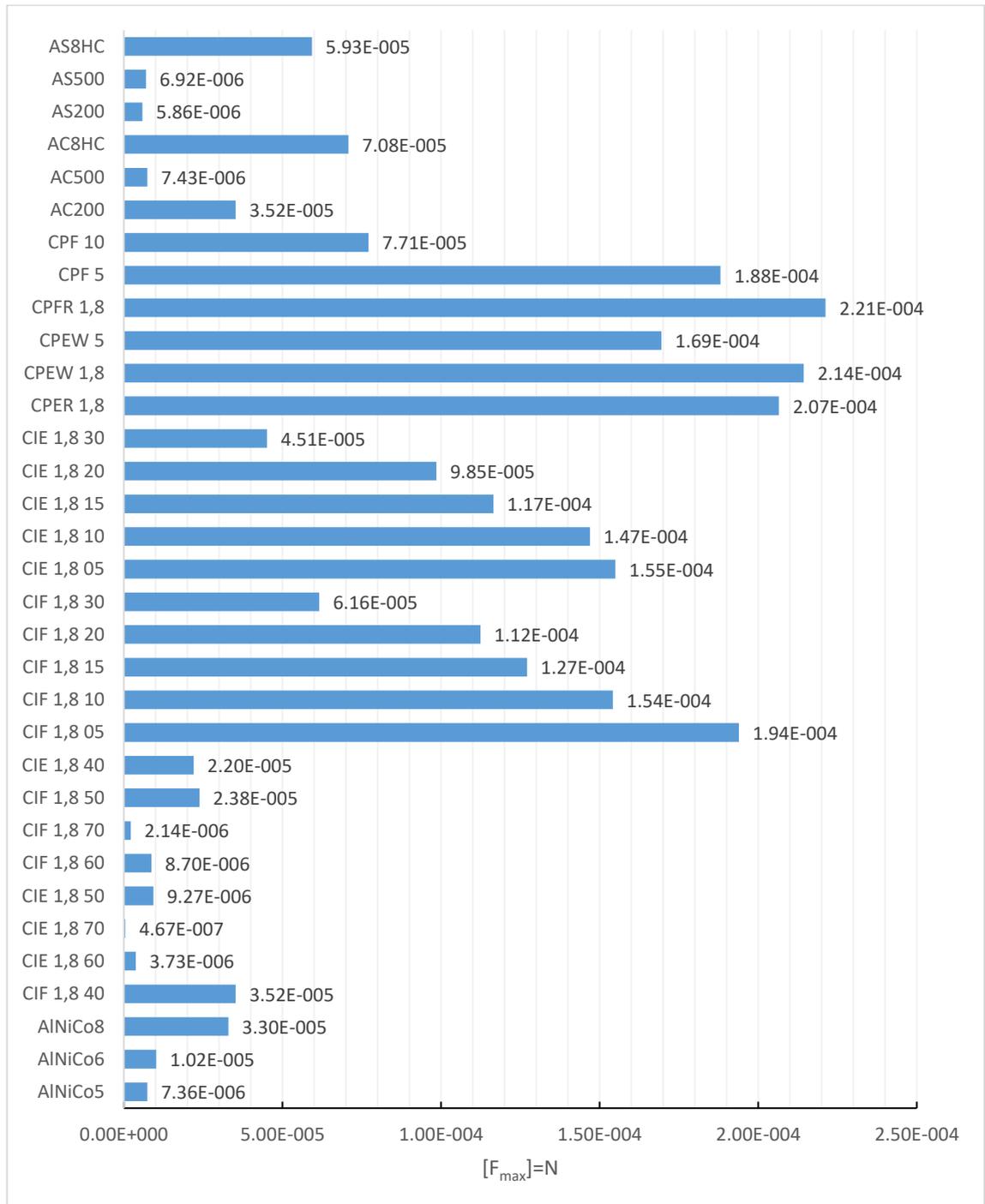
Fig 38 Andamento della forza meccanica in funzione della distanza

Si nota l'andamento asintotico verso zero e la grande differenza tra i materiali, in alcuni casi separati da uno o più ordini di grandezza, addirittura il CIE 1.8 70 sembra coincidere con l'asse delle ordinate in questa scala di rappresentazione.

Il decadimento della forza esercitata è molto marcato, si parte da una riduzione di 2 volte per arrivare ad oltre 3 volte per i materiali con alti valori (e.g. CPFR 1.8). Si conferma quindi che per poter fare un confronto tra tutti i materiali basta avere il valore massimo della forza.

Considerati tutti e 33 i materiali i valori di forza massimi sono i seguenti:

Modello FEMM



8. Confronti

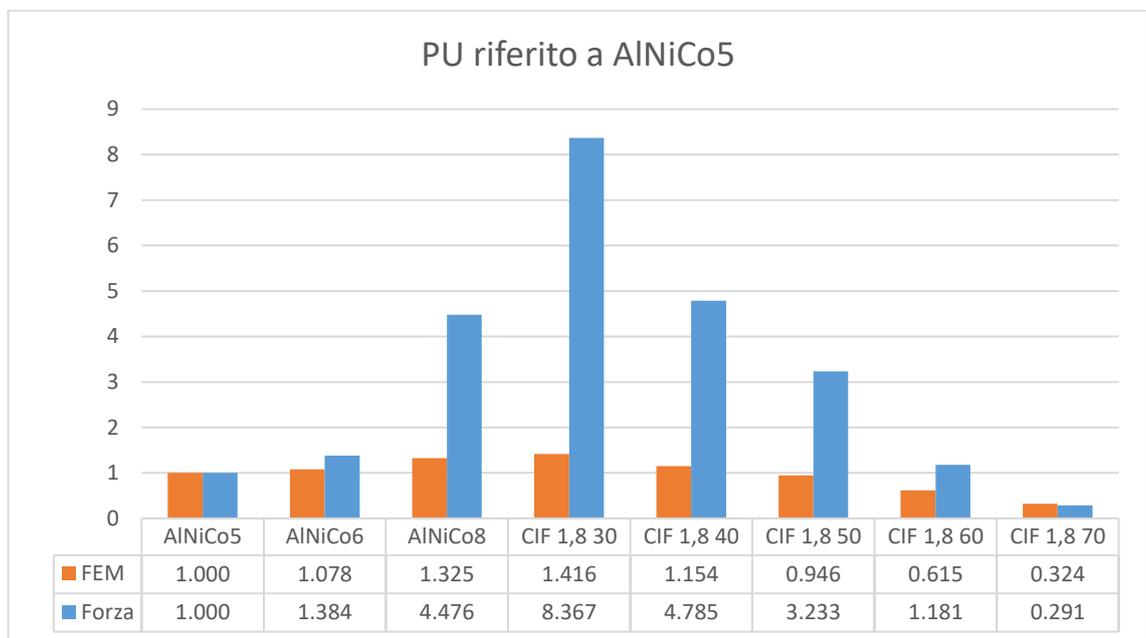
Si conferma la dipendenza di forza meccanica e forza elettromotrice dal campo coercitivo, inoltre si confermano le prestazioni interessanti dei plastomagnetri ibridi con una percentuale di Ferro compresa tra il 30 e il 70%. In particolare, i 30% si erano già evidenziati come ottimi materiali per pickup ma i magneti con il 70% di ferro potrebbero essere interessanti per applicazioni sensoristiche ad alta sensibilità in cui è richiesto un disturbo minimo dell'applicazione, in quanto la forza esercitata è di due ordini di grandezza inferiore a quella di un AlNiCo 5. In generale comunque si parla di meno di 1mN, una forza difficilmente misurabile.

Modello FEMM

Da questa campagna di misure, che ha richiesto parecchie settimane, ho isolato la prima famiglia di materiali da tenere come riferimento e sui cui apportare modifiche. Dai dati ottenuti è possibile ipotizzare che i materiali ideali siano quelli con una buona induzione residua ($B_r > 0.5T$) e bassi campi coercitivi ($H_{cb} > -150kA \cdot m^{-1}$), questo per andare a mimare le caratteristiche di un AlNiCo, nel tratto a bassa induzione. Inoltre, si è deciso di scartare arbitrariamente tutti i materiali che esercitano una forza superiore a 0.1mN, (e.g. tutti i plastomagnet non ibridi).

Si è scelto inoltre di concentrarsi sui magneti legati solo da resina fenolica, in quanto la resina epossidica richiede un processo più oneroso.

In maniera da rendere più fruibili i dati elaborati, l'AlNiCo 5 contenuto nella libreria FEMM fungerà da base del sistema di riferimento per il resto della tesi. Quindi ove necessario riporterò sempre i grafici in Per Unità.



Si può osservare l'aumento minimo delle prestazioni per i tre AlNiCo mentre l'effetto dell'aggiunta di polvere di Ferro alla miscela causa una drastica riduzione di forza meccanica ed elettromotrice. Dalle esperienze precedenti è già noto che il CIF 1.8 30 fosse adatto all'utilizzo per pickup, quindi anche se la forza meccanica esercitata risulta essere più di 8 volte quella di un AlNiCo5 questo dato non sembra essere così influente. Il CIF 1.8 40 si presenta come valida alternativa.

Simulazione C

Come già anticipato a pagina 22 i modelli sono state via via migliorati. La versione C è nata a seguito dei risultati di laboratorio quando, per una fortunata coincidenza, si è resa disponibile una workstation con capacità di calcolo sufficiente da permettere di elaborare modelli con un numero di mesh molto superiore a quelli precedenti.

Modello FEMM

Dopo vari tentativi si è scoperto che andando ad aumentare la freccia della corda e aumentando lo spessore del problema si riuscivano ad ottenere risultati prossimi a quelli delle prove fisiche sui prototipi. L'aumento di freccia è stato implementato solo per la simulazione di forza elettromotrice, dove l'obiettivo era quello di migliorare la forma d'onda. Del resto, la freccia di 1.5mm e lo spessore del pickup di 1mm erano scelte fatte in partenza del tutto arbitrarie in quanto non si voleva simulare il comportamento di un prototipo reale ma avere un termine di confronto tra materiali molto diversi tra loro. Il fatto che con opportune modifiche il modello FEMM ricalcasse così bene le forme d'onda del prototipo era un chiaro segno di quanto il modello di partenza fosse molto affidabile.

La somiglianza ottenuta tra le simulazioni e le prove eseguite sul prototipo è notevole, la stessa forma d'onda è distinguibile in entrambi i casi mentre i valori di picco si discostano circa di un fattore 10, ma non ci si aspettava in ogni caso una sovrapposizione perfetta.

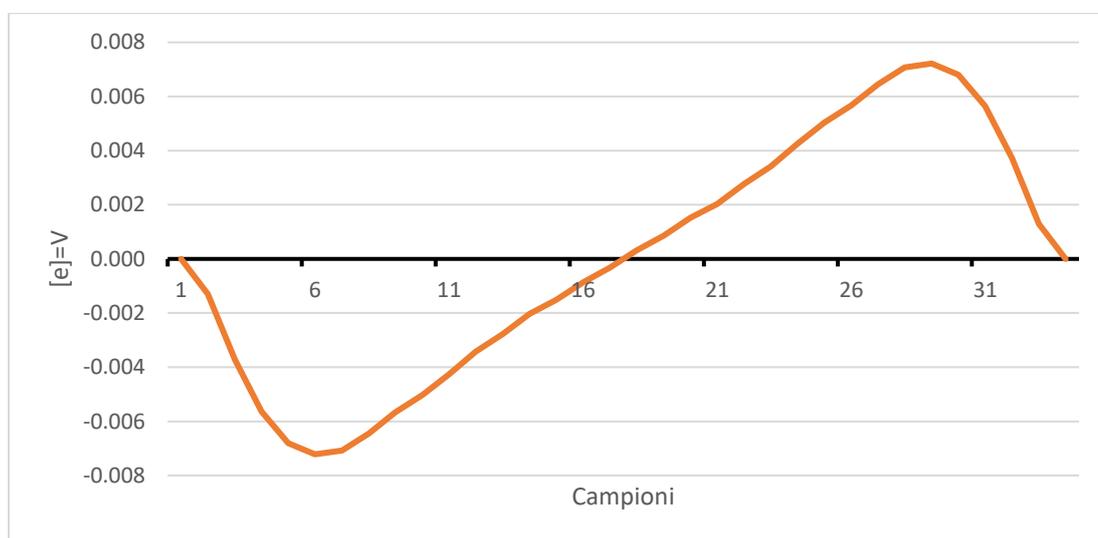


Fig 39 Simulazione CIF 0.8 30 su FEMM

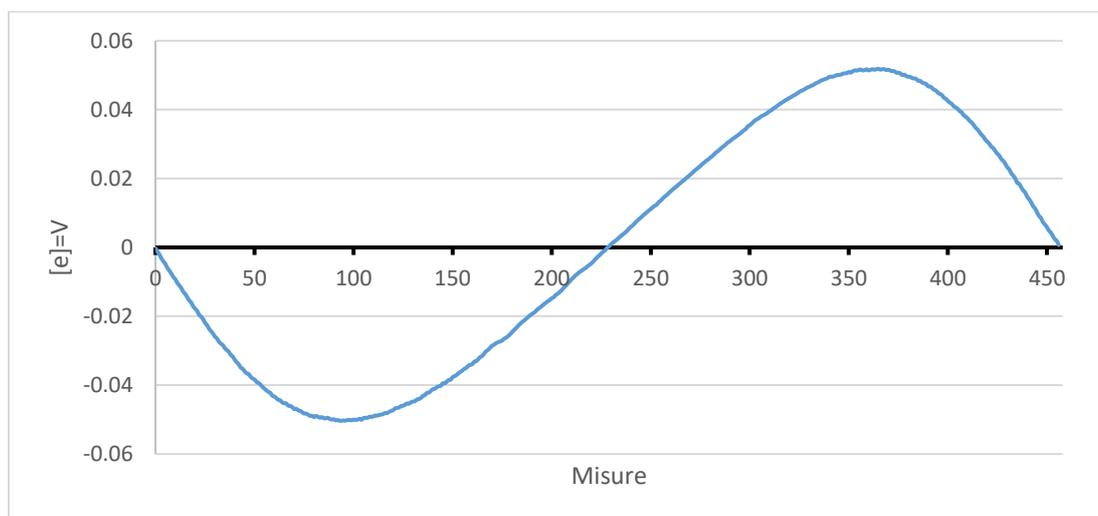


Fig 40 Prova CIF 0.8 30 su prototipo reale

Modello FEMM

Per la simulazione finale è stata scelta una gamma di materiali scartando quelli meno interessanti, inclusi alcuni che non ho ancora presentato in quanto saranno il nucleo del lavoro descritto nei prossimi capitoli, comunque si tratta sempre di plastomagneti ibridi. Ottenendo i seguenti risultati di FEM e Forza meccanica, sempre riferiti in PU ai valori di AlNiCo5.

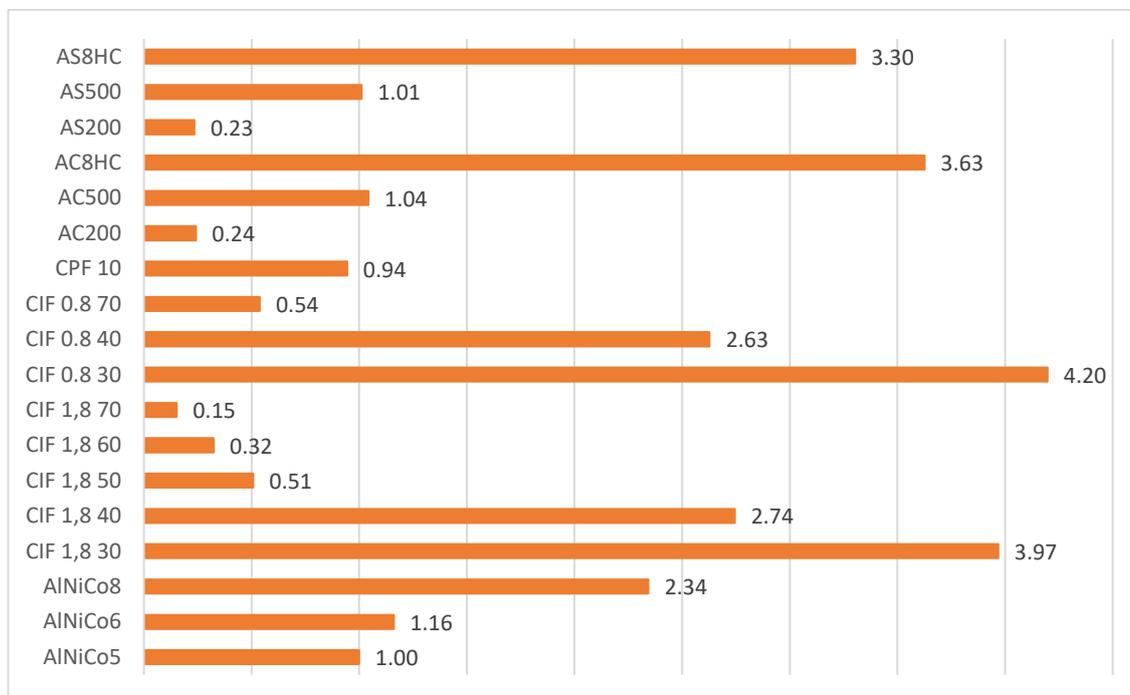


Fig 41: Istogramma in PU della Forza Elettromotrice

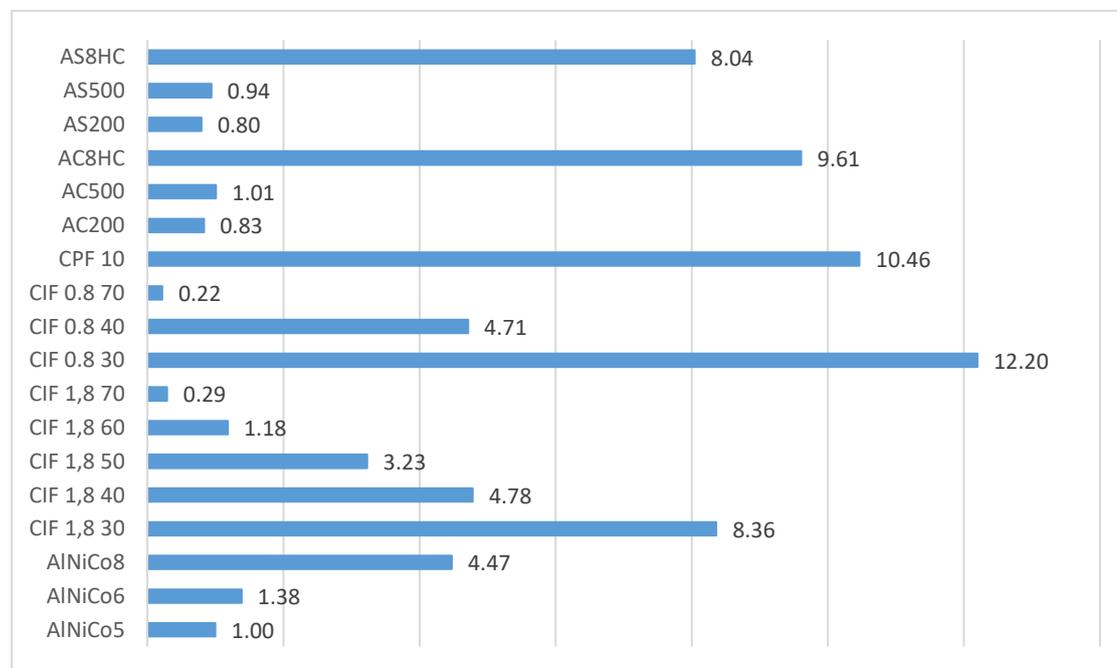


Fig 42 Istogramma in PU della forza meccanica

Per verifica che il modello rimanesse valido dopo aver modificato un discreto numero di variabili, ho fatto un confronto tra i valori calcolati nella simulazione b e quelli nella simulazione c.

Modello FEMM

Per quanto riguarda la forza meccanica il confronto è semplice, in quanto essendo dipendente dall'area è necessario solo eseguire una divisione per ottenere un confronto, in generale posso scrivere che:

$$F_{(c)} = 4 \cdot F_{(b)}$$

Con in pedice, tra parentesi, indicata la simulazione utilizzata per calcolarla.

Per quanto riguarda invece la forza elettromotrice il problema è più complesso. L'aumento di profondità quindi di area moltiplica per 4 i risultati, ma a questo fattore bisogna aggiungere una ulteriore correzione, in quanto l'aumento della freccia comporta una distorsione della forma d'onda e di conseguenza i dati sono meno confrontabili ma comunque buoni.

Per poterli confrontare ho eseguito i rispettivi calcoli per tutti i materiali simulati, riportati nei grafici successivi:

$$\Delta F = \frac{F_{\max(c)}}{4 \cdot F_{\max(b)}} \quad \Delta E = \frac{E_{pkpk(c)}}{4 \cdot E_{pkpk(b)}}$$

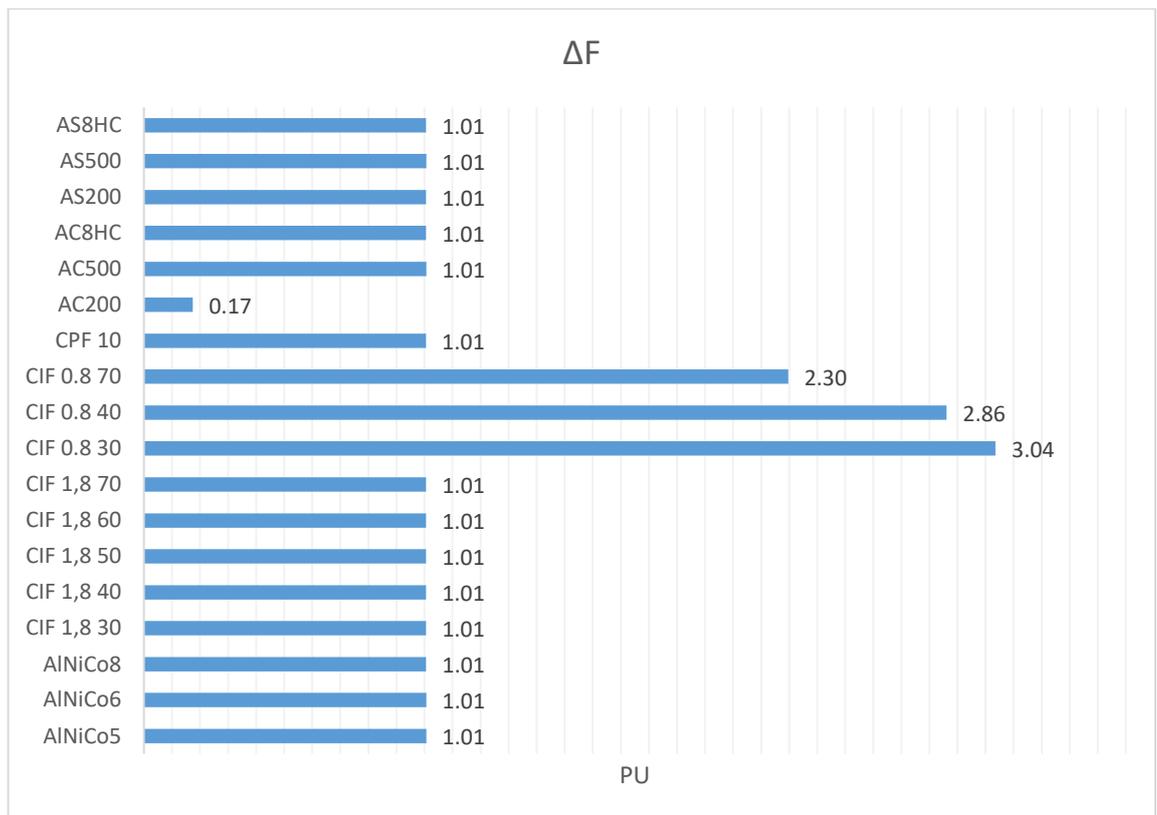


Fig 43 Errore sul calcolo della forza meccanica tra simulazione b e c

Modello FEMM

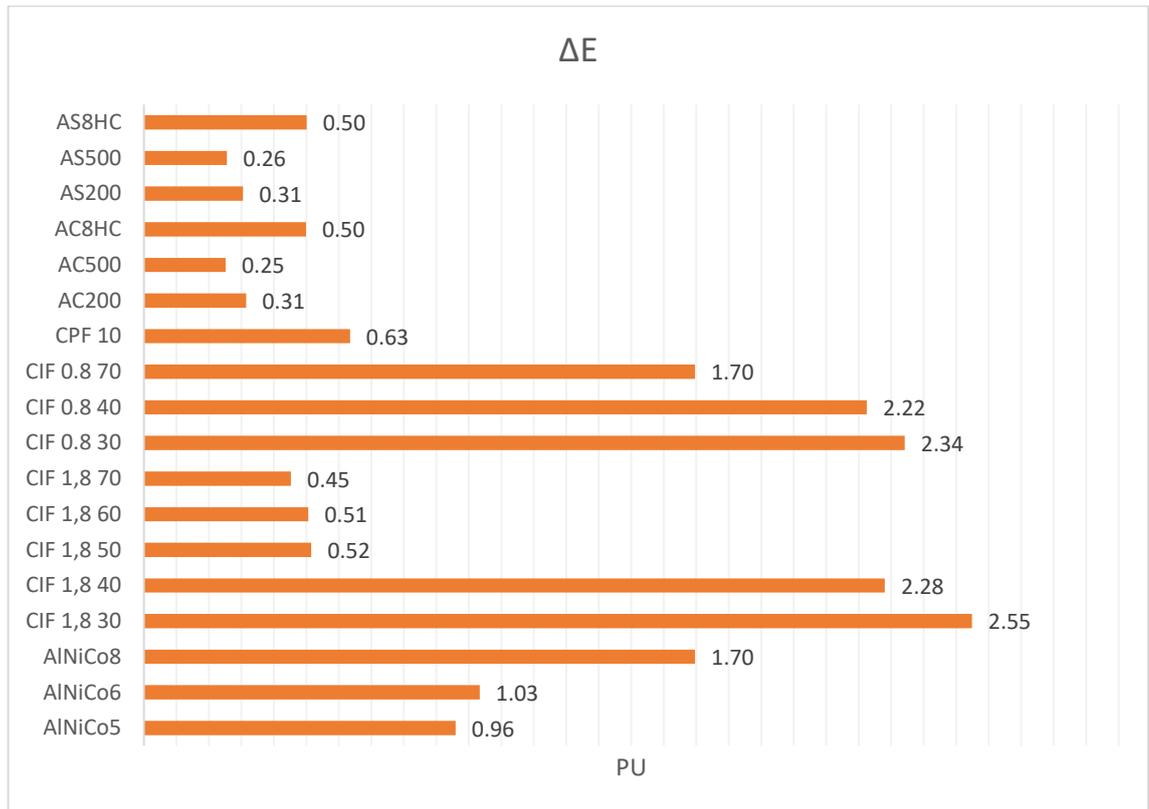


Fig 44 Errore sul calcolo della forza elettromotrice tra simulazione b e c

Nel caso della forza elettromotrice (Fig 44) i valori non sono sovrapponibili, gli errori non si ripetono in egual misura ma le condizioni al contorno sono troppo diverse per permettere una qualche ripetibilità delle misure.

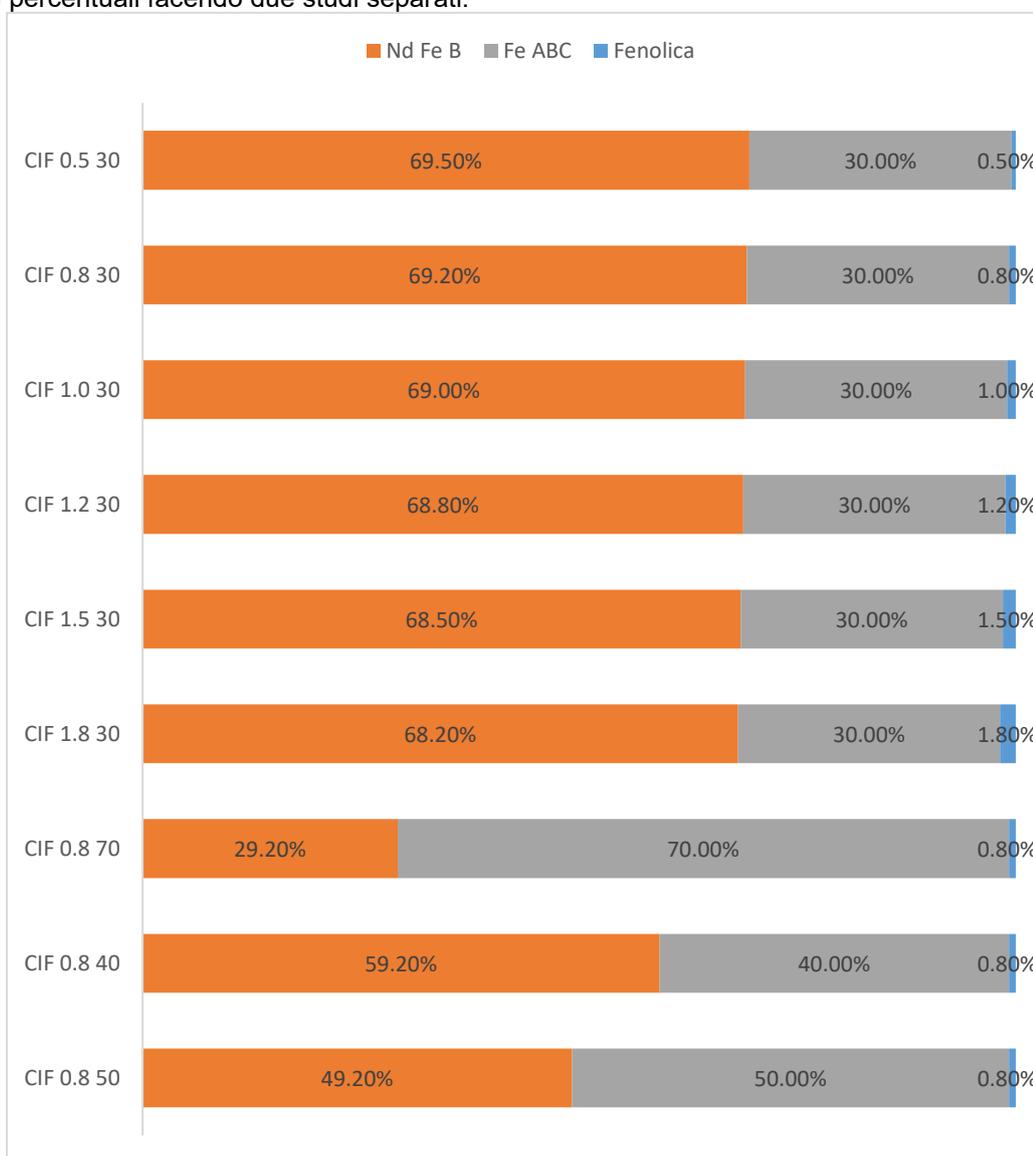
Il confronto per quanto riguarda la forza meccanica (Fig 43) ha restituito un errore inferiore a 1% su quasi tutti i campioni, purtroppo in quattro casi: AC200, CIF 0.8 70, CIF 0.8 40 e CIF 0.8 30, i valori misurati si discostano di 3 volte nel caso peggiore. Una così grande differenza sicuramente si può associare a problemi relativi all'interpolazione dei punti di lavoro sulle curve in prossimità di un cambio di pendenza, questo comporta degli errori non trascurabili e difficilmente risolvibili.

In entrambi i casi si evince che lo strumento di simulazione ottenuto nell'ultima versione dia buoni risultati, confrontabili con la realtà ma con dei limiti strutturali non facilmente risolvibili. Rimane comunque la soddisfazione di aver sviluppato e validato uno strumento in grado di simulare una vasta gamma di materiali per un'applicazione specifica con tempi di esecuzione comunque ragionevoli. Al massimo della sua precisione una simulazione FEMM richiede circa 8 ore per restituire il vettore di risultati per il flusso concatenato e altrettanto per i risultati di forza meccanica.

VI. PRODUZIONE CAMPIONI

Come già anticipato i materiali che si erano evidenziati, nei lavori precedenti, per le prestazioni in questo genere di applicazioni erano tutti plastomagneti ibridi con un'ampia gamma di percentuali di ferro. La percentuale di resina era stata fissata a 1.8% in massa, alternativamente epossidica o fenolica. Chiaramente meno ferro è presente nel materiale e più il campione va ad assomigliare ad un plastomagnete tradizionali, mentre all'aumentare della percentuale di ferro il composto tende a diventare un SMC con un debole comportamento da ferromagnetico duro.

L'obiettivo di questa fase dello studio era quello di andare a trovare un nesso tra le variazioni apportate alla composizione e le conseguenti proprietà magnetiche del composto. Al fine di slegare gli effetti di resina e polvere di ferro si è deciso di andare a variare indipendentemente le due percentuali facendo due studi separati.



La prima famiglia di misure ha interessato lo studio della percentuale di resina, quindi sono stati realizzati i seguenti campioni:

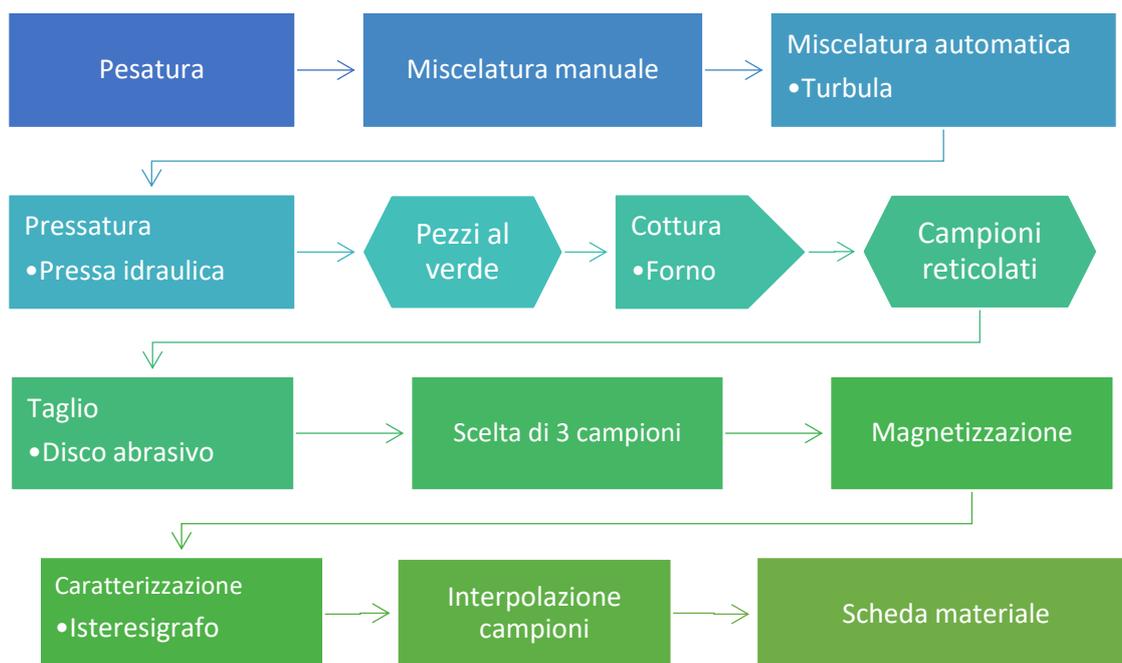
Produzione campioni

- CIF 1.8 30
- CIF 1.5 30
- CIF 1.2 30
- CIF 1.0 30
- CIF 0.8 30
- CIF 0.5 30

Una volta compreso che il materiale con lo 0.8% di resina fosse quello con le prestazioni meccaniche più accettabili, in quanto scendendo i campioni tendevano a sgretolarsi, ho eseguito una seconda campagna di simulazione variando la percentuale di ferro con i seguenti campioni:

- CIF 0.8 40
- CIF 0.8 50
- CIF 0.8 70

Tutti i campioni sono stati realizzati e caratterizzati nella medesima maniera, un lavoro che ha richiesto diverse settimane per essere completato.



Riporto un diagramma di flusso che poi spiegherò nel dettaglio nei capitoli successivi, dove necessario ho specificato lo strumento utilizzato per portare a termine l'operazione. Inserisco in appendice (Appendice B: Caratterizzazione materiali magnetici) tutte le schede dei materiali creati per questo lavoro.

1. Pesatura e miscelatura

Gli strumenti necessari per la procedura sono:

Produzione campioni

1. Resina fenolica in polvere
2. Cucchiaino dosatore
3. Contenitori in Polietilene con tappo di sicurezza
4. Beaker graduato in vetro temperato
5. Mascherina protettiva

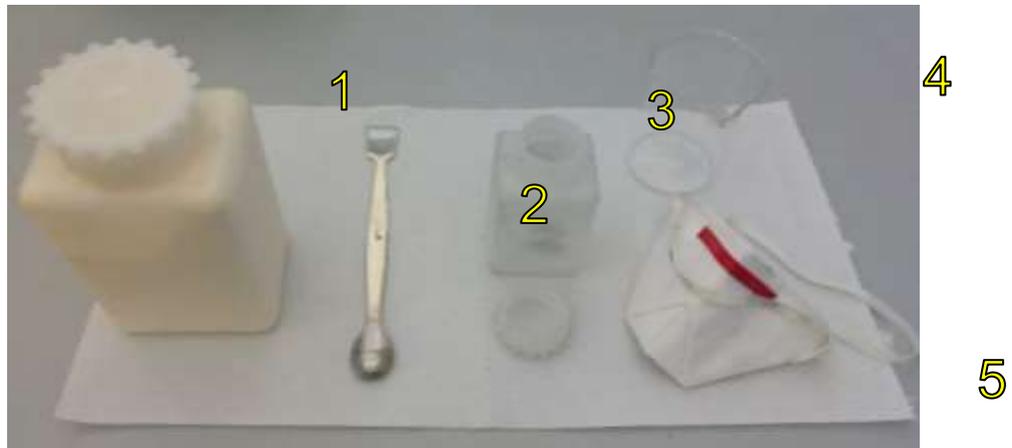


Fig 46 Strumenti necessari per la miscelatura

A questi si aggiungono la polvere di NdFeB e la polvere di Ferro ABC. L'operazione viene eseguita sotto cappa aspirante e con gli appositi DPI (mascherina e guanti in lattice monouso) in quanto la resina fenolica che si presenta come una polvere gialla finissima, è molto volatile e contenendo Fenolo (C_6H_6O) è un composto chimico tossico. Va sempre garantita la protezione individuale e la perfetta pulizia dell'ambiente di lavoro durante e al termine delle operazioni.

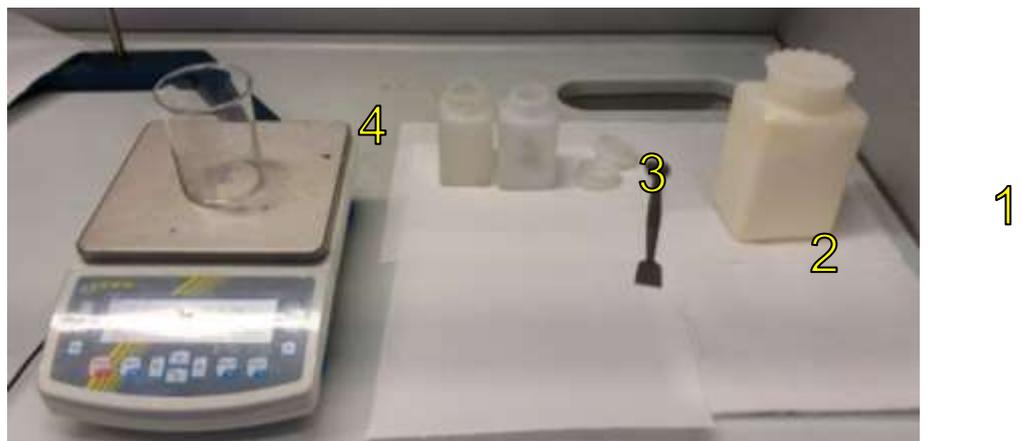


Fig 47 Ambiente di lavoro per la pesatura e miscelatura



Fig 48 Dettaglio del contenitore di resina fenolica aperto

Le polveri vengono aggiunte manualmente nel beaker, posto sulla bilancia, rispettando un ordine che garantisce una certa sicurezza nell'esecuzione. Date le quantità piccole di miscela (<100g), la resina è una quota parte irrisoria ed è preferibile aggiungerla per ultima permettendo di essere rimossa se in eccesso, operazione resa più facile essendo la resina stessa distinguibile dalle polveri metalliche. La polvere di ferro si presenta come uniforme sia in granulometria che in colore, è stata scelta perché è composta da ferro dolce con una bassissima percentuale di elementi leganti (C=0.002% O=0.04% in peso, garantendo buone proprietà magnetiche, per questo va tenuta il meno possibile a contatto con l'aria. La polvere di NdFeB invece ha un colore più brillante ed è più variabile in granulometria (dimensione media 150 μm).

La bilancia è una bilancia elettronica KERN da laboratorio con una scala che garantisce una precisione di $\pm 1\text{mg}$, più che sufficiente per queste operazioni. Sono sempre stati realizzati 50g di miscela per ogni campione.

Produzione campioni



Fig 49 Polvere di ferro nel beaker

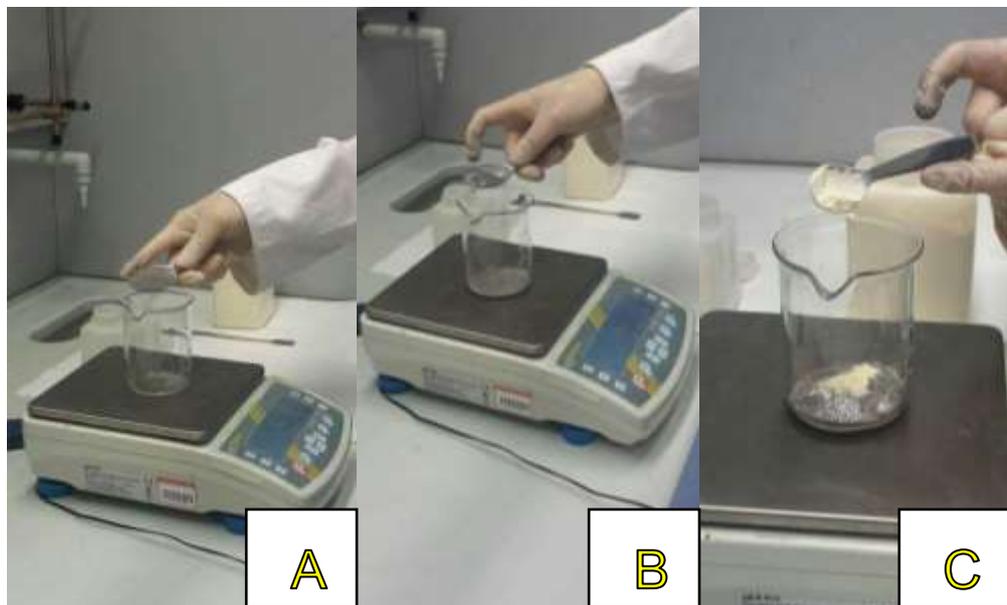


Fig 50 Fasi di aggiunta delle tre componenti del campione

Le fasi di aggiunta di polvere, nell'ordine: polvere di ferro (A), polvere di NdFeB (B) e resina fenolica (C). Ad ogni passo la bilancia viene resettata e si va ad aggiungere la quantità calcolata di polvere necessaria. terminate queste tre fasi si procede a miscelare manualmente, con l'apposito cucchiaino (2) le polveri fino ad ottenere un composto quanto più omogeneo (Fig 51).



Fig 51 Fase di miscelatura manuale

Una volta miscelato il composto viene travasato in un apposito contenitore in PE e identificato con il proprio codice (Fig 52). Di conseguenza si procede a lavare il beaker e si ricomincia l'operazione per il composto successivo.

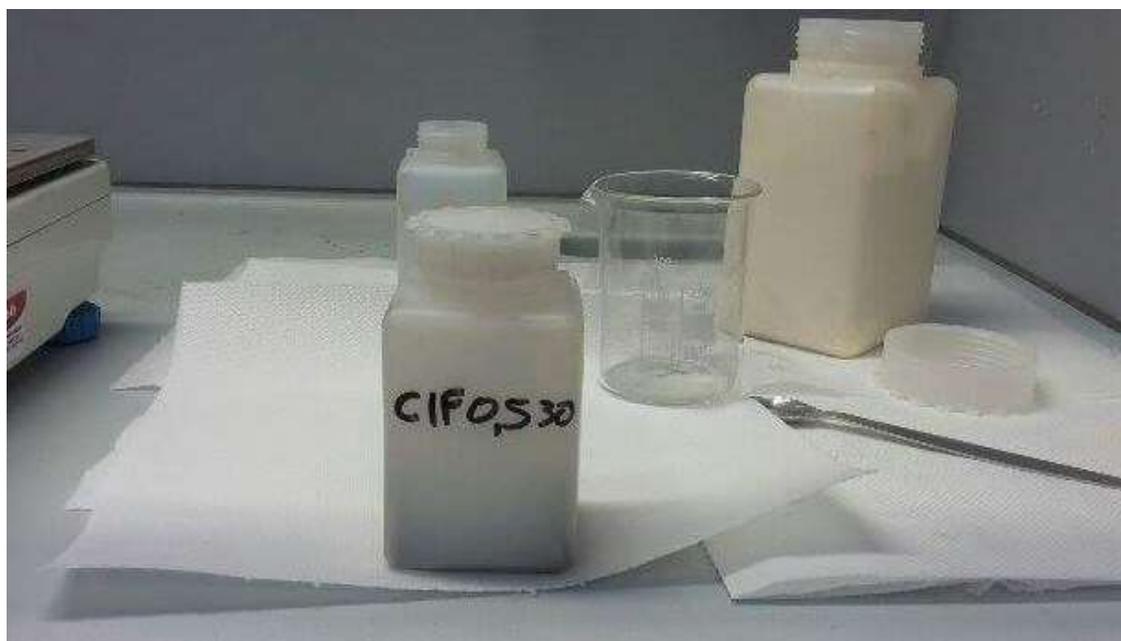


Fig 52 Contenitore di CIF 0.5 30

Una volta che tutti composti sono stati così preparati, è necessaria una seconda fase di miscelatura, questa volta non manuale, usando un apposito strumento chiamato Turbula. Questo apparato garantisce una miscela omogenea tramite un ciclo di 30' in cui i contenitori vengono agitati con un movimento alternato. I contenitori vanno opportunamente ancorati con O-ring agli

Produzione campioni

appositi agganci situati lungo la corona del corpo agitatore e avvolti in un imbottitura per evitare che si svincolino dalla loro posizione o che urtino con il macchinario durante la fase di miscelatura.



Fig 53 Turbula con dettaglio del posizionamento di un contenitore

Al termine di questa operazione le polveri sono pronte per essere pressate.

2. Pressatura

La pressa a disposizione del laboratorio può raggiungere 1GPa di pressione e lo studio della mia collega Daniela Damiani [11] ha dimostrato che all'aumentare della pressione di pressatura i plastomagneti Fenolici o Epossidici hanno il miglior Modulo di Young quando vengono realizzati a pressioni di 700MPa. Chiaramente più la pressione è elevata più il carico per la pressa è gravoso, di conseguenza, sempre nell'ottica di voler ottenere prestazioni meccaniche ottimali ma con un buon margine di sicurezza si è deciso di pressare tutti i campioni a 600MPa.

La forma scelta è quella detta di Charpy, un parallelepipedo di base 10mm x 55mm e altezza variabile in base a quanto materiale si vuole pressare, in questo caso indicativamente 7mm. Questa è una forma standard utilizzata in laboratorio per varie prove meccaniche. Come in tutto il mondo della metallurgia delle polveri, il costo fisso non trascurabile per la realizzazione di un prodotto è sempre la forma dello stampo, quindi è buona norma cercare di sfruttare stampi già esistenti per cercare di contenere i costi di processo.

Lo stampo, montato in pressa (Fig 54), si compone di tre parti: il punzone superiore e quello inferiore entrambi mobili sono due forme a sezione rettangolare che vanno ad incastrarsi nel corpo dello stampo andando a formare la camera. La camera è l'alveo all'interno del quale viene

Produzione campioni

versata la polvere, la sua altezza è variabile a comando e la procedura prevede di svolgere una prova con polvere di scarto per identificare l'altezza che garantisce la riuscita dei campioni. Al fine di ottenere tutti campioni alti circa 7mm l'altezza della camera da impostare è di 17mm.

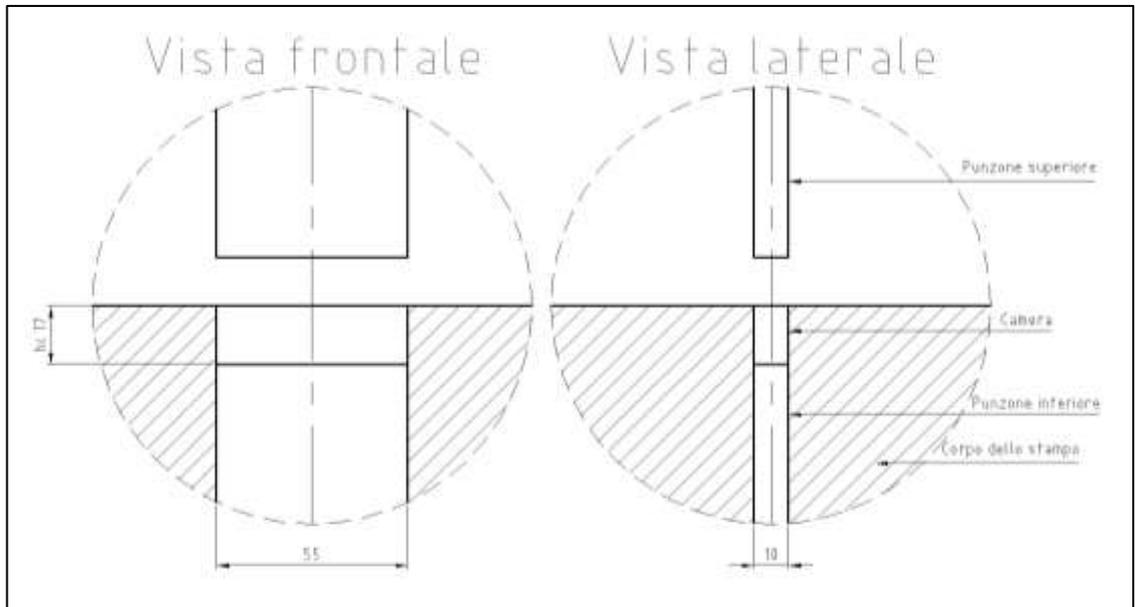


Fig 54 Disegno di concetto dello stampo

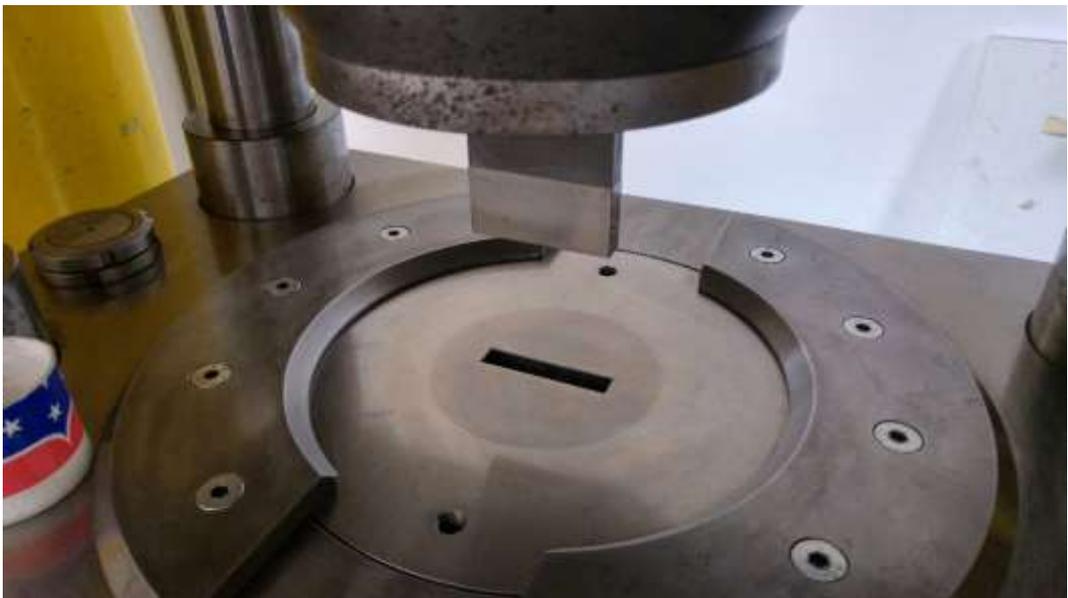


Fig 55 Stampo montato sulla pressa con camera pronta



Fig 56 Dettaglio del punzone superiore in posizione



Fig 57 Dettaglio della camera nello stampo

La polvere va versata all'interno della camera, con un apposito dosatore e sempre indossando gli appositi DPI in quanto nella miscela è presente polvere di resina fenolica non reticolata quindi ancora tossica. Una volta individuata l'altezza della camera corretta, basta riempire a filo lo stampo, per poi passare alla pressatura, la quale è svolta da un controllo automatico sviluppato all'interno del laboratorio sfruttando LabVIEW.

Il ciclo di pressatura si svolge in tre fasi: prima la discesa del pistone fino ad avvenuto contatto con la polvere, poi la fase di pressatura vera e propria in cui i due punzoni premono sulla polvere fino a raggiungere la pressione impostata (per 600MPa su uno stampo Charpy il manometro di mandata deve raggiungere i 50bar), successivamente il punzone superiore si allontana mentre quello inferiore spinge il campione fuori dallo stampo(Fig 58, Fig 59 e Fig 60).

Produzione campioni



Fig 58 Camera riempita con la polvere, a fianco il dosatore



Fig 59 Pressa con il punzone calato nella camera



Fig 60 Campione estratto dalla camera

Produzione campioni

Possono accadere operazioni sfortunate in cui nella fase di risalita la pressa si inceppi, solitamente causato da una pressione eccessiva oppure da una lubrificazione non ottimale. Nei casi meno gravi è sufficiente un'azione manuale di ridiscesa e risalita per liberare il campione, può però capitare che il campione si danneggi in maniera irreversibile.

I pezzi estratti dalla pressa sono detti pezzi "verdi" nel gergo della metallurgia delle polveri, non essendo ancora trattati termicamente sono molto fragili e facilmente danneggiabili anche con una semplice caduta, come infatti è successo per un campione. Quindi una volta estratti vengono misurati a calibro per verificare la buona riuscita dell'operazione, poi vengono opportunamente identificati, incidendo il codice con una punta in metallo duro e riposti in un vassoio.

Essendo stati realizzati due Charpy per ogni miscela al codice identificativo del materiale ho aggiunto i numeri romani I e II per identificare i campioni, tutti i campioni sono risultati conformi alle aspettative con un unico scarto (CIF 1.0 30 I) che, come anticipato prima, è caduto rompendosi. Dato che la caduta potrebbe aver danneggiato il reticolo cristallino del materiale è stato deciso di scartarlo per evitare misure falsate.



Fig 61 Campioni verdi, pronti per la cottura

3. Cottura

L'operazione di cottura è quella che permette alla resina di reticolare e conferire al materiale le proprietà meccaniche definitive, inoltre rende i campioni maneggiabili in tutta sicurezza in quanto la resina non è più tossica.

Il forno utilizzato è un Nabertherm con controllo automatico della temperatura che permette di inserire una specifica curva termica da seguire durante tutta la fase di cottura, nel caso dei plastomagneti la curva è quella riportata (Fig 62) in cui è essenziale una fase di preriscaldamento, terminata la quale i campioni vengono inseriti in forno e devono subire un trattamento con una isoterma a 150°C per 30' più la successiva fase di raffreddamento controllato.

Produzione campioni

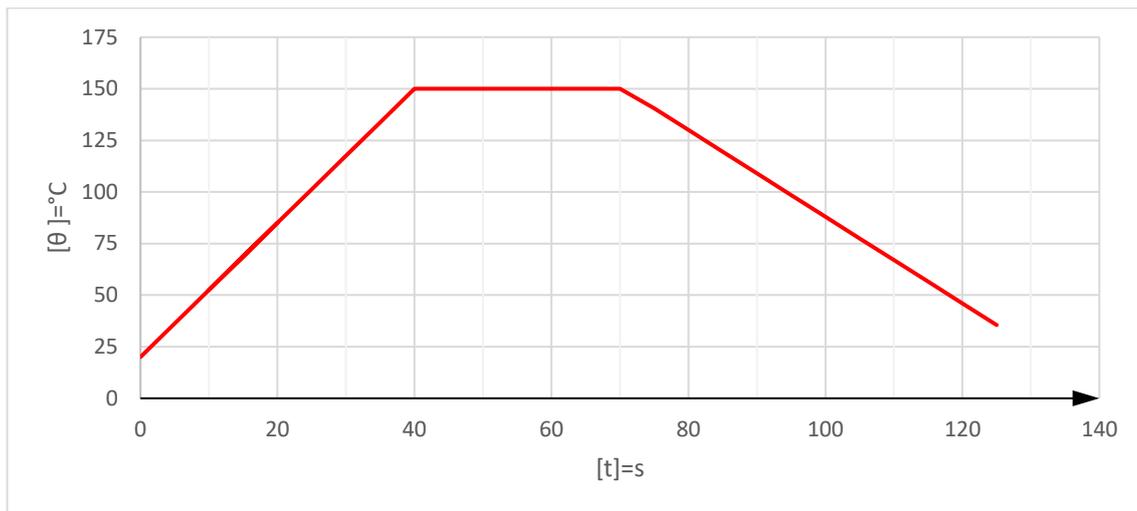


Fig 62 : Curva per il trattamento termico



Fig 63 Campioni inseriti nel forno



Fig 64 Campioni dopo il trattamento termico

Produzione campioni

Al termine del trattamento vengono lasciati raffreddare in aria e poi sono pronti per le successive lavorazioni, riporto a seguire tutte le misurazioni meccaniche eseguite finora sui campioni ottenuti dove:

hc: è l'altezza della camera prima del processo di pressatura, da confrontare con hf per correggere il processo dove necessario

hf: è l'altezza del campione ancora verde, questa misura viene eseguita prima e dopo cottura per verificare se ci siano variazioni

I campioni ottenuti sono dei parallelepipedi di sezione **a x b** e lunghezza **l**, queste misure servono per calcolare il volume e quindi la densità.

	Parametri pressa			Pezzi verdi	Pezzi cotti					
	[P]=Mpa	[P]=bar	[hc]=mm	[hf]=mm	[mf]=g	[a]=mm	[b]=mm	[l]=mm	[vol]=cm ³	[ρ]=g/cm ³
CIF 1.8 30 I	600	49.99	17	7.15	25.26	10.21	7.16	55.48	4.056	6.228
CIF 1.8 30 II	600	50.17	17	6.83	24.11	10.28	6.89	55.49	3.930	6.134
CIF 1.5 30 I	600	50.02	17	6.96	24.84	10.21	7.00	55.49	3.966	6.263
CIF 1.5 30 II	600	49.90	17	7.02	24.78	10.23	7.01	55.47	3.978	6.229
CIF 1.2 30 I	600	50.44	18	7.51	26.80	10.23	7.51	55.50	4.264	6.285
CIF 1.2 30 II	600	50.40	16	6.38	22.76	10.24	6.43	55.52	3.656	6.226
CIF 1.0 30 II	600	50.21	17	6.72	24.10	10.20	6.78	55.48	3.837	6.281
CIF 0.8 30 I	600	49.90	17	7.23	26.02	10.24	7.30	55.50	3.762	6.272
CIF 0.8 30 II	600	49.93	17	6.63	23.55	10.33	6.62	55.54	4.188	6.201
CIF 0.5 30 I	600	50.17	17	7.14	25.48	10.31	7.10	55.53	4.065	6.268
CIF 0.5 30 II	600	49.98	17	7.3	26.21	10.24	7.35	55.49	4.176	6.276
CIF 0.8 30 I	600	50.23	17	6.92	24.77	10.26	6.97	55.52	3.970	6.239
CIF 0.8 30 II	600	50.13	17	7.04	24.82	10.26	6.96	55.50	3.963	6.263
CIF 0.8 40 II	600	50.20	14	6.02	21.56	10.14	5.99	55.44	3.367	6.403
CIF 0.8 40 II	600	50.39	17	7.2	25.68	10.18	7.17	55.53	4.053	6.336
CIF 0.8 40 I	600	50.24	17	7.2	25.86	10.23	7.14	55.47	4.052	6.383
CIF 0.8 50 I	600	50.22	17	7.58	27.14	10.20	7.50	55.42	4.240	6.402
CIF 0.8 50 II	600	50.08	14	6.27	22.46	10.22	6.22	55.42	3.523	6.375
CIF 0.8 70 II	600	50.06	15	5.99	22.17	10.19	6.00	55.49	3.393	6.535
CIF 0.8 70 I	600	50.08	17	6.6	24.65	10.27	6.51	55.41	3.705	6.654
CIF 0.8 70 II	600	50.07	17	6.32	23.74	10.19	6.33	55.35	3.570	6.649

Un parametro di riferimento tipico, nei processi di metallurgia delle polveri, è la densità del pezzo dopo il trattamento termico. Di solito questo parametro viene paragonato a quello di un particolare realizzato con tecnologie tradizionali (e.g. asportazione di materiale o fusione) per capire quanta aria sia rimasta intrappolata nella polvere metallica. Questo ragionamento non è applicabile per questi campioni, in quanto la composizione di tre materiali con proprietà diverse non permette di poter fare un paragone con un ipotetico riferimento, di conseguenza non esiste una densità di riferimento per ognuna di queste miscele ma piuttosto un'indicazione generica, l'unica verifica che ho fatto è il legame tra la percentuale di ferro e la densità dei campioni, anche se la popolazione è piccola posso dimostrare che ci sia una correlazione diretta.

Produzione campioni

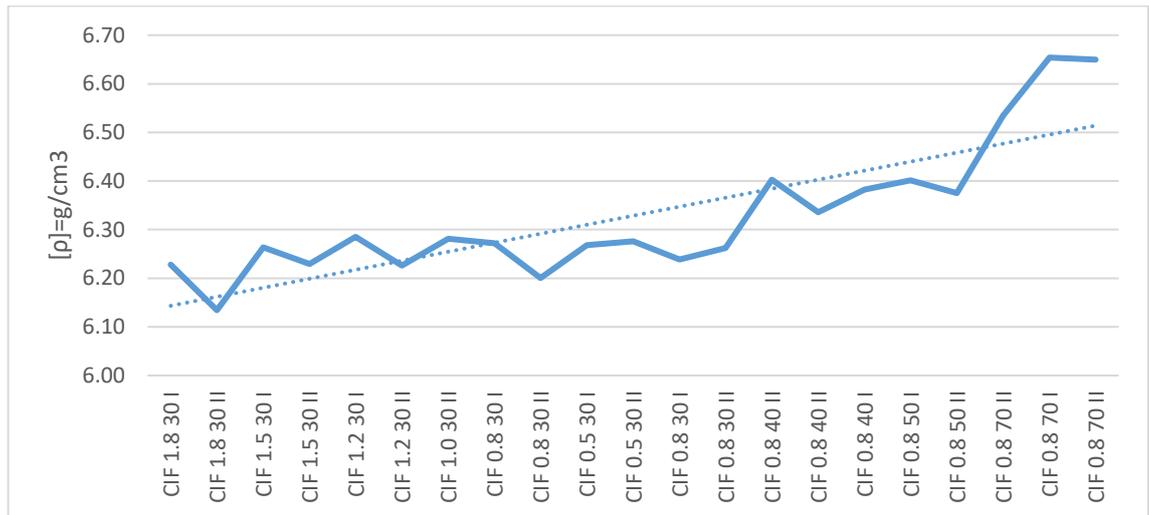


Fig 65 Densità dei campioni in funzione della percentuale di ferro con linea di tendenza

4. Taglio

Gli Charpy così ottenuti sono sufficientemente grandi da poter essere divisi in un numero di sotto campioni per le fasi successive. Per tagliare i campioni ho utilizzato un troncatore a disco flessibile, ho eseguito il taglio manualmente ottenendo da ogni parallelepipedo almeno tre sotto-campioni a sezione quadrata (indicativamente 10mm x 10mm). Ad ogni cubetto ho associato una lettera dell'alfabeto per poterli poi distinguere durante tutte le successive operazioni di misura.

(e.g. CIF 1.8 30 IA)

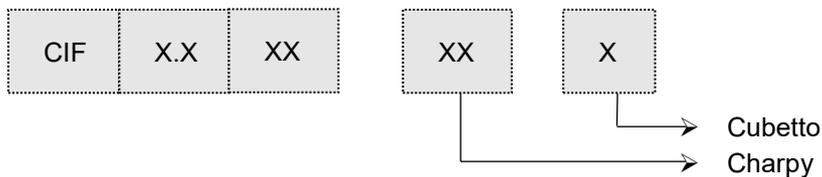


Fig 66 Inserimento dello Charpy nella morsa del troncatore

Produzione campioni

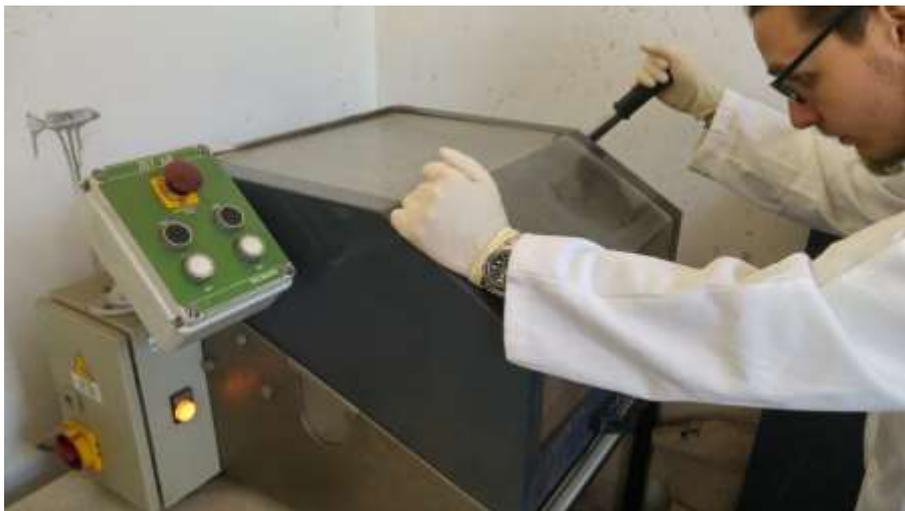


Fig 67 Operazione di taglio con il carter del troncatore chiuso



Fig 68 Sotto-campione tagliato a lunghezza 10mm

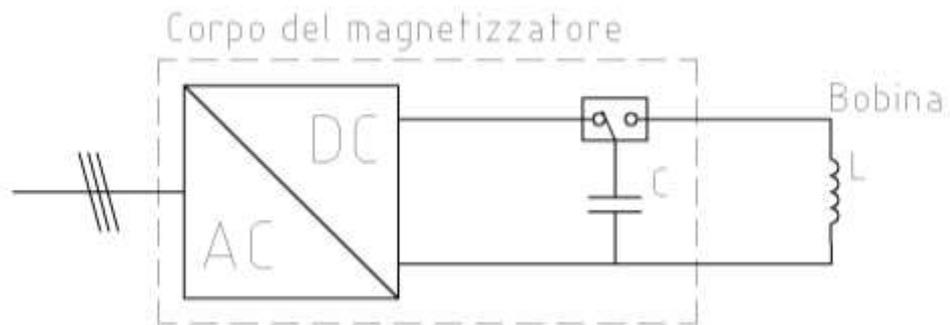
Dopo aver ultimato le operazioni di taglio e ripulito i cubetti da eventuali bave o difetti, ne ho scelti tre, rappresentativi per ogni miscela. I rimanenti sono stati lasciati da parte per fungere da eventuale soluzione di backup in caso di problemi ai primi scelti.

Produzione campioni

Riporto in tabella tutti i campioni tagliati con in grassetto quelli scelti per le prove:

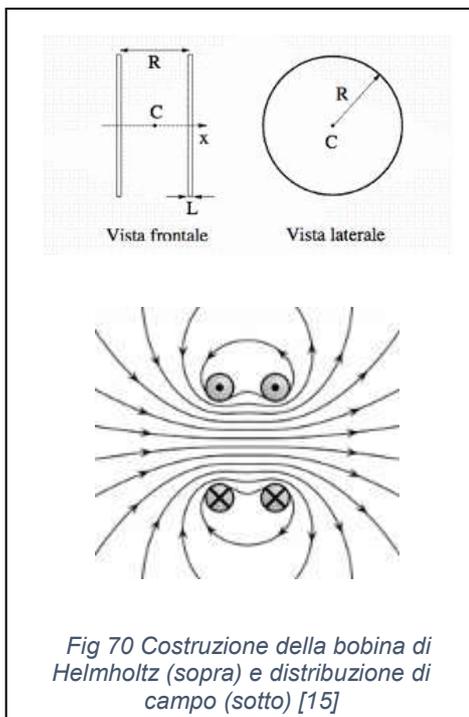
Nome	#	[a] =mm	[b] =mm	[l] = mm	[vol] =cm ³	Nome	#	[a] =mm	[b] =mm	[l] =mm	[vol] =cm ³
CIF 1.8 30 I	A	10.3	7.15	11.85	0.873	CIF 1.0 30 II	A	10.2	6.75	10.25	0.706
	B	10.3	7.15	9.9	0.729		B	10.2	6.75	10	0.689
	C	10.2	7.15	9.5	0.693		C	10.2	6.75	9.9	0.682
	D	10.25	7.15	9.15	0.671		D	10.25	6.8	9.4	0.655
	E	10.3	7.25	9.35	0.698		E	10.25	7.8	10	0.800
CIF 1.8 30 II	A	10.2	6.9	10.25	0.721	CIF 0.8 30 I	A	10.25	6.6	10	0.677
	B	10.25	6.9	9.4	0.665		B	10.2	6.6	9.7	0.653
	C	10.2	6.8	9.95	0.690		C	10.25	6.6	9.85	0.666
	D	10.25	6.85	10.2	0.716		D	10.25	6.6	10.5	0.710
	E	10.25	6.8	10.2	0.711		E	10.25	6.6	9.35	0.633
CIF 1.5 30 I	A	10.2	6.95	10.65	0.755	CIF 0.8 30 II	A	10.25	7.25	9.4	0.699
	B	10.25	7.0	10.2	0.732		B	10.25	7.25	9.25	0.687
	C	10.25	7.0	10.4	0.746		C	10.25	7.3	10.65	0.797
	D	10.25	7.0	10.25	0.735		D	10.25	7.3	10.7	0.801
	E	10.25	7.0	9.4	0.674		E	10.25	7.25	9.4	0.699
CIF 1.5 30 II	A	10.25	7.0	10.05	0.721	CIF 0.5 30 I	A	10.3	7.1	10.1	0.739
	B	10.25	7.0	10	0.718		B	10.25	7.1	11.4	0.830
	C	10.25	7.0	9.5	0.682		C	10.25	7.1	10.1	0.735
	D	10.2	7.0	10.05	0.718		D	10.25	7.1	9.6	0.699
	E	10.25	7.0	9.5	0.682		E	10.25	7.1	8.5	0.619
CIF 1.2 30 I	A	10.2	7.5	10.2	0.780	CIF 0.5 30 II	A	10.25	7.3	12	0.898
	B	10.2	7.5	10.1	0.773		B	10.25	7.3	9.5	0.711
	C	10.2	7.5	9.95	0.761		C	10.25	7.3	9.5	0.711
	D	10.25	7.55	9.65	0.747		D	10.25	7.3	9.4	0.703
	E	10.25	7.5	9.55	0.734		E	10.2	7.25	9.2	0.680
CIF 1.2 30 II	A	10.25	6.45	10.25	0.678	CIF 0.8 50 II	A	10.24	6.15	10.59	0.667
	B	10.25	6.4	10.05	0.659		B	10.26	6.18	10.64	0.675
	C	10.2	6.3	10.1	0.649		C	10.14	6.19	10.48	0.658
	D	10.2	6.4	9.55	0.623						
	E	10.25	6.45	9.85	0.651		CIF 0.8 40 I	A	10.11	6.03	10.15
CIF 1.0 30 I R					B	9.64		6.15	10.2	0.605	
					C	10.25		6.11	10.13	0.634	
						CIF 0.8 70 I	A	10.12	5.57	10.22	0.576
					B		10.1	5.59	10.6	0.598	
					C		10.1	5.51	11.08	0.617	

5. Magnetizzazione



Per poter caratterizzare i materiali è necessario prima magnetizzarli, per eseguire questa operazione è necessario uno strumento detto magnetizzatore. Un macchinario composto da un alimentatore che fa da interfaccia con la rete e carica un banco di condensatori (capacità C). Al comando dell'operatore viene attivato un interruttore di potenza che connette il condensatore con la bobina (induttanza L), scaricando l'energia immagazzinata. Il sistema è dimensionato in modo da garantire che tutta l'energia immagazzinata nei condensatori venga trasferita al materiale da magnetizzare. A seconda del dimensionamento dei componenti reattivi si possono avere diverse forme di impulso ma in generale comunque viene rispettata la relazione:

$$\frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}LI^2$$



Il primo magnetizzatore (Fig 71, Fig 72 e Fig 73) usa una bobina che è stata realizzata in laboratorio, in grado di magnetizzare piccoli campioni. Fornisce 450J di energia, caricando il banco di condensatori a 6kV e l'impulso di corrente è stimata intorno ai 3kA. La bobina è di dimensioni ridotte e sviluppata per essere simile ad una Bobina di Helmholtz (da Hermann L.F. von Helmholtz), in cui due spire sono disposte ad una distanza pari al raggio per garantire un'area in cui il campo abbia un andamento il più costante possibile.

All'interno della bobina è ricavata una nicchia a sezione quadrata di 10mm x 10mm per alloggiare i campioni, l'intera struttura è ricavata da una serie di parti plastiche tornite a misura per tenere in posizione le spire. Dato il valore di picco dell'impulso di corrente gli sforzi elettromeccanici sviluppati al momento della

magnetizzazione le distruggerebbero, se fossero libere di muoversi.

Produzione campioni



Fig 71 Corpo del magnetizzatore



Fig 72 Campione posto dentro la bobina



Fig 73 Bobina collegata al magnetizzatore

Questo magnetizzatore non ha dato il risultato sperato, in quanto i campioni sono troppo alti per essere alloggiati correttamente all'interno della bobina e hanno causato scariche danneggiando le spire; è stato quindi necessario utilizzare quello di taglia più grande e che il laboratorio ha recentemente acquisito. In questo caso si tratta di un magnetizzatore industriale che alimenta una bobina molto più grande, costruita come un semplice solenoide in aria. Il banco di condensatori è caricato a 3kV ed è in grado di erogare 30kJ di energia con un impulso di corrente da circa 83kA. Viste le grandezze in gioco, questo magnetizzatore è fornito anche di un controllo da remoto per avviare l'operazione da una sufficiente distanza di sicurezza. L'affidabilità di questo strumento è sicuramente superiore, inoltre l'energia necessaria per magnetizzare i miei campioni è decisamente inferiore quindi c'è la garanzia assoluta della buona riuscita dell'operazione.



Fig 74 Corpo del magnetizzatore

Produzione campioni



Fig 75 Corpo e spira con il cavo di collegamento

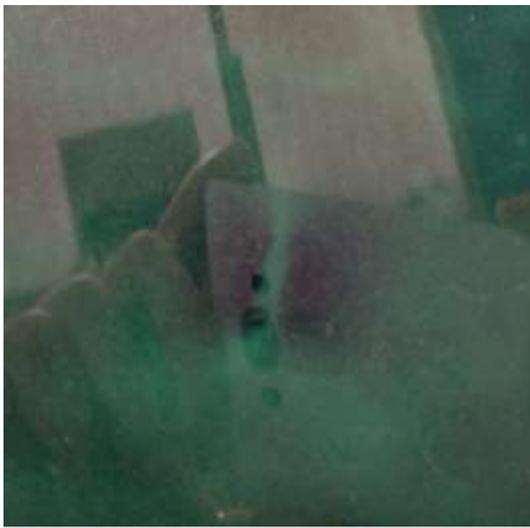


Fig 76 Interno della bobina



Fig 77 Controllo remoto

Ho separato le attività di magnetizzazione e misura ma nella realtà, essendo che ogni prova all'isteresigrafo intacca le caratteristiche magnetiche dei campioni le attività si sono svolte in parallelo, magnetizzando e poi misurando il campione. Nel caso la misura non fosse stata conforme alle aspettative il campione è stato magnetizzato nuovamente e poi misurato una seconda volta.



Per verificare rapidamente l'avvenuta magnetizzazione si può fare uso della carta verde, grazie alla quale è possibile vedere le linee di campo che attraversano il campione. L'ombra scura evidenzia i bordi del campione, mentre la parte più chiara è l'asse principale di magnetizzazione del campione.

6. Caratterizzazione magnetica



Fig 79 Isteresigrafo



Insieme al magnetizzatore, il laboratorio ha acquisito anche l'isteresigrafo che ho usato per caratterizzare i materiali. Questo strumento è in grado di applicare il campo necessario a smagnetizzare un materiale e a misurare contemporaneamente, tramite un'apposita bobina, sia la polarizzazione magnetica (J) che il campo (H) nei quattro quadranti, la bobina è collegata al corpo centrale tramite due cavi dedicati. I campioni sono posizionati all'interno del misuratore, composto da due poli uguali una fissa in basso e una mobile in alto, regolabile tramite una trasmissione vite-madrevite.

La macchina è anche in grado di eseguire misure a temperature più alte di quella ambiente con appositi supporti riscaldati. I risultati vengono riportati in forma grafica sul monitor del computer collegato al corpo centrale e esportati su file di testo per successive elaborazioni.

Produzione campioni



Fig 81 Misuratore con polo sollevato e campione in posizione



Fig 82 Dettaglio del campione in posizione con intorno la bobina di misura

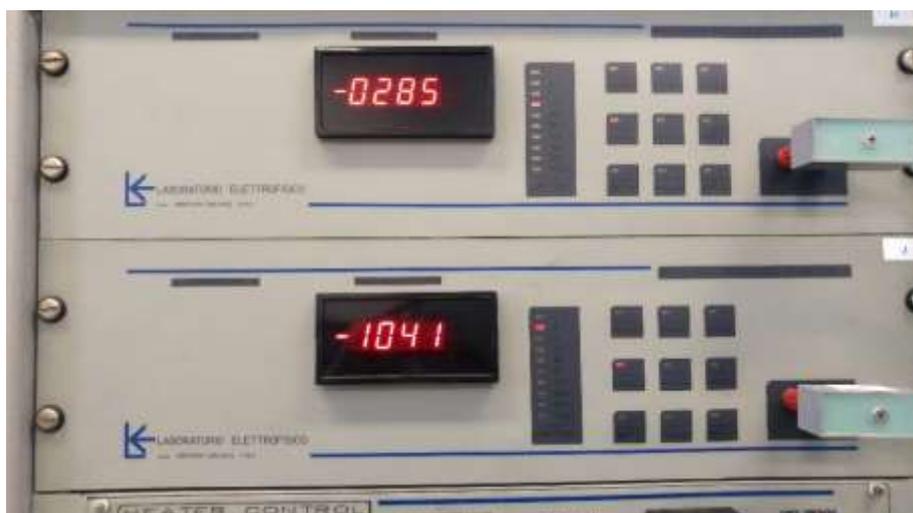


Fig 83 Pannello di controllo con misura di H (sopra) e J (sotto)

Produzione campioni

Una volta inserito e bloccato il campione all'interno dei poli si compila la scheda a terminale, la quale permette di identificarlo successivamente, inoltre alcuni parametri come lunghezza e larghezza sono fondamentali in quanto tutti i calcoli di flusso sono basati sull'area a contatto con i poli, senza la quale non sarebbe possibile caratterizzarlo.

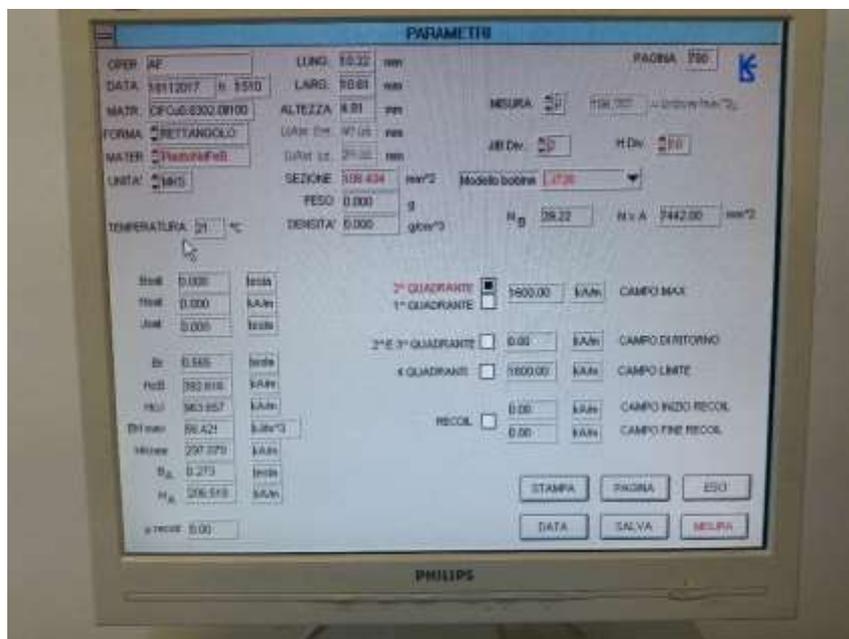


Fig 84 Esempio di scheda campione sul terminale

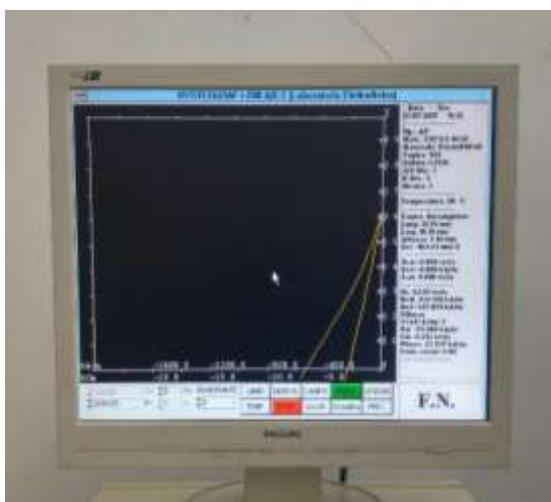


Fig 85 Esempio di caratteristiche $J(H)$ e $B(H)$ in forma grafica

L'attività di misura risulta lunga e ripetitiva, come già anticipato si svolge in parallelo con la magnetizzazione, soprattutto quando certi campioni vanno misurati più volte in condizioni diverse (e.g. a temperature differenti). Per dare un'idea del carico di lavoro: a pieno regime e dopo aver preso la mano sono riuscito a misurare e catalogare 70 campioni singoli in una giornata di lavoro.

VII. ANALISI DEI RISULTATI

I dati ricavati dalle analisi con l'isteresigrafo necessitano di un'ulteriore elaborazione prima di essere valutati. Il singolo campione non è rappresentativo della miscela, per questo sono stati scelti tre cubetti per ogni materiale, le caratteristiche ricavate devono essere interpolate per ottenere una curva rappresentativa con un buon margine di approssimazione.

Tutte le curve vengono esportate dall'isteresigrafo come serie di punti (h,j) nel secondo quadrante, questi punti vengono inseriti all'interno di una cartella Excel, sviluppata opportunamente in laboratorio, che ne esegue un'interpolazione polinomiale per ricavare l'equazione rappresentativa di J(H) per poi estrapolarne l'andamento e di conseguenza di B(H), tenendo presente che è sempre valida la relazione:

$$J(H) = B(H) - \mu_0 \cdot H$$

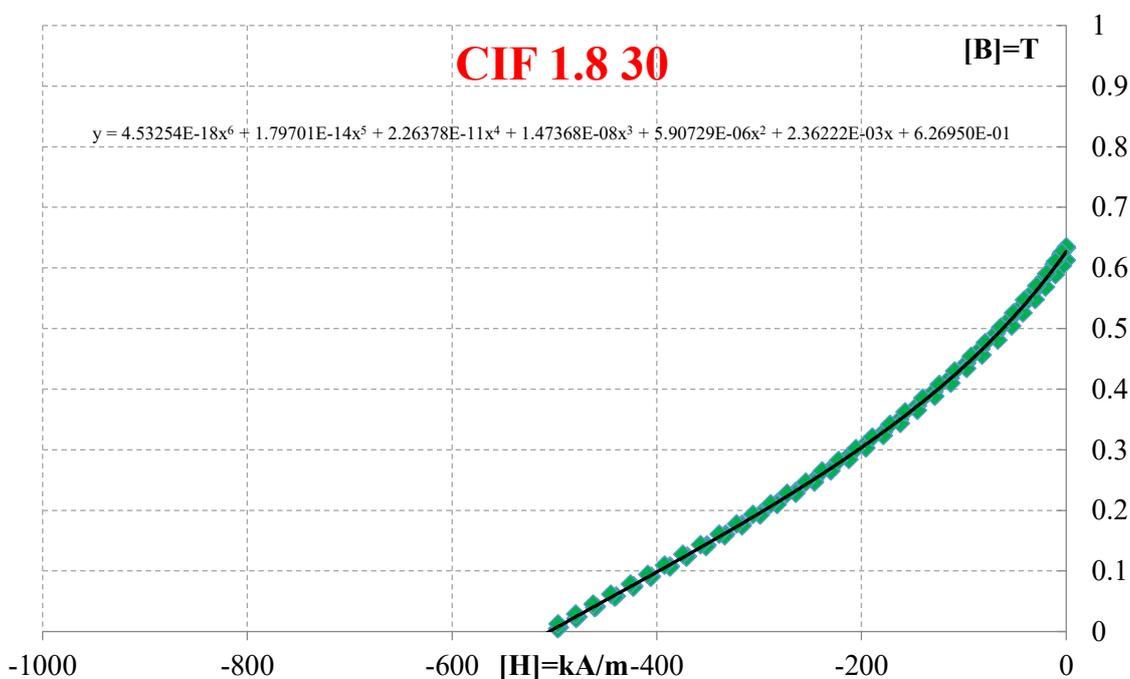


Fig 86 Interpolazione polinomiale dei punti (j,h)

Una volta ricavata l'equazione rappresentativa del materiale se ne ottiene una caratteristica che poi va confrontata con i campioni di partenza. Nel grafico (Fig 87) riporto la caratteristica così ottenuta per il materiale CIF 1.8 30, la linea piena identifica la J(H) mentre quella tratteggiata la B(H) a partire da tre campioni (IIC IID e IC), distinti per colori, mentre la traccia nera è rappresentativa della media. Qui riporto per chiarezza i grafici relativi ad un materiale, tutti gli altri materiali caratterizzati saranno riportati in appendice (Appendice B: Caratterizzazione materiali magnetici).

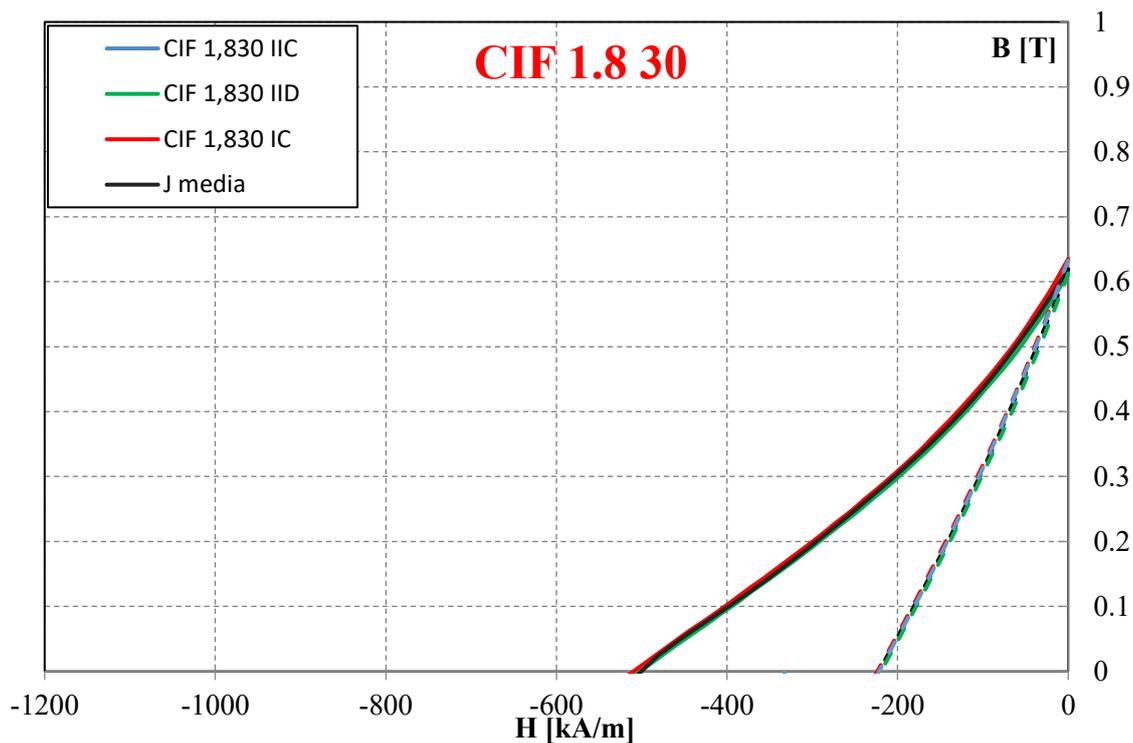


Fig 87 Confronto tra la caratteristica interpolata (nera) e i campioni

Una volta caratterizzati i materiali sono stati inseriti nella simulazione FEMM per ottenere gli andamenti di forza meccanica ed elettromotrice e poterne così valutare le prestazioni.

1. 30% Ferro

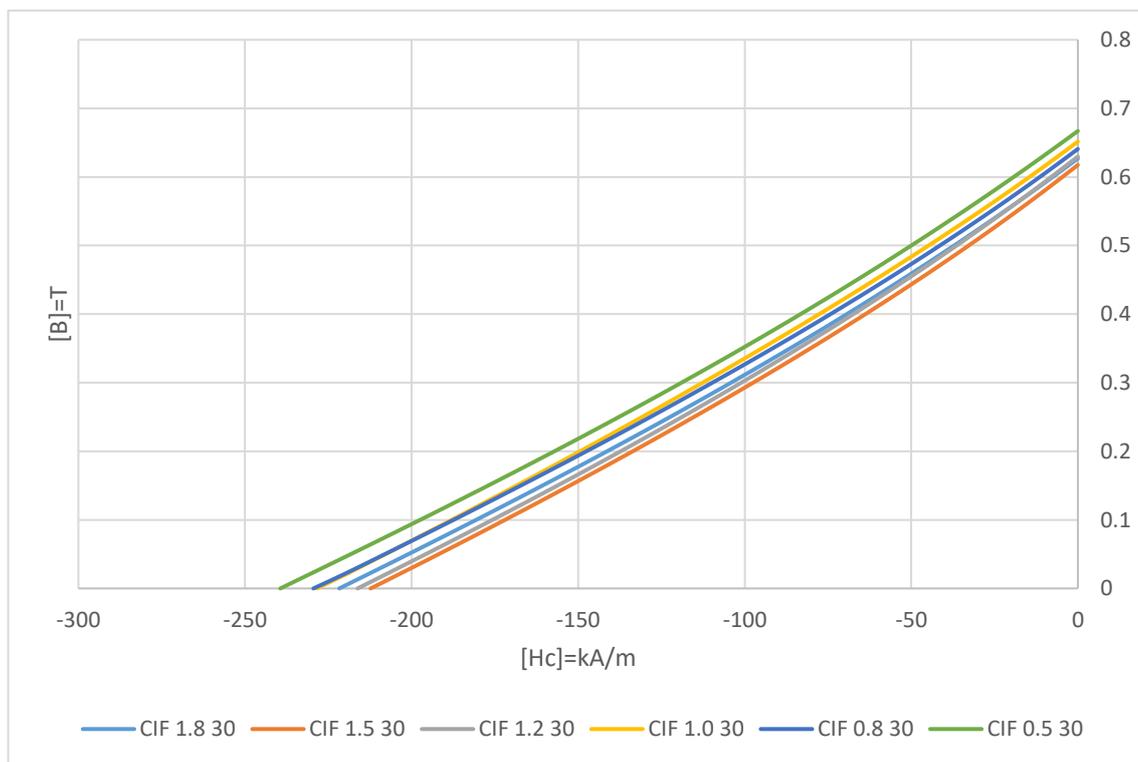


Fig 88 Caratteristiche B(H) per i materiali con 30% di ferro

Analisi dei risultati

Dal grafico (Fig 88) si vede l'effetto della riduzione della percentuale di resina (quindi in complemento dell'aumento della percentuale di NdFeB) nella miscela. A meno di piccole incertezze dovute ad errori di misura, il comportamento generale è quello di un aumento di B_r e H_{cb} al diminuire della presenza di resina, giustificato dal fatto che aumenta la parte di ferromagnetico duro. Per visualizzarlo in maniera più chiara riporto gli istogrammi di tutti i campioni analizzati con relativi valori di H_{cb} e B_r . I 6 valori evidenziati, con relativa linea di tendenza, sono quelli relativi alle caratteristiche interpolate, quindi rappresentativi del materiale, riporto tutti i campioni analizzati per completezza. Generalmente si trascura la curva $J(H)$ e quindi il valore di H_{cj} in quanto è direttamente conseguente dall'andamento di $B(H)$.

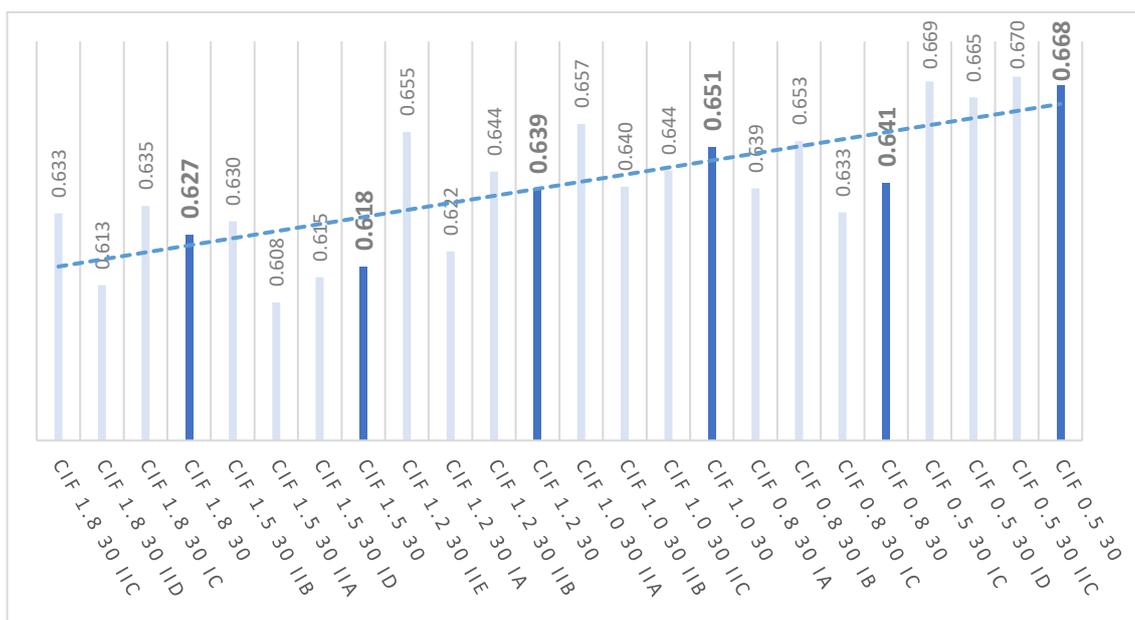


Fig 89 Valori di induzione residua $[B_r]=T$

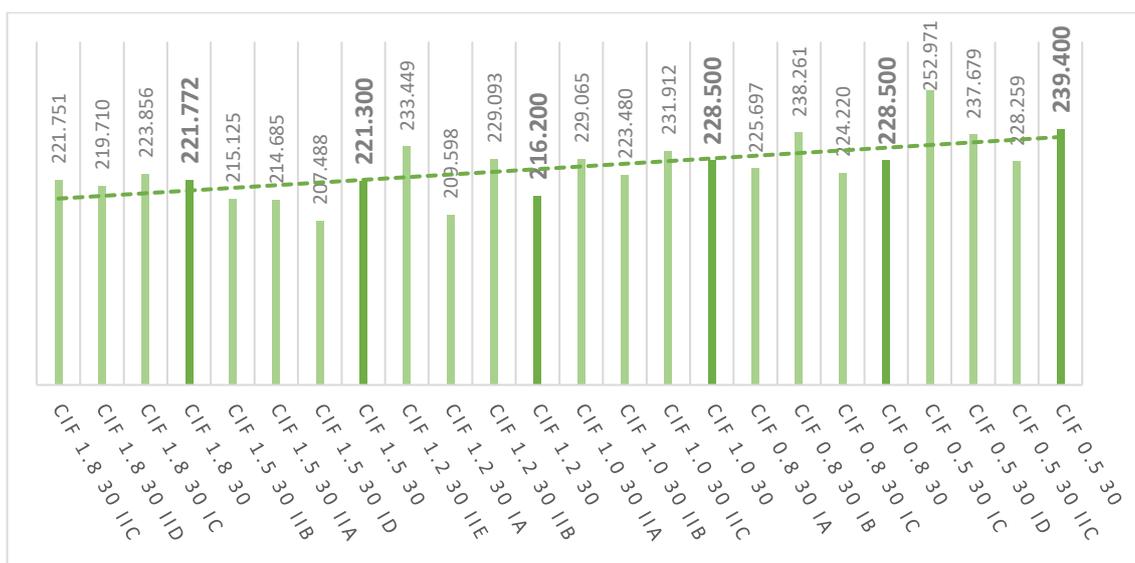


Fig 90 Andamento di campo coercitivo $[H_{cb}]=kA/m$

Analisi dei risultati

Si può dedurre che il contributo della percentuale di resina porti ad un aumento di circa 3 mT per l'induzione residua e un aumento di 1.36 kA/m per ogni 0.1% di Resina in meno, chiaramente in un campo molto ristretto di variazione e con una forte approssimazione.

L'effetto generalmente è quello di avere magneti sempre migliori ma con una variazione ridottissima.

2. 0.8% Resina Fenolica

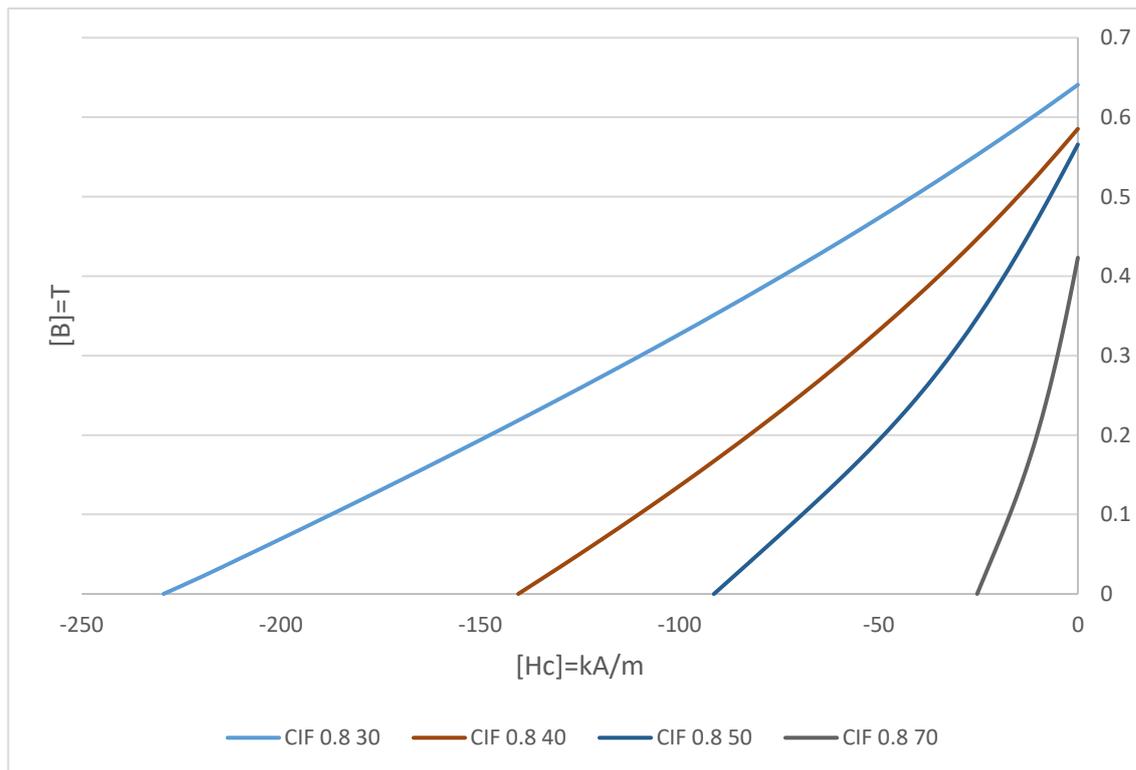


Fig 91 Caratteristiche B(H) dei materiali con 0.8% di resina

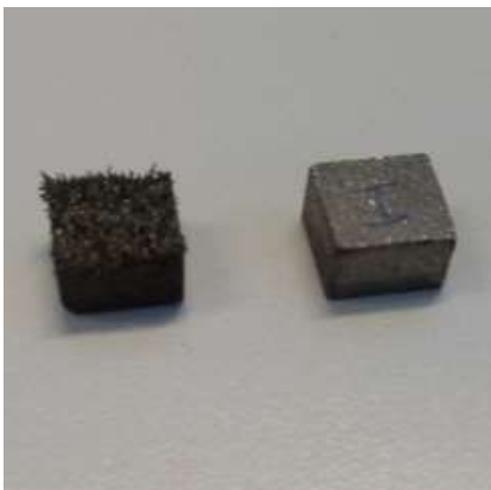


Fig 92 Confronto tra CIF 0.5 30 (sx) e CIF 0.8 30 (dx) dopo le prove

La percentuale di 0.8% è stata scelta come la più adatta per mandare avanti le simulazioni e la prototipazione del pickup in quanto si voleva arrivare alle prestazioni massime di B_r e H_{cb} dei plastomagneti ibridi mantenendo comunque una certa coesione meccanica, cosa che i materiali con lo 0.5% di resina non sono riusciti a rispettare in quanto al termine delle prove di caratterizzazione già si presentavano degradati (Fig 92).

Gli effetti dell'aggiunta di ferro sono più drastici, soprattutto sul valore di campo coercitivo. Le percentuali non sono equidistanziate, quindi bisogna eseguire qualche approssimazione, ma sempre

Analisi dei risultati

qualitativamente si può dire che ad ogni 0.1% di Ferro in più la B_r scende di 0.5 mT mentre il H_{cb} scende di 0.5kA/m. Paragonato alla resina la variazione percentuale è inferiore ma gli effetti sui materiali sono più visibili perché le percentuali modificate sono molto più pesanti. Rimane molto interessante vedere come la B_r rimanga comunque sopra i 0.4T in una miscela che per oltre il 70% non è composta da materiali ferromagnetici duri.

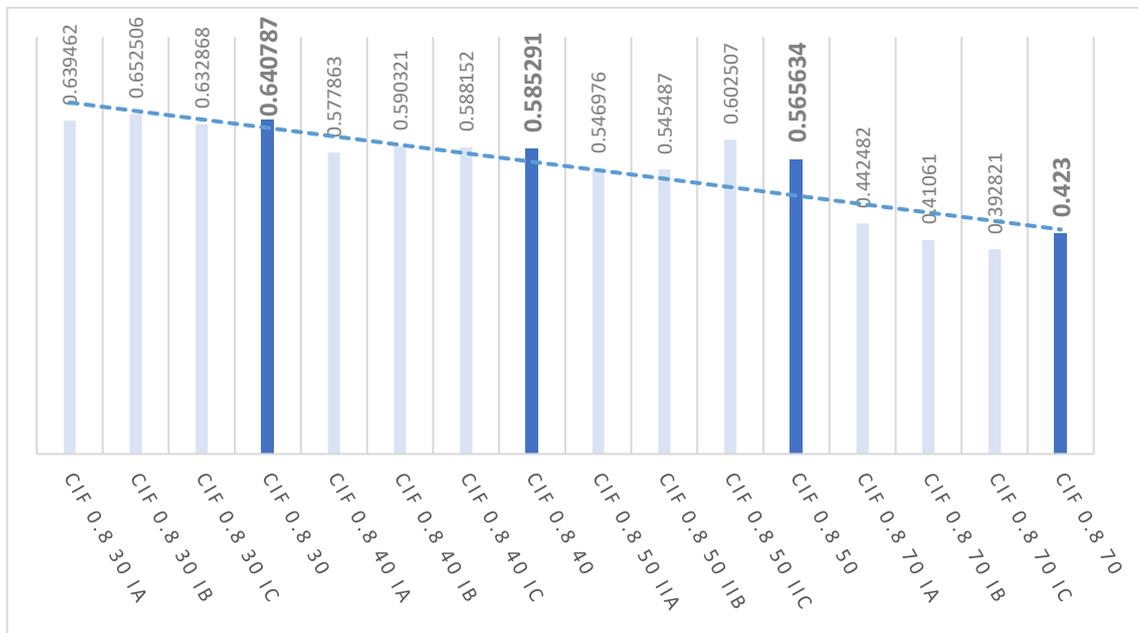


Fig 93 Valori di induzione residua $[B_r]=T$



Fig 94 Andamento di campo coercitivo $[H_{cb}]=kA/m$

3. Commenti e confronti

Per futuri studi sono state eseguite anche misure su tutti e 4 i quadranti (B-H) di alcuni materiali a campione, per ottenere il ciclo di isteresi completo. Questa operazione ha richiesto qualche aggiustamento ulteriore in quanto i valori di saturazione (B_{sat}) hanno causato **problemi di compensazione** delle misure, di conseguenza è stato necessario cambiare la bobina di misura, riporto qui sotto un confronto tra il grafico ricavato con una bobina che non riesce a restituire una misura corretta ai valori di saturazione (LJT26) e la misura corretta (LJT42).

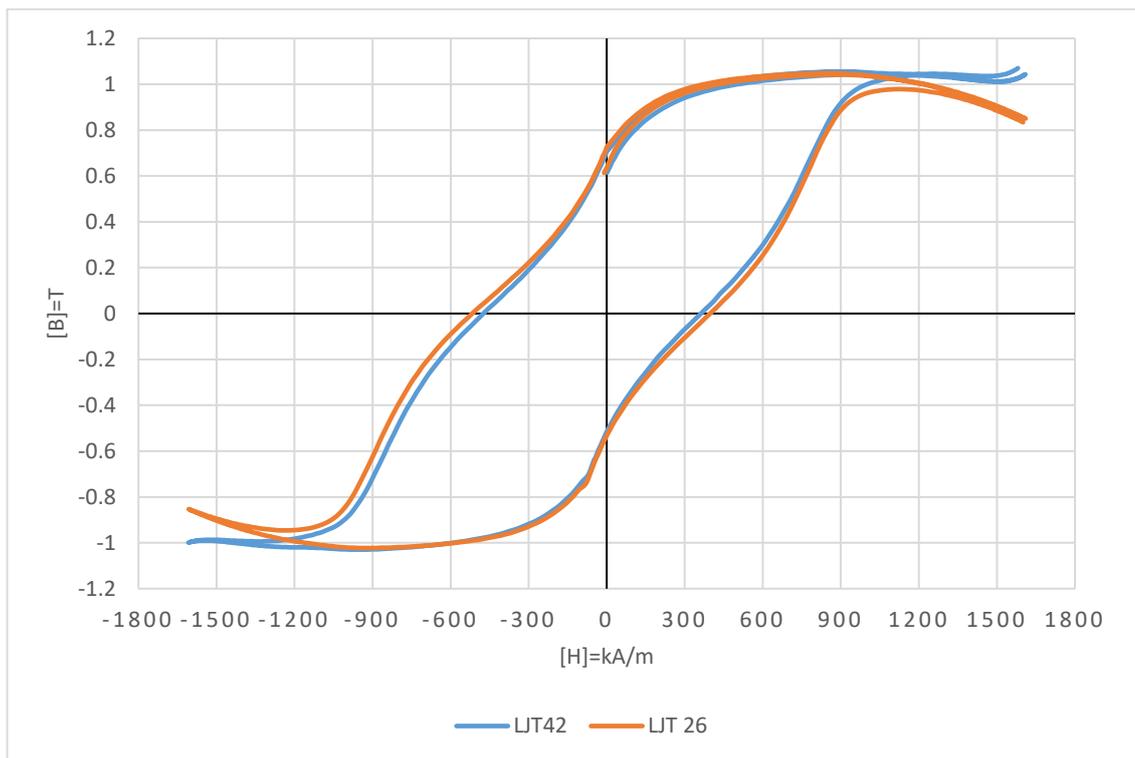


Fig 95 Ciclo di isteresi completo $B(H)$ per il campione CIF 0.5 30 II C

Si noti l'accento di curva di prima magnetizzazione in entrambi i casi e l'errore di misura per la LJT26 che tende a scendere oltre i 900kA/m a causa dell'incapacità della bobina di eseguire le misure in queste condizioni. Inoltre, il fatto che al valore B_{sat} positivo la curva non si chiuda perfettamente a causa di problemi dei circuiti integratori che eseguono la misura. La loro calibrazione è fondamentale per avere misure accettabili e sono soggetti a deriva, soprattutto termica, che sposta i punti di misura.

La forma particolare dei cicli di isteresi di questi materiali è causata dalla preponderanza della fase ferromagnetica dolce (ferro puro) sulla parte ferromagnetica dura (NdFeB), una distorsione rispetto alla classica forma che è ancora più accentuata nelle miscele in cui il ferro è molto più presente (Fig 96).

Analisi dei risultati

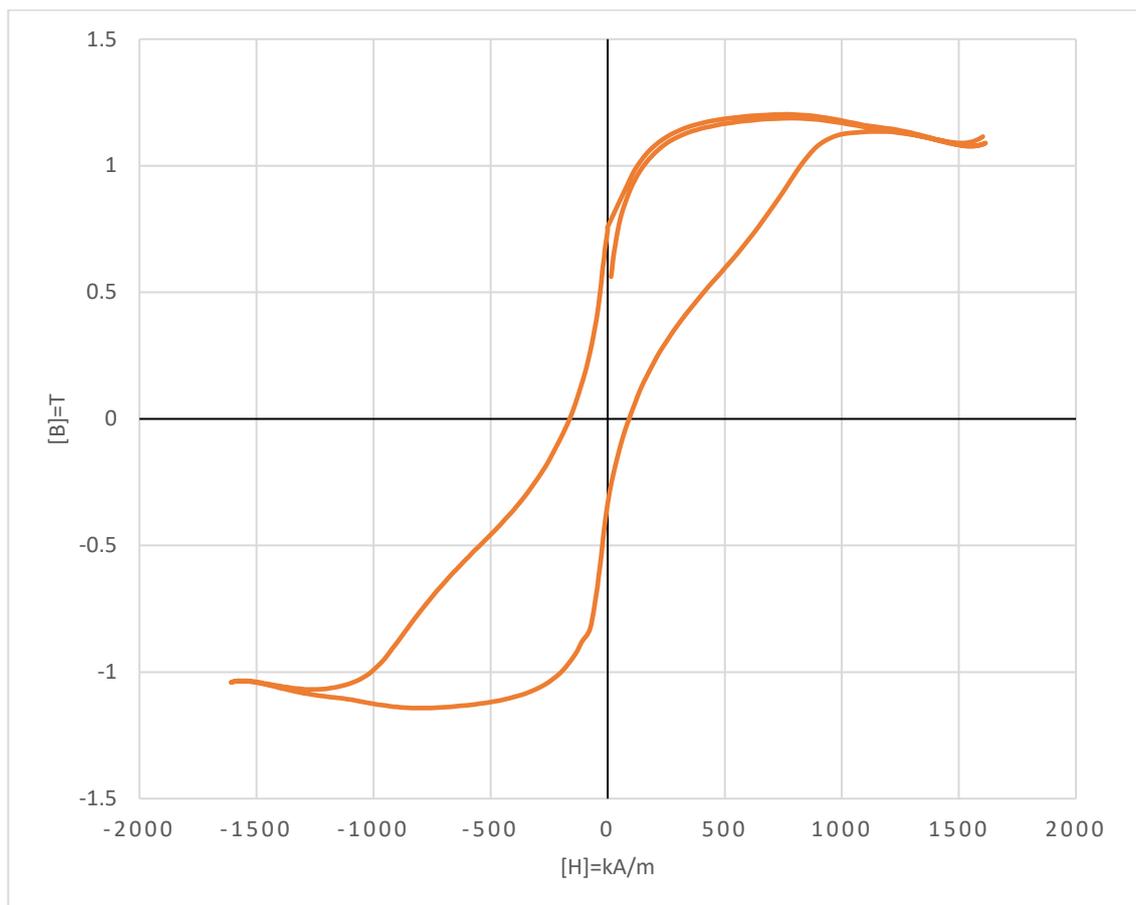


Fig 96 Ciclo di isteresi completo $B(H)$ del campione CIF 0.8 50 II A

Per completezza riporto anche il ciclo di isteresi come viene rappresentato dall'isteresigrafo al termine di una prova, notare che $J(H)$ è la curva con i valori di Induzione più alti.

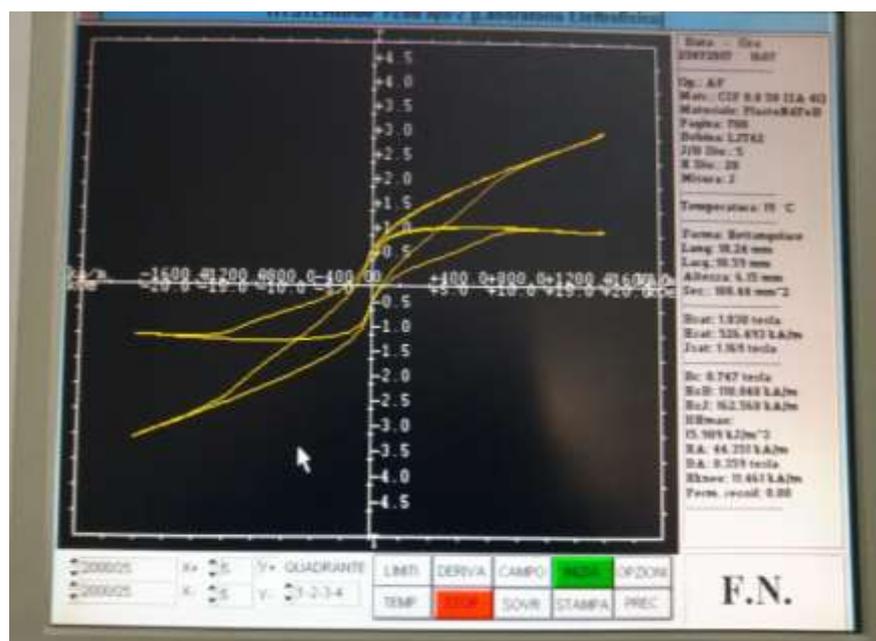


Fig 97 Cicli di isteresi $B(H)$ e $J(H)$ come si presentano sul terminale dell'isteresigrafo

Analisi dei risultati

Queste due famiglie di materiali sono state inserite nel simulatore FEMM per studiarne il comportamento ottenendo i seguenti risultati per forza meccanica ed elettromotrice, riporto i grafici completi per tutte le grandezze e gli istogrammi riassuntivi sempre in PU con come base l'AlNiCo5:

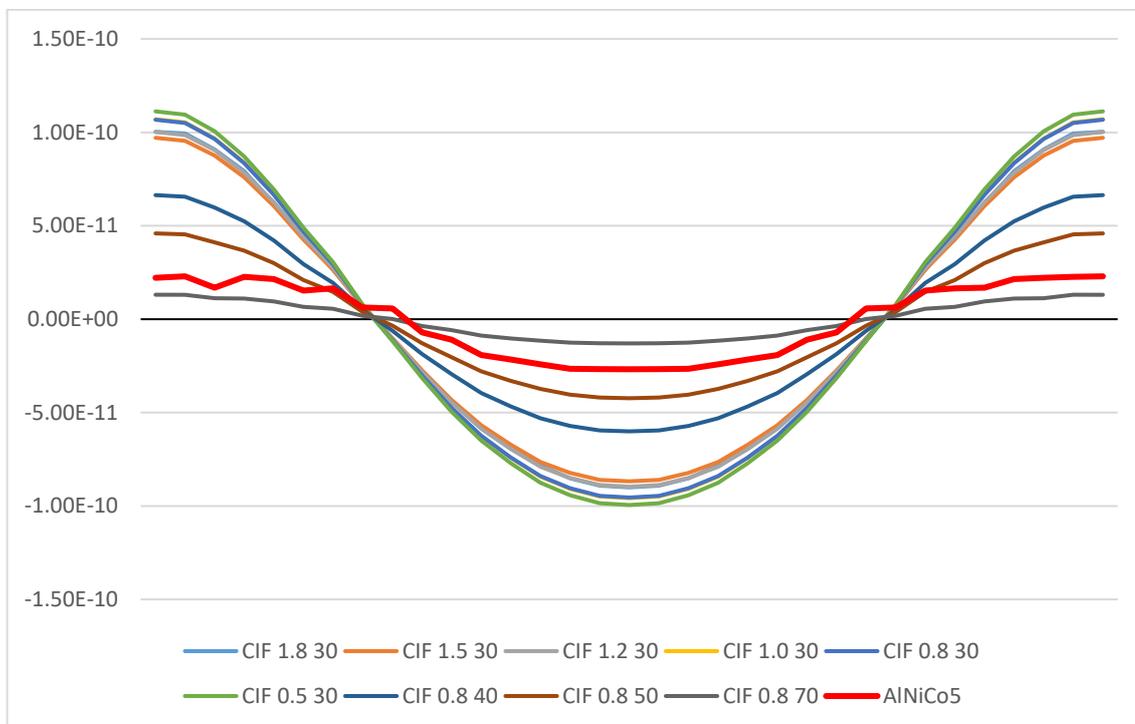


Fig 98 Andamento del flusso concatenato, depurato del valor medio

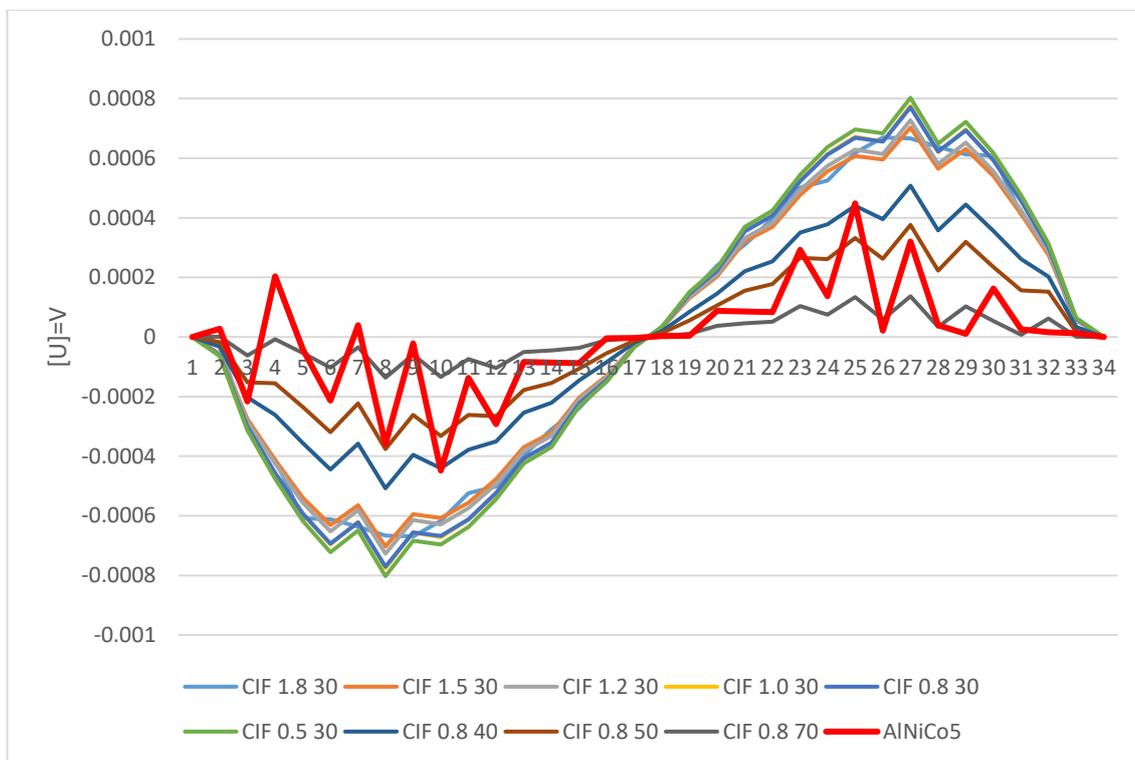


Fig 99 Andamento della forza elettromotrice

Analisi dei risultati

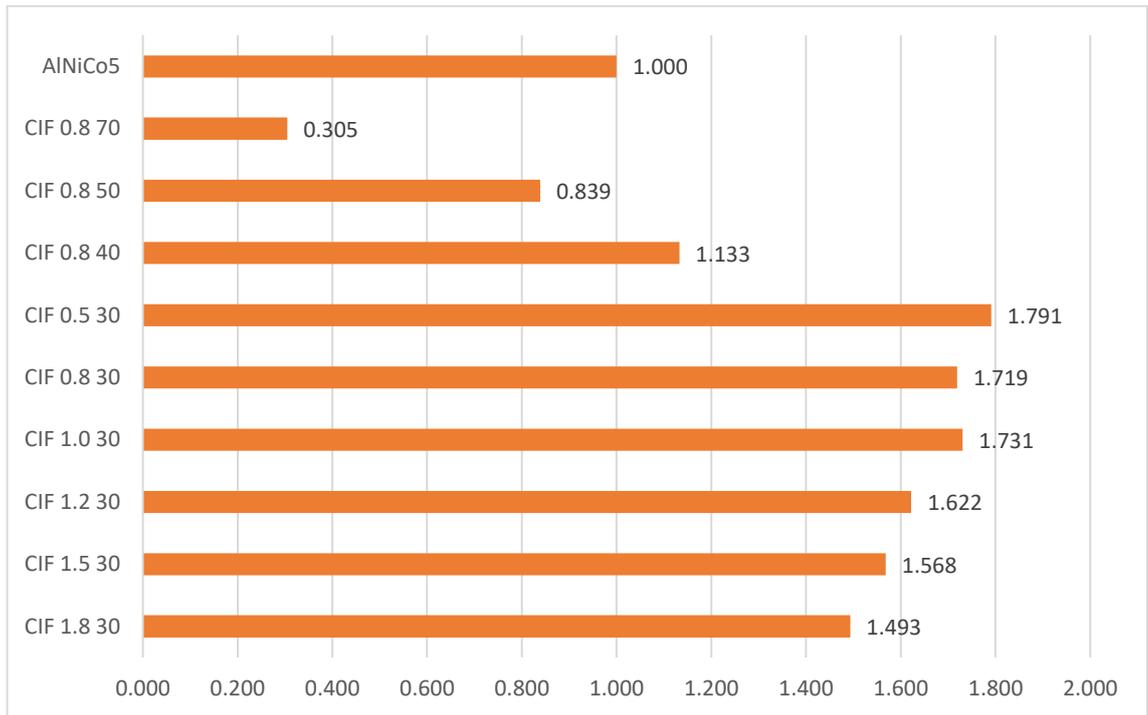


Fig 100 Istogramma riassuntivo in PU per la forza elettromotrice

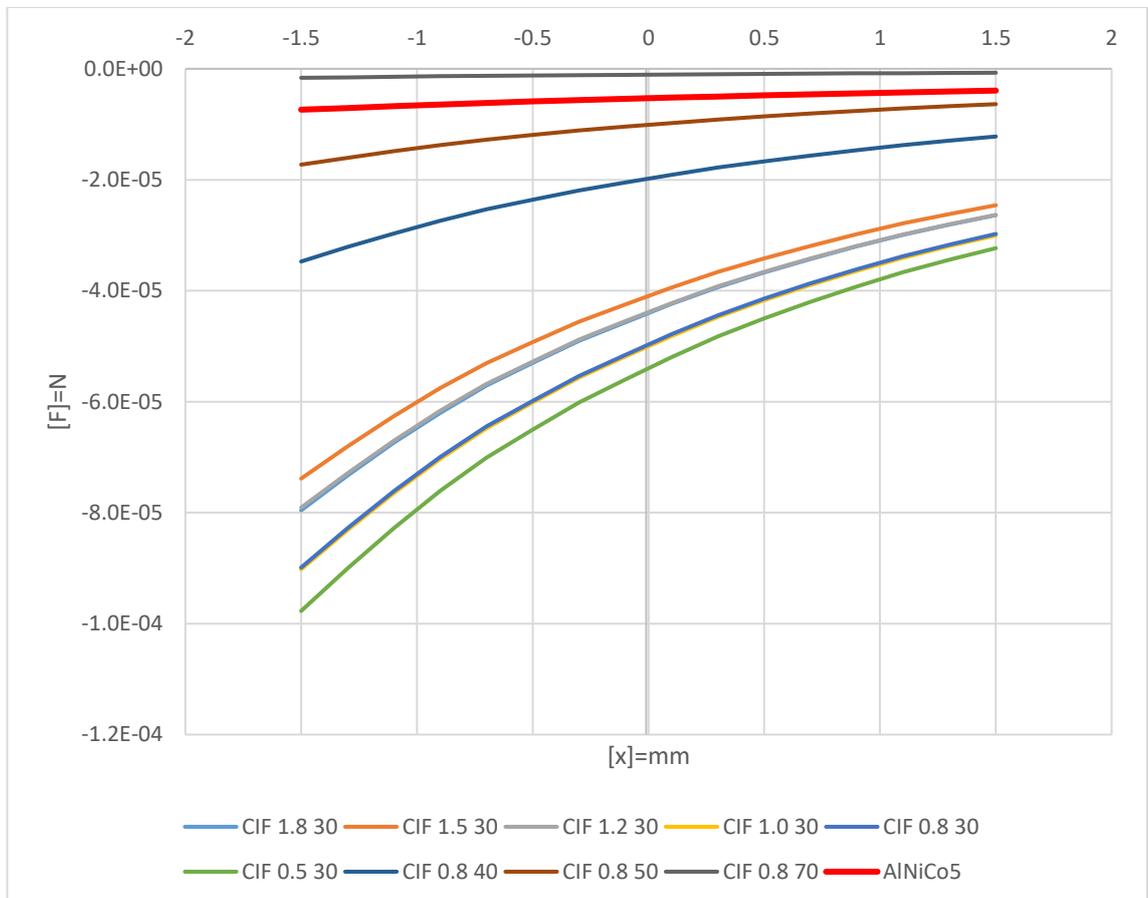


Fig 101 Andamento della forza meccanica

Analisi dei risultati

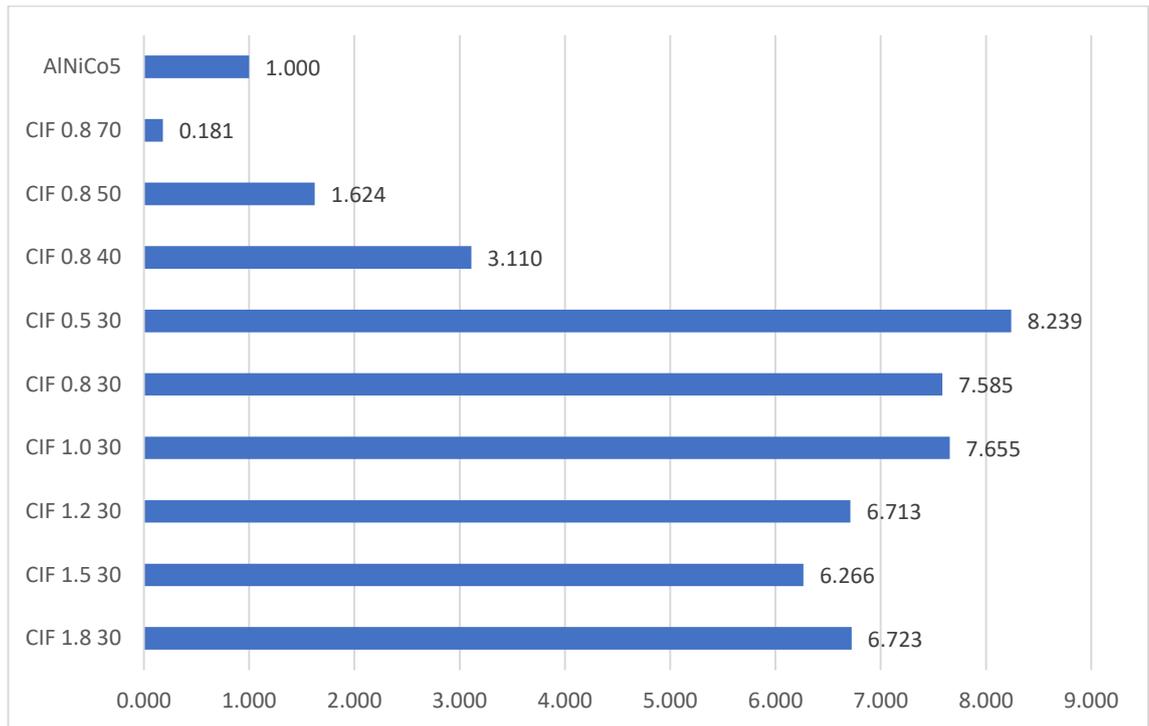


Fig 102 Istogramma riassuntivo per le forze meccanica in PU

I risultati sono eloquenti: i materiali ibridi sono notevolmente più performanti in termini di forza elettromotrice esercitando però forze meccaniche più alte di un AlNiCo5. Rimane comunque chiaro che anche se si tratta di moduli 6÷8 volte quella del riferimento, sono valori di forza di qualche mN e dalle esperienze precedenti si sa già che un materiale come il CIF 1.8 30 fosse ottimo per questo genere di applicazioni. L'obiettivo fin dall'inizio è stato quello di migliorarlo e gli effetti sulla forza elettromotrice sono più che promettenti.

Modello analitico

Prima di passare al capitolo successivo accenno brevemente ad una parte del lavoro che purtroppo non ha portato ai risultati sperati. Si è cercato di capire se fosse possibile creare un modello matematico in grado di correlare direttamente le composizioni con le relative caratteristiche magnetiche, almeno in prima approssimazione le intersezioni con gli assi. Purtroppo, la popolazione di dati a mia disposizione non era sufficiente e troppo frammentata per poter impostare un modello in grado di dare risultati soddisfacenti.

Diagrammando gli andamenti di B_r e H_{cb} in funzione delle due variabili %Re e %Fe, l'unica correlazione diretta trovata è quella tra il campo coercitivo e la percentuale di Ferro (Fig 105) che ha un chiaro andamento esponenziale decrescente all'aumentare della percentuale di ferro, confermata dal test R^2 . Negli altri casi gli andamenti sembrano approssimativamente lineari ma con un legame meno marcato.

Analisi dei risultati

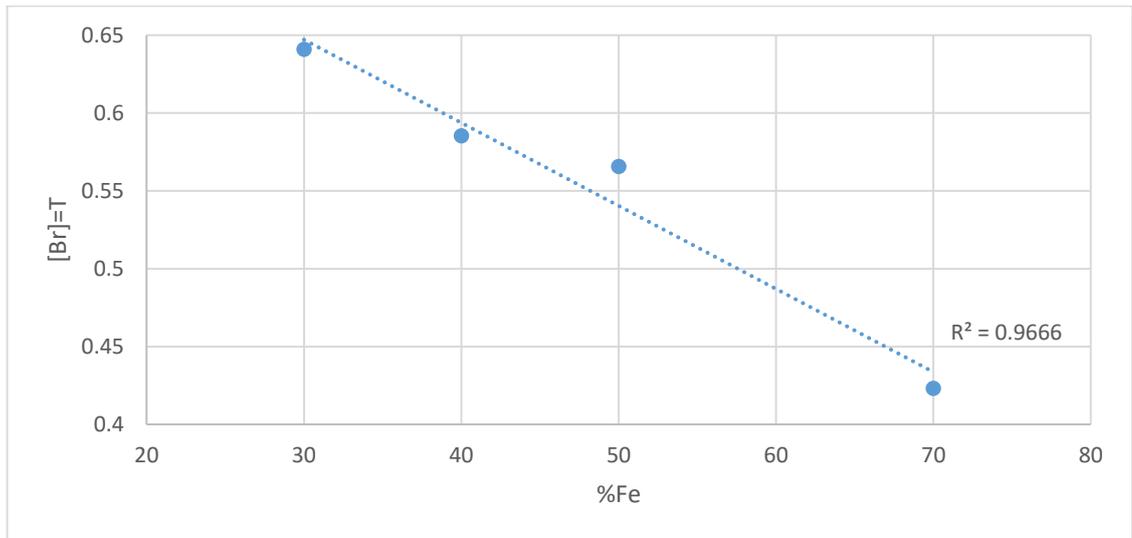


Fig 103 Induzione residua in funzione della percentuale di ferro

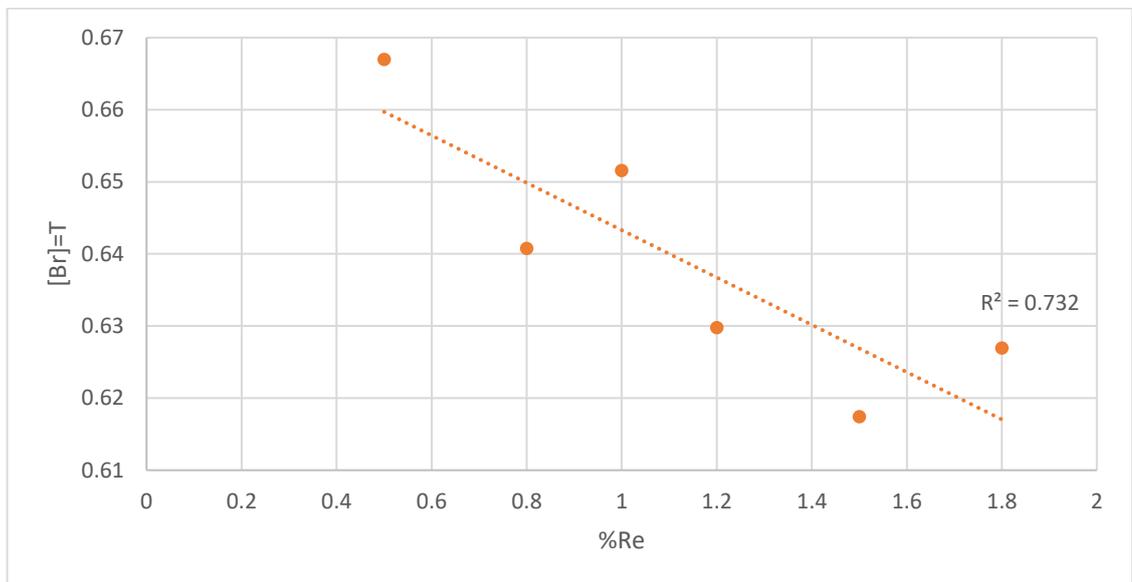


Fig 104 Induzione residua in funzione della percentuale di resina

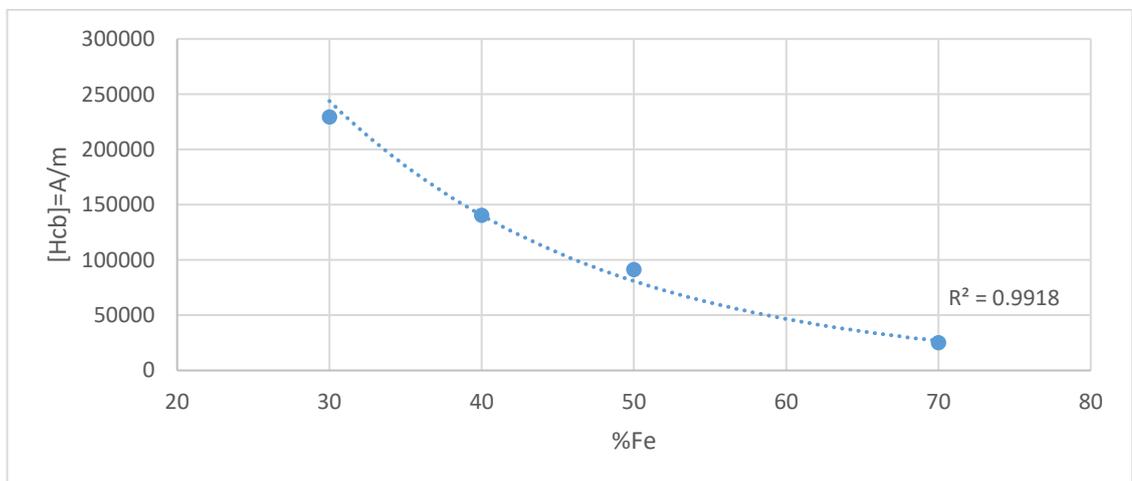


Fig 105 Campo coercitivo in funzione della percentuale di ferro

Analisi dei risultati

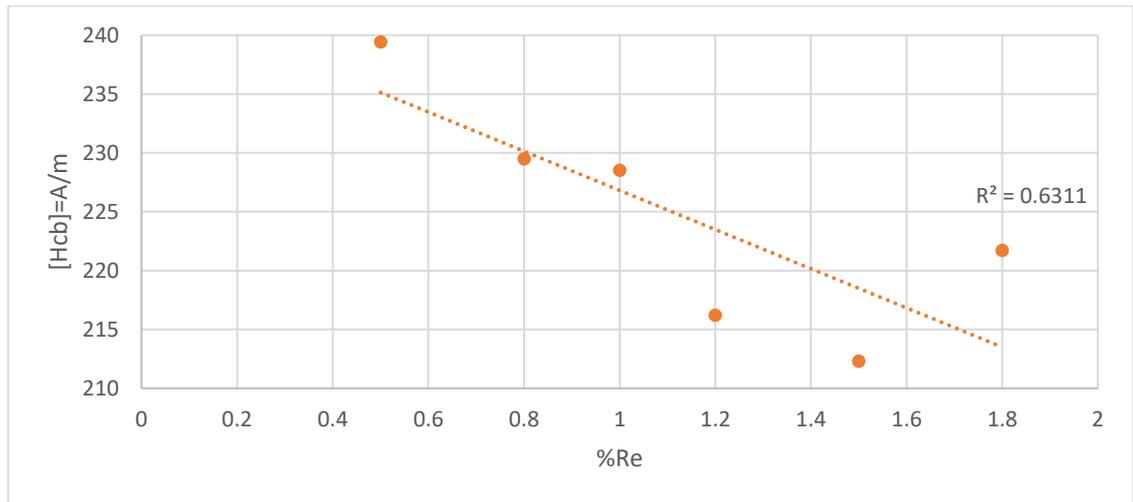


Fig 106 Campo in coercitivo in funzione della percentuale di resina

Rimane chiaro che si tratta di misure isolate in cui un'unica variabile è utilizzata mentre la seconda rimane fissa (e.g. le percentuali di ferro sono prese tutte con la resina fissata a 0.8%), provando a farle variare entrambe ho impostato un sistema lineare di due equazioni in due incognite in questo modo:

$$\begin{cases} a \cdot (\%Re) + b \cdot (\%Fe) = B_r \\ c \cdot (\%Re) + d \cdot (\%Fe) = H_{cb} \end{cases}$$

Con i coefficienti: (a, b, c, d) da calcolare una sola volta, per poi avere un impianto analitico in grado di predire induzione residua e campo coercitivo, noti i materiali che compongono la miscela. Questa strada si è rivelata una strada non percorribile di conseguenza questo tentativo di approccio è stato **scartato**. Rimane comunque ipotizzabile l'impostazione di un modello più preciso ma solo a valle di un campionamento più fitto delle caratteristiche, facendo variare le percentuali più finemente e aumentando abbondantemente la popolazione. A giudicare dalla quantità di tempo che ha richiesto a me ritengo che sarà un lavoro molto lungo.

VIII. PROTOTIPAZIONE PICKUP

1. Campioni per pickup

I materiali scelti per la realizzazione dei prototipi sono tre: CIF 0.8 30, CIF 0.8 40 e CIF 0.8 70.

Come già detto lo 0.8% di resina si è rivelata la condizione limite di coesione meccanica dei plastomagneti, di conseguenza sono stati scelti i tre materiali meglio equidistanziati in termini di percentuali di ferro per poter valutare al meglio le prestazioni reali.

2. Fresatura

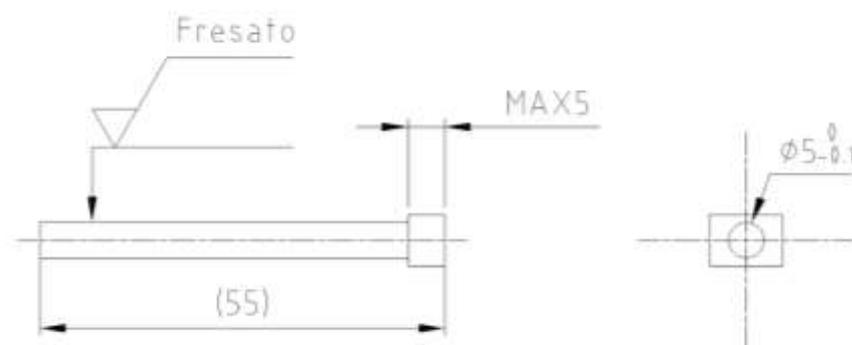


Fig 107 Disegno della lavorazione

Per poter realizzare i poli magnetici di un pickup single coil si è optato per una scelta realizzativa poco intuitiva ma obbligata dall'assenza di uno stampo sviluppato ad hoc per questa forma. Sono stati realizzati due Charpy per ogni materiale, fresati per circa 50mm seguendo un profilo cilindrico dal quale poi sono stati ricavati i singoli poli tramite taglio con disco abrasivo, sempre montato sul centro di lavoro CNC. In totale servono 6 cilindri $\phi 5\text{mm} \times 20\text{mm}$ per ogni materiale.

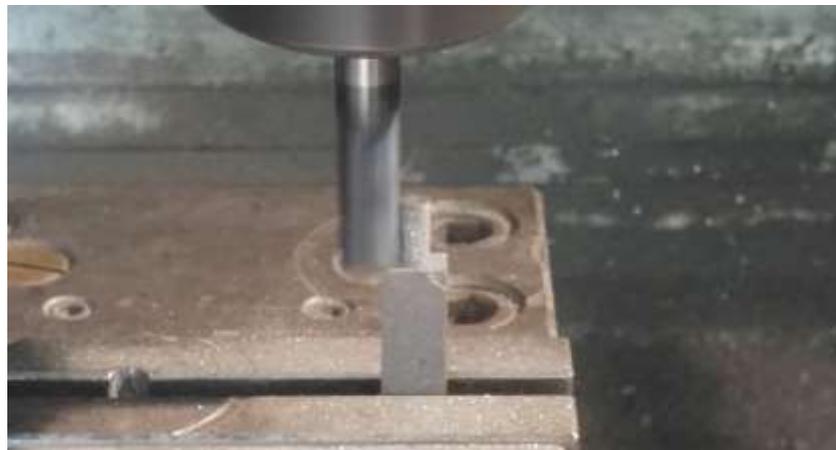


Fig 108 Fresatura di uno Charpy



Fig 109 Profilo di fresatura sul controllo CNC



Il rischio è alto, dato che si tratta di materiali tendenzialmente fragili e con bassi carichi di rottura ($40\div 60\text{MPa}$) quindi la riuscita non è assolutamente garantita. Inoltre, bisogna tenere presente che questo processo ha circa il 40% di scarto, considerando il solo sfrido di lavorazione.

Per l'operazione è stata utilizzata un centro di lavoro a 3 assi Cortini M500 con controllo Fidia. La lavorazione è stata eseguita con una fresa a candela in HSS da 12mm di diametro, per ridurre lo sforzo sul pezzo sono state eseguite passate circolari da 0.5mm a 1000 giri/min e, sempre per evitare fratture, l'avanzamento è stato tenuto basso ($75\div 80\text{ m/min}$). La realizzazione dei poli ha richiesto circa 10 ore di macchina.

Il materiale che si è rivelato più fragile è il CIF 0.8 30 che infatti si è rotto durante la lavorazione; fortunatamente la frattura è avvenuta in un punto tale da permette di riprendere il pezzo con un mandrino e poter completare la lavorazione evitando di dover preparare altri Charpy. Si conferma che la percentuale di ferro faccia variare drasticamente le prestazioni meccaniche infatti la semplice rimozione a mano delle bave dovute al taglio ha richiesto circa 5 minuti sul CIF 0.8 30 e più di mezz'ora sul CIF 0.8 70.

3. Assemblaggio e prove in camera anecoica

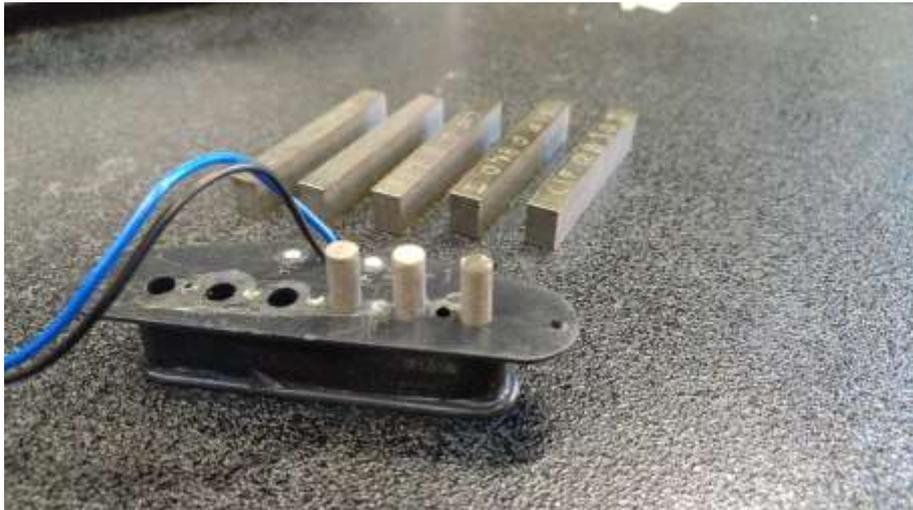


Fig 111 Pickup di prova con tre poli assemblati e i rimanenti Charpy da lavorare



La realizzazione completa di un pickup partendo da zero avrebbe richiesto un discreto lasso di tempo, attrezzature di cui il laboratorio non dispone e non sarebbe stata esente da problematiche. Per evitare di sviare dall'obiettivo della tesi e procedere subito con le prove, è stato deciso di utilizzarne uno commerciale a cui sono stati rimossi i poli. La quota di lavorazione di ($\varnothing 5 +0/-0.1\text{mm}$) è stata scelta apposta per poter garantire l'inserimento e la rimozione agevole dal supporto plastico, i poli sono tenuti in posizione dalla sola interferenza. Per accelerare le operazioni di

magnetizzazioni è stato realizzato un supporto plastico (Fig 112) al tornio, poi forato sul trapano a colonna, per inserire tutti e sei i poli nel magnetizzatore contemporaneamente.



Fig 113 Pickup assemblato sulla chitarra di prova

Prototipazione pickup

Ho poi proceduto a saldare direttamente i terminali del pickup ad un connettore jack TS da 6.35mm per poterlo collegare a mezzi di amplificazione esterni.

La prima prova eseguita sul pickup è stata di natura qualitativa, per verificare che tutti i poli funzionassero e che il suono fosse accettabile. Nella camera anecoica del laboratorio ho predisposto il mio setup personale, in maniera tale da poter fare confronti diretti in quanto, nel mondo chitarristico è una pratica comune utilizzare amplificatore ed effetti di cui si conoscono bene le sonorità. L'amplificatore utilizzato è un Fender Hot Rod Deluxe III, a valvole, uno tra i modelli più diffusi attualmente sul mercato.



Fig 114 Prove in camera anecoica



La camera anecoica è stata utile per poter raggiungere i volumi necessari senza disturbare le attività del laboratorio e per avere un ambiente il più possibile silenzioso dove fare i giusti confronti

Le prove sono state utili per confermare che il pickup funziona, che è la cosa più importante, il CIF 0.8 30 e il CIF 0.8 40 sono indistinguibili all'orecchio. Per quanto riguarda invece il CIF 0.8 70 l'esito non è stato positivo, si è presentato un problema di cancellazione del suono per una o due corde a seconda dei casi. La prima ipotesi era che alcuni magneti non fossero magnetizzati correttamente, ma questo si è rivelato non vero. Anche scambiando

i poli il risultato è rimasto il medesimo, non è chiaro perché si sia verificato questa anomalia, la tesi più probabile è che, essendo i magneti molto deboli, si sia creato un fenomeno di

Prototipazione pickup

cancellazione dovuto alla non perfetta uniformità dei valori di magnetizzazione, di conseguenza alcuni poli sono diventati prevalenti sugli altri rendendo di fatto mute alcune corde rispetto alle altre.

4. Risposta in frequenza di una corda

Circuito di prova

Per poter avere misure più caratterizzanti dei prototipi è stato predisposto un circuito di prova al quale collegare la chitarra, per poi poter elaborare i dati a terminale usando LabVIEW. La chitarra è stata collegata ad una scheda di prova, tramite cavo coassiale per garantire l'immunità da disturbi, inoltre è stata messa una resistenza di carico da $1M\Omega$ in parallelo per fissare l'impedenza del circuito e il partitore resistivo di tensione è disaccoppiato tramite un apposito buffer.

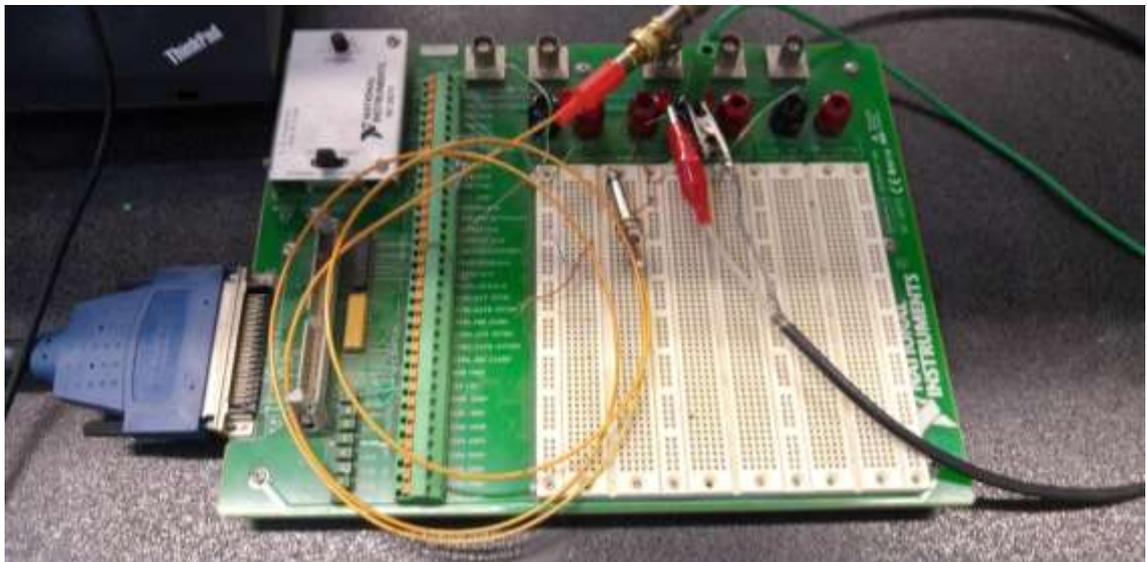


Fig 116 Impianto di prova

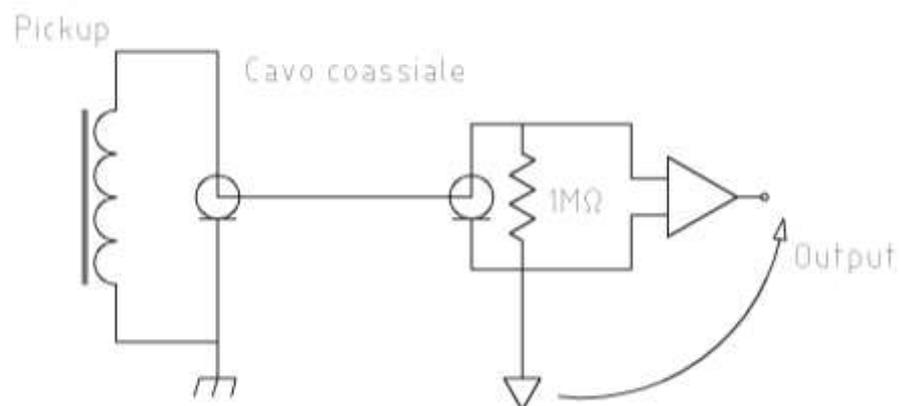


Fig 117 Schema del circuito di prova

EBow



Nei lavori di tesi precedenti si era già presentato il problema di come andare fisicamente a mettere in vibrazione la corda per poter ottenere risultati confrontabili tra varie prove. Nel mondo musicale esistono svariati modi di suonare uno strumento a corda, tutti però difficilmente ripetibili in serie, in quanto se la misura fosse associata a, per esempio, un colpo di plectro eseguito manualmente, per quanto uno si possa impegnare ogni colpo sarà diverso da quello precedente.

In laboratorio era stato creato un sistema automatico in cui un motore andava a ruotare un plectro per suonare ripetutamente una corda (Fig 118), per il mio lavoro è stato scelto di provare una nuova strada.



Fig 119 EBow

L'idea è quella di utilizzare un EBow (ebow.com), uno strumento disponibile in commercio che tramite piccole variazioni di campo magnetico mette in vibrazione una corda simulando il funzionamento di un archetto da violino. Per fare ciò l'EBow è fornito di due solenoidi affacciati sulla corda, il primo esegue una misura della riluttanza, come un pickup, rilevando i passaggi per lo zero della corda. Questa misura va a comandare la seconda bobina che viene alimentata ad ogni passaggio dando un impulso concorde con il movimento stesso della corda. In questo modo viene mantenuto il moto oscillatorio della corda. Questo causa un transitorio iniziale in cui l'EBow si accorda sulla frequenza di oscillazione della corda per poi continuare ad eccitarne l'oscillazione con treni di impulsi alternati.

Per poter utilizzare questo strumento però è necessario creare un supporto che lo ancori alla chitarra, garantendo un minimo di spazio per la regolazione dell'altezza rispetto alla corda. Per fare ciò ho disegnato su Rhinoceros un supporto che poi ho realizzato tramite una stampante 3D (Fig 120).

La prova viene eseguita rapidamente mettendo in vibrazione la seconda corda, come su FEMM, per poi lanciare la simulazione, registrare qualche secondo e poi spegnere l'EBow e lasciare evolvere l'oscillazione smorzata. In questo modo è possibile avere un dato preciso sul valore di U_{rms} per ogni materiale, potendo così valutare la bontà del modello FEMM. Inoltre, si può avere un'idea dello smorzamento causato dai magneti in quanto la costante di tempo della U_{rms} una

Prototipazione pickup

volta spento l'EBow sarà sicuramente una funzione della forza meccanica esercitata sulla corda dal magnete.

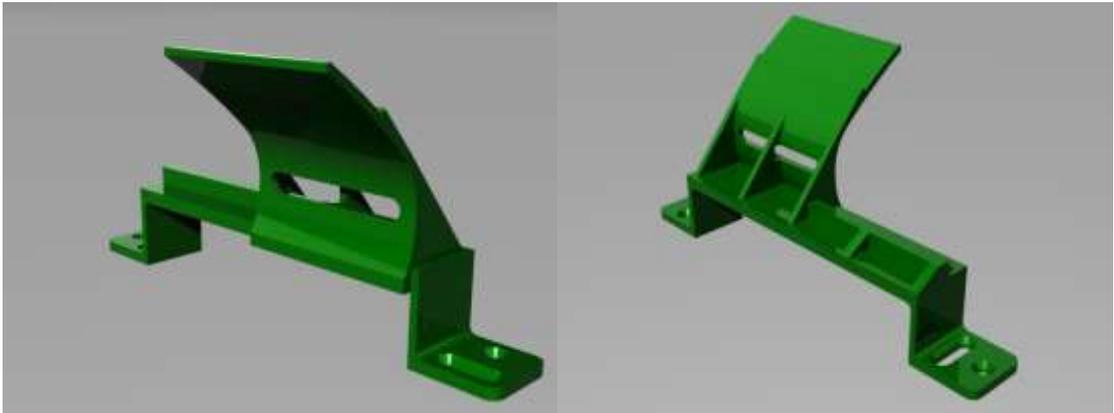


Fig 120 Render del supporto per EBow



Fig 121 Supporto in posizione

Il pannello su LabVIEW è stato impostato per poter avere subito tutte le informazioni necessarie a valutare i materiali:

1. Banda passante dello spettro analizzato
2. cursore per selezionare il ciclo di partenza dell'analisi FFT
3. cursore per selezionare su quanti cicli eseguire la FFT
4. Contenuto armonica per ottave ottenuto dalla FFT
5. Andamento di U_{rms} in funzione del tempo
6. Forma d'onda
7. Grafico PSD riferito ai cicli analizzati

Prototipazione pickup

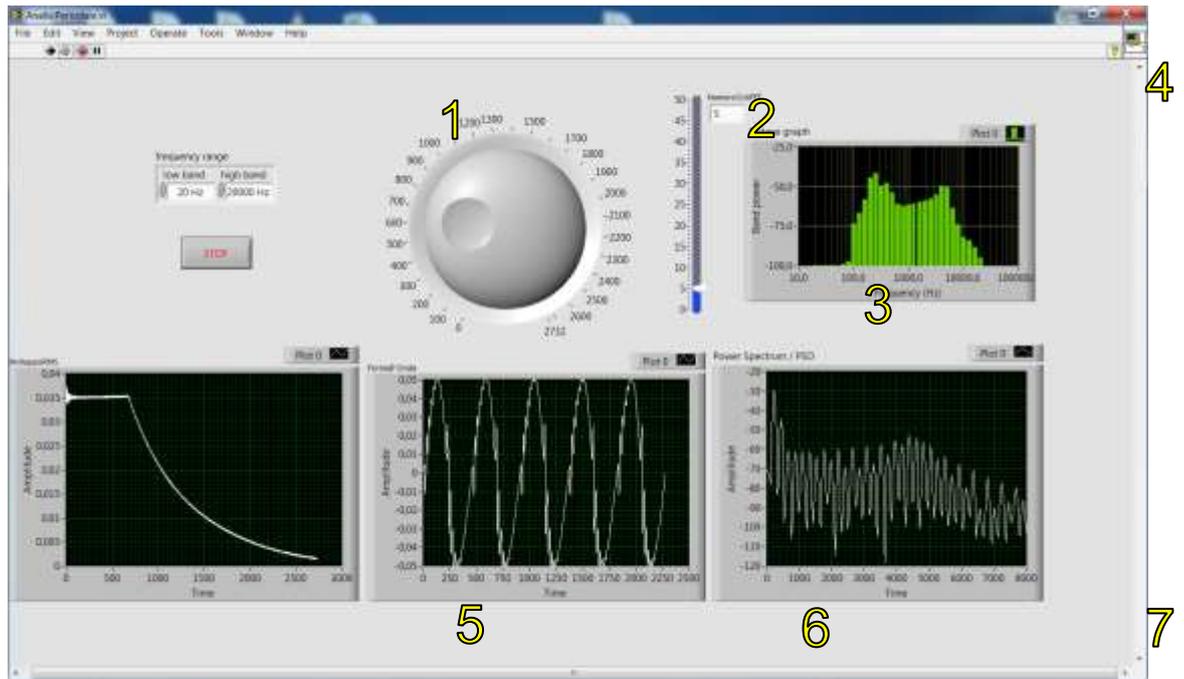


Fig 122 Pannello di controllo su LabVIEW

Agendo sui cursori 2 e 3 è possibile andare ad analizzare tutta la campionatura di dati, per poter distinguere varie fasi della prova. Sui dati più interessanti ho svolto poi un'elaborazione successiva.

Soprattutto per l'andamento di E_{rms} è necessaria un'elaborazione perché il momento in cui l'EBow è stato spento è diverso per ogni prova, del resto era impossibile sincronizzare le tre prove, questo è un esempio dell'andamento ottenuto:

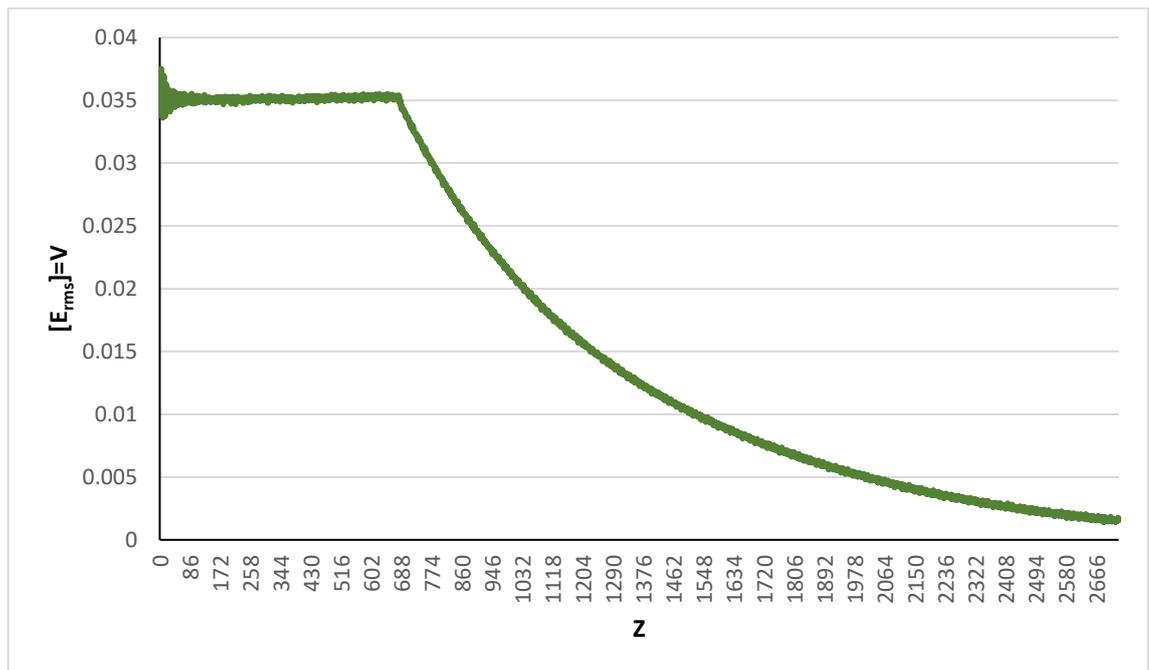


Fig 123 Andamento di U_{rms} per CIF 0.8 40 in funzione del tempo

Prototipazione pickup

Si distingue il transitorio iniziale durante il quale l'EBow inizia a muovere la corda, la fase stazionaria in cui la corda vibra seguendo gli impulsi e poi il transitorio dell'oscillazione libera. Faccio notare che sull'asse delle ascisse sono riportati i numeri di cicli a cui fanno riferimento le misure in quanto LabVIEW fa la misura di valore efficace ad ogni periodo di oscillazione della corda e ne salva il valore. Quindi i campioni corrispondono al numero di periodi e non al campionamento della forma d'onda che invece è di 50kHz. Essendo nota la frequenza di oscillazione della corda (110Hz) ogni campione (Z) del grafico corrisponde ad un intervallo di tempo di:

$$\Delta T_Z = \frac{1}{110 \text{ Hz}} \cong 0.0091 \text{ s}$$

Per ogni materiale riporterò i risultati delle prove insieme ad una serie di andamenti ricavati a campione dall'elaborazione dati, queste forme d'onda non saranno rappresentative dei valori di forza elettromotrice. Il calcolo per U_{rms} è eseguito sugli ultimi 50 valori prima che l'EBow sia disattivato. Invece riporto qui i tre andamenti esponenziali dell'oscillazione libera dai quali ricaverò una stima della costante di tempo (τ).

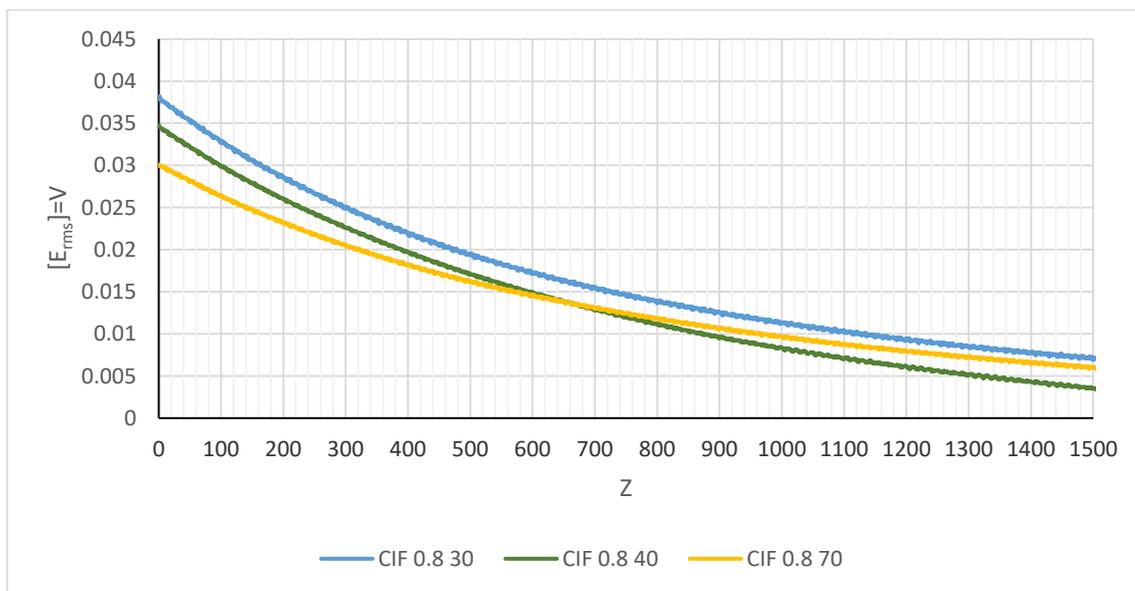


Fig 124 Andamento dei tre involucri delle oscillazioni libere

Prototipazione pickup

CIF 0.8 30

- $U_{\text{rms}} = 0.0381 \text{ V}$
- $T \approx 5.8 \text{ s}$

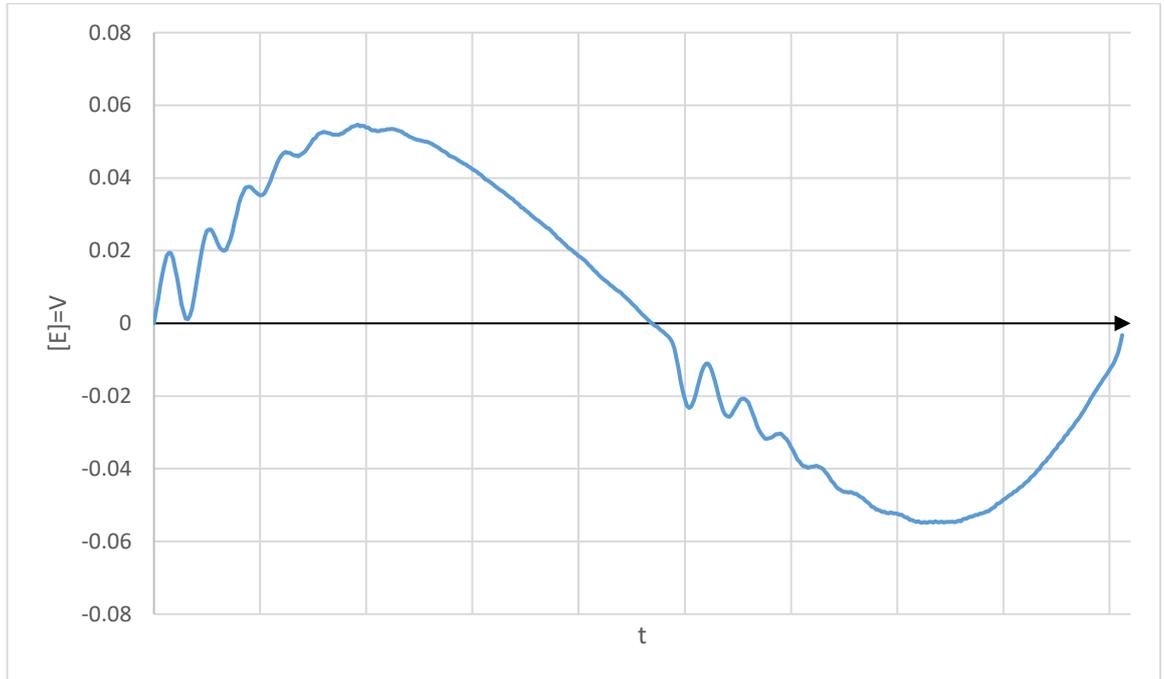


Fig 125 Forma d'onda per un ciclo (CIF 0.8 30)

Si notino i transitori di oscillazione ad alta frequenza iniziali dovuti agli impulsi dell'EBow che distinguono questa forma d'onda dall'oscillazione libera in cui la corda non riceve nessuno stimolo esterno.

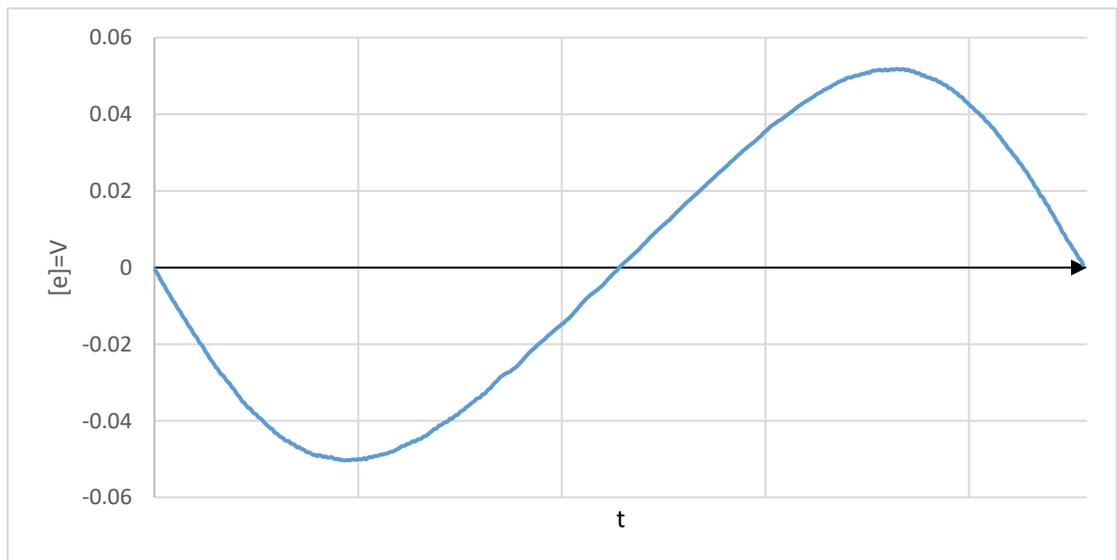


Fig 126 Oscillazione libera della corda (CIF 0.8 30)

Prototipazione pickup

CIF 0.8 40

- $U_{rms} = 0.0352 \text{ V}$
- $T \approx 6.6 \text{ s}$

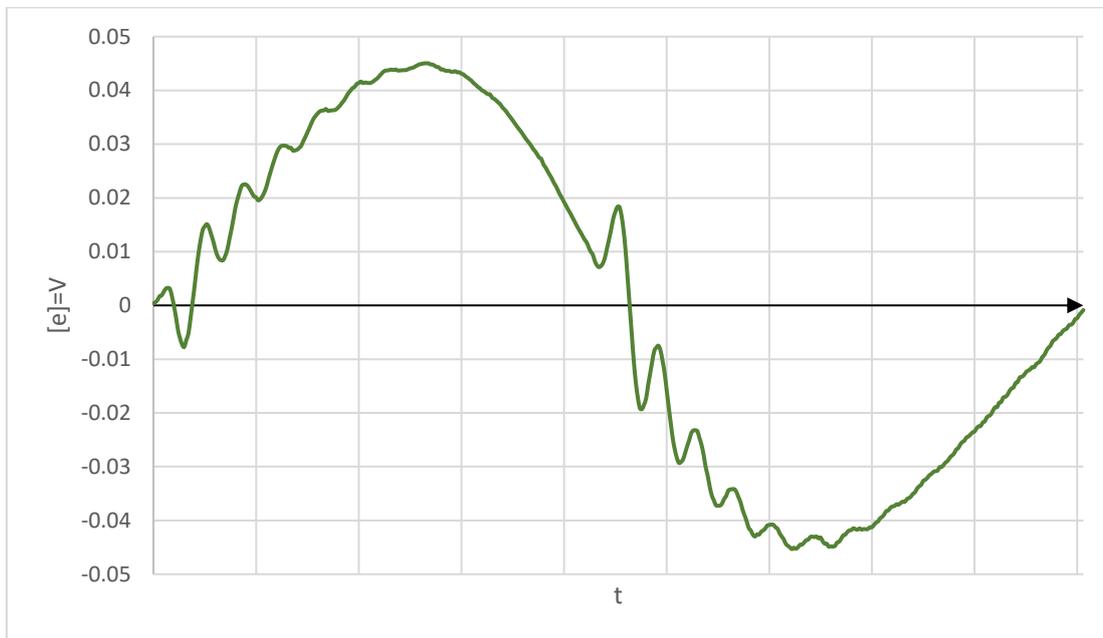


Fig 127 Forma d'onda (CIF 0.8 40)

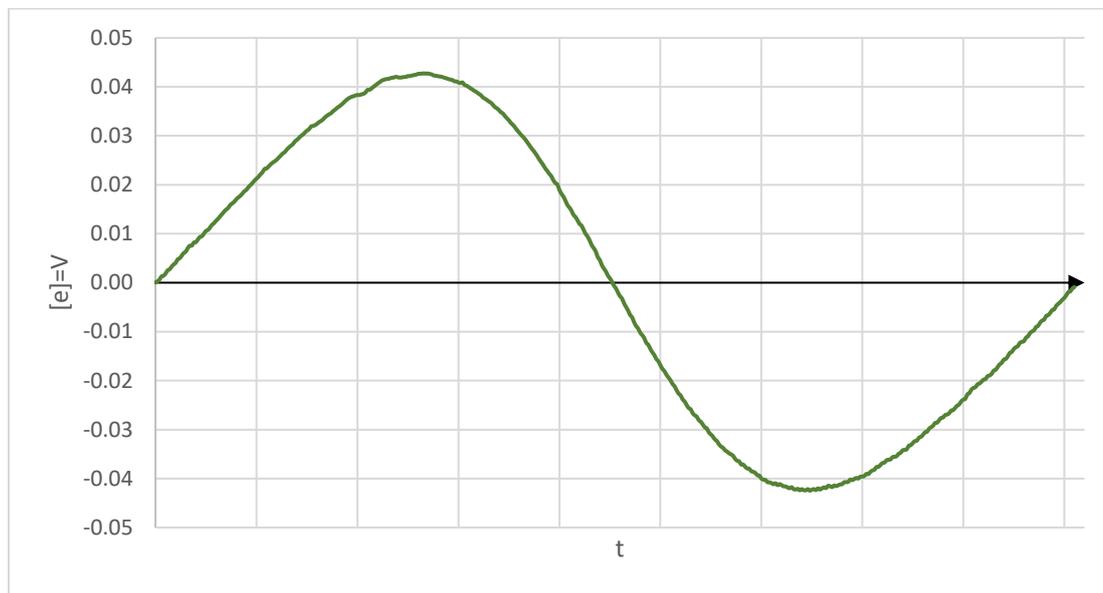


Fig 128 Oscillazione libera della corda (CIF 0.8 40)

CIF 0.8 70

- $U_{rms} = 0.0310 \text{ V}$
- $T \approx 7.3 \text{ s}$

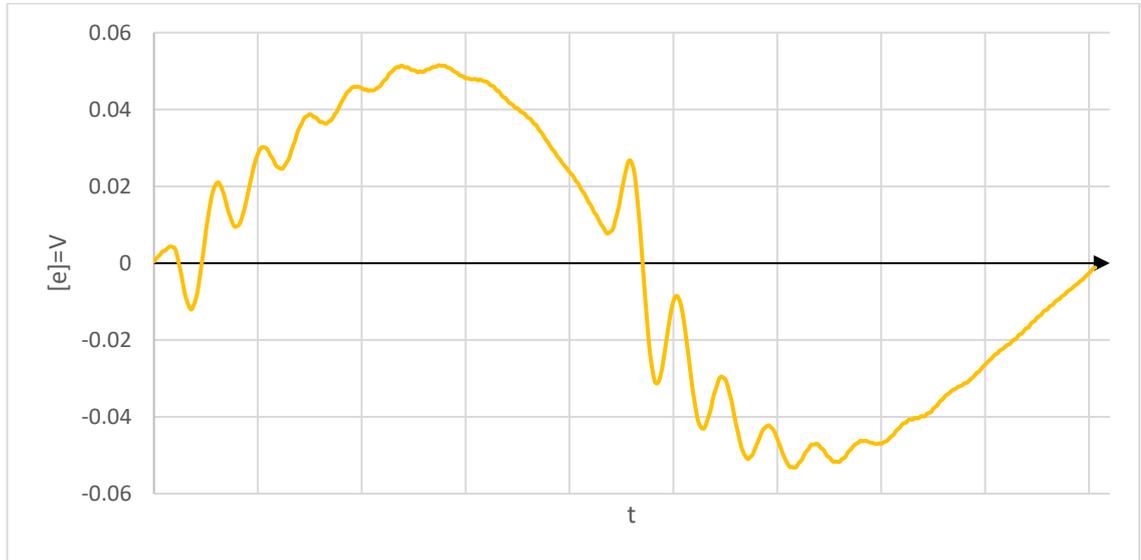


Fig 129 Forma d'onda (CIF 0.8 70)

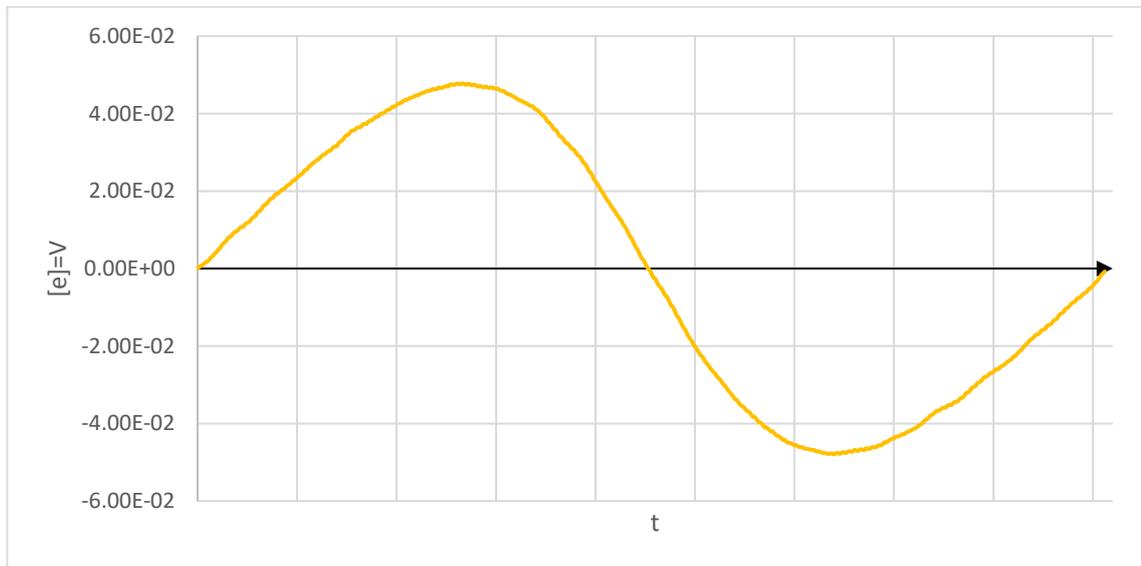


Fig 130 Oscillazione libera della corda (CIF 0.8 70)

5. Commenti e confronti

La analisi in frequenza evidenzia che i tre materiali sono sovrapponibili per il contenuto armonico nella banda passante (20÷1500) Hz, banda solitamente associata alle frequenze “medie-basse” di una chitarra, in cui effettivamente il pickup è molto presente, per poi andare tutti e tre a valori prossimi ai -90dB sullo spettro di alta frequenza. Si evidenziano per i tre materiali altrettante frequenze in cui hanno una leggera riduzione dell’attenuazione, rispettivamente:

Prototipazione pickup

- CIF 0.8 30 (6.3kHz, -80.7dB)
- CIF 0.8 40 (5.0kHz, -77.6dB)
- CIF 0.8 70 (4.0kHz, -78.4dB)

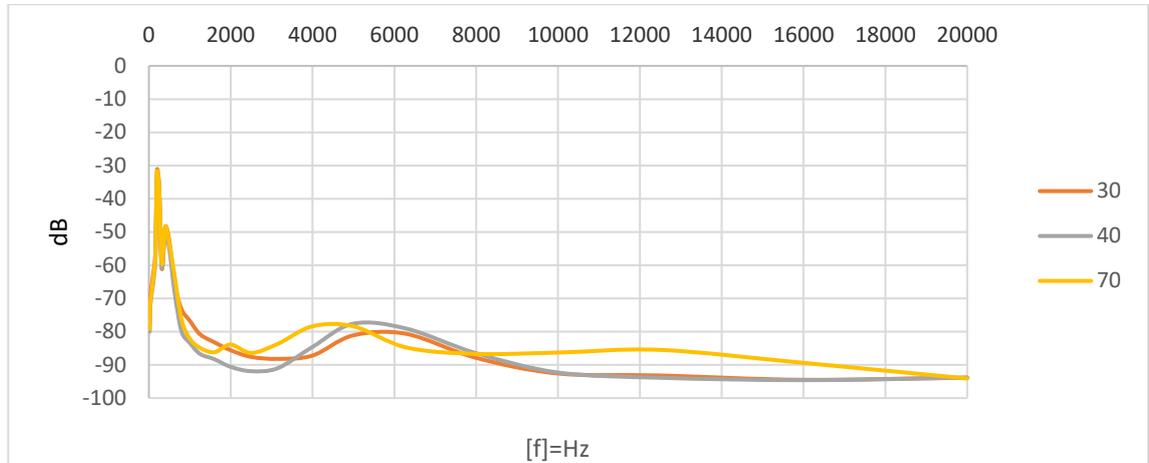


Fig 131 PSD tra 20Hz e 20kHz

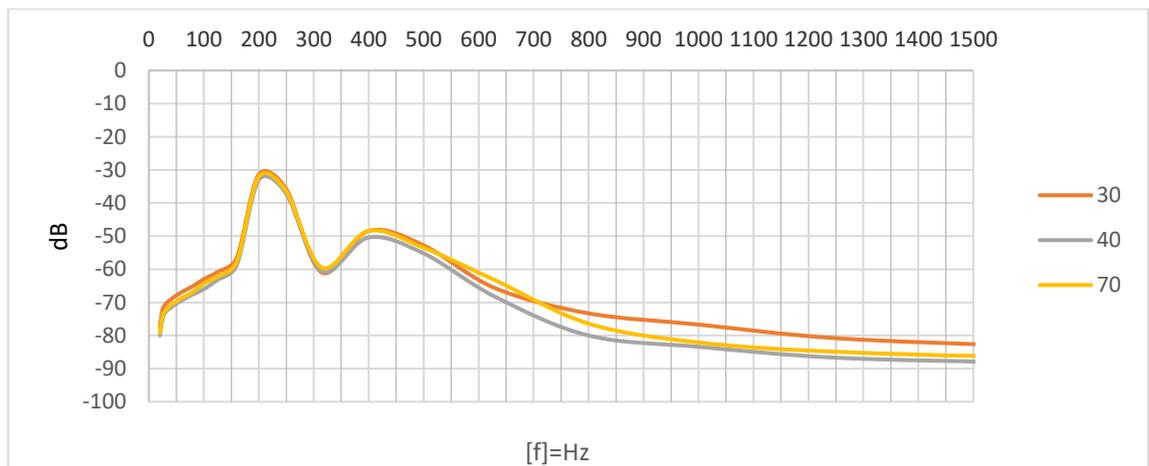


Fig 132 PSD tra 20Hz e 1500Hz

Come volevasi dimostrare la percentuale di ferro incide sul comportamento dei magneti, al suo aumentare scende la forza elettromotrice e sale la costante di tempo.

I valori di forza elettromotrice non sono assolutamente sovrapponibili a quelli calcolati dal modello, del resto non è noto il numero di spire della bobina, mentre il movimento della corda è impossibile da misurare precisamente. Rimane comunque una forte correlazione tra la percentuale di ferro nella miscela e i risultati in quanto il CIF 0.8 30 si conferma il materiale con la forza elettromotrice più alta e con la costante di tempo più corta.

Cronologicamente è solo a questo punto che è stata implementata la simulazione c di FEMM (pg. 34) per andare a migliorare la simulazione ed ottenere un programma più affidabile che infatti restituisce forme d'onda pressoché identiche a quelle ottenute nel collaudo del pickup.

IX. STUDIO DEL COEFFICIENTE TERMICO

1. Descrizione dello studio

Prendendo spunto dal lavoro fin qui svolto sui pickup per chitarra, una volta viste le prestazioni interessanti dei plastomagnetri ibridi, si è pensato di allargare lo spettro dell'analisi e concentrarsi sulle prestazioni magnetiche di questi materiali al variare della temperatura. Del resto, un generico VRS può essere installato all'interno delle più svariate applicazioni industriali, dove la temperatura può variare notevolmente e dove ai materiali magnetici è richiesto di mantenere le proprie caratteristiche all'interno di precise tolleranze. Partendo da uno studio eseguito dal CERN di Ginevra [12], che ha utilizzato il rame per stabilizzare il comportamento in temperatura dei magneti utilizzati nel LHC, si è deciso di studiare gli effetti di questo elemento chimico nei plastomagnetri ibridi.

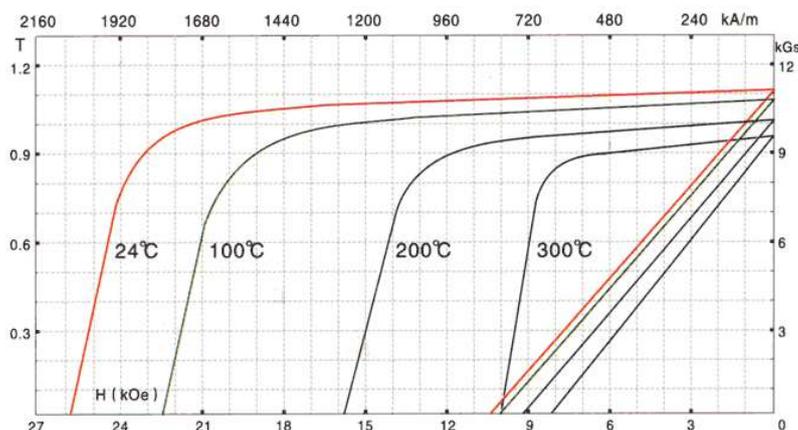


Fig 133 Caratteristiche $B(H)$ e $J(H)$ di un Sm_2Co_{17} in funzione della temperatura [13]

In generale la temperatura ha due effetti sui materiali magnetici: il più eclatante è il fenomeno che si verifica alla temperatura detta di Curie ma per temperature molto inferiori si osserva un progressivo degrado delle caratteristiche magnetiche, molto variabile a seconda del tipo di lega. Solitamente i produttori di magnetici forniscono le curve $J(H)$ e $B(H)$ in funzione della temperatura, oppure forniscono due coefficienti correttivi.

Coefficiente per l'induzione residua:

$$[\alpha] = \frac{\%}{^{\circ}C}$$

Coefficiente per il campo coercitivo:

$$[\beta] = \frac{\%}{^{\circ}C}$$

2. Preparazione campioni

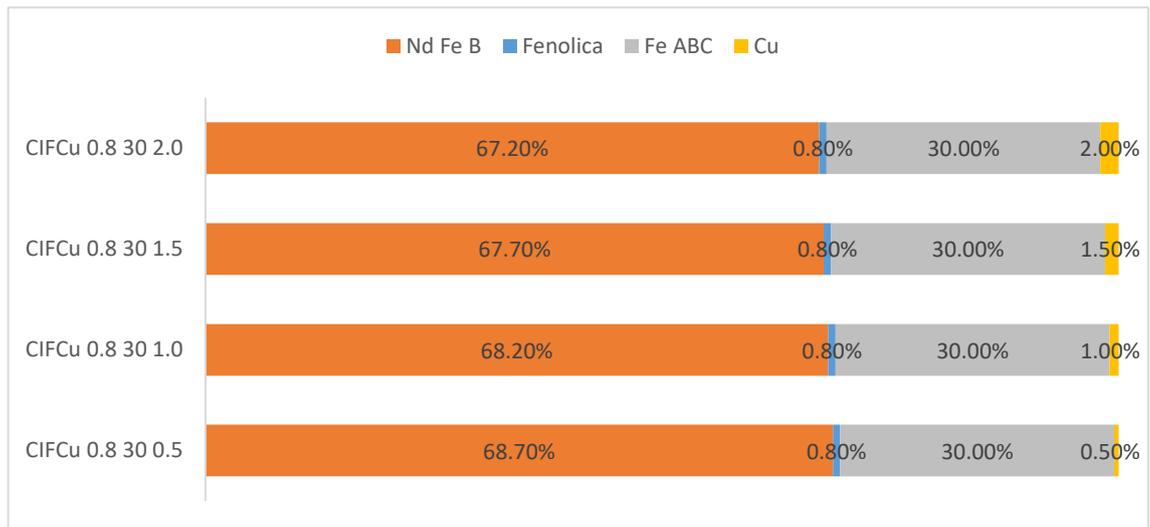


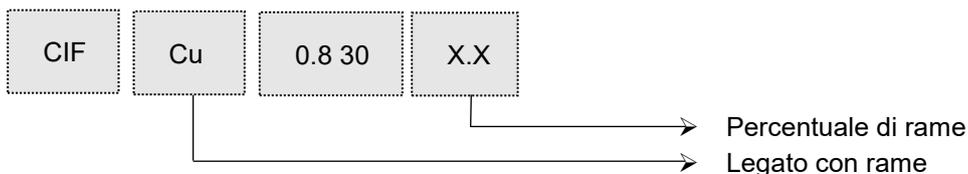
Fig 134 Composizione miscele con rame studiate



Per fare un confronto è stato scelto il CIF 0.8 30, essendo il materiale con B_r e H_{ob} più alto, al quale sono state aggiunte parti percentuali di polvere rame in sostituzione del NdFeB. Nello specifico si tratta di una lega di rame e stagno (90/10), che è già stata ritenuta adatta alla pressatura. La procedura di miscelatura, pressatura e cottura sono esattamente identiche a quelle precedenti. Sono stati prodotti uno Charpy per materiale, tagliato in tre sotto-campioni magnetizzati e sottoposti a caratterizzazione magnetica a diverse temperature.

3. Codifica

Chiaramente queste miscele necessitano di una classificazione a parte, essendo una nuova famiglia mai vista in laboratorio, è stata scelta una soluzione che risulta pesante alla lettura ma comunque rimane la più semplice possibile:



4. Analisi



Fig 136 Controllo riscaldamento poli su isteresigrafo

Per eseguire le prove in temperatura l'isteresigrafo è fornito di piastre riscaldate comandate direttamente dal pannello principale. La prassi prevede sempre l'alternanza di magnetizzazione e caratterizzazione ma alla quale bisogna aggiungere un tempo di circa 60 secondi, durante i quali si garantisce che il pezzo inserito nell'isteresigrafo abbia raggiunto l'equilibrio termico. Per verificare questa condizione è stata utilizzata una telecamera termica della FLIR in dotazione al laboratorio.

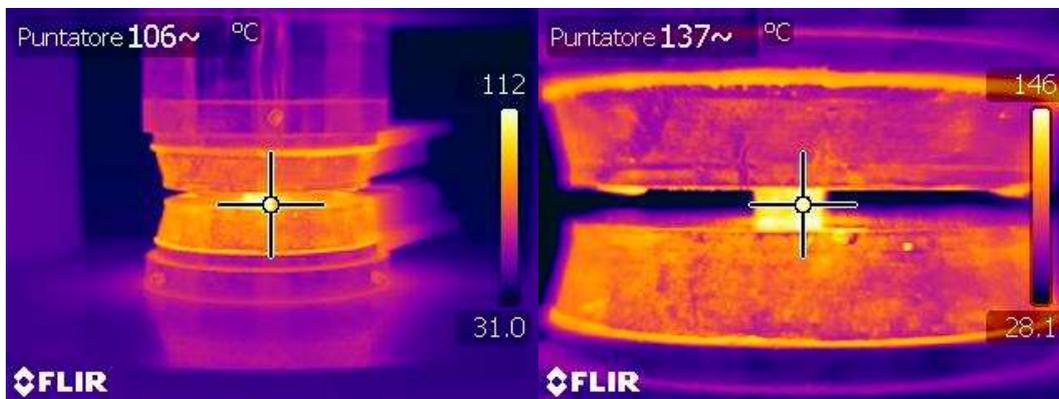


Fig 137 Termografie di un campione

Una volta caratterizzati tutti i campioni a tre temperature di esercizio (50°C, 100°C e 150°C) più chiaramente la temperatura di riferimento (20°C), ho proceduto ad elaborare le caratteristiche interpolate come descritto al capitolo VII, ottenendo quindi una curva B(H) per ogni materiale sul quale poi andare a valutare gli effetti della temperatura calcolando α e β .

Studio del coefficiente termico

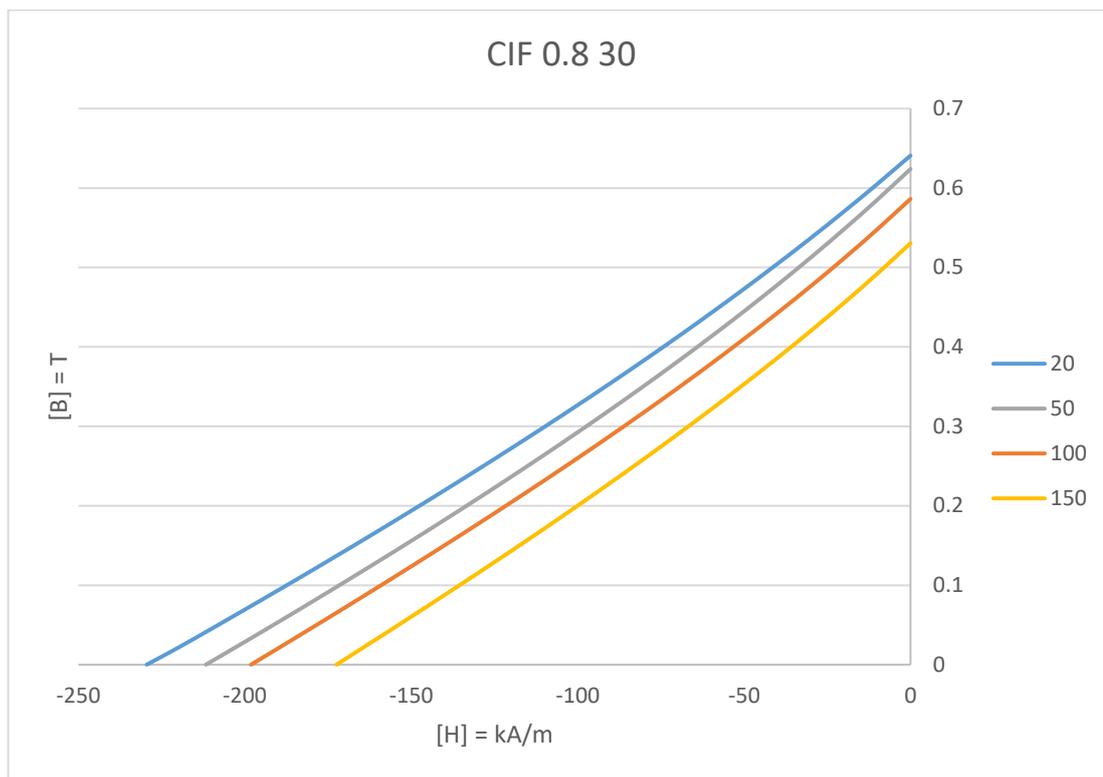


Fig 138 Curve $B(H)$ al variare della temperatura per CIF 0.8 30

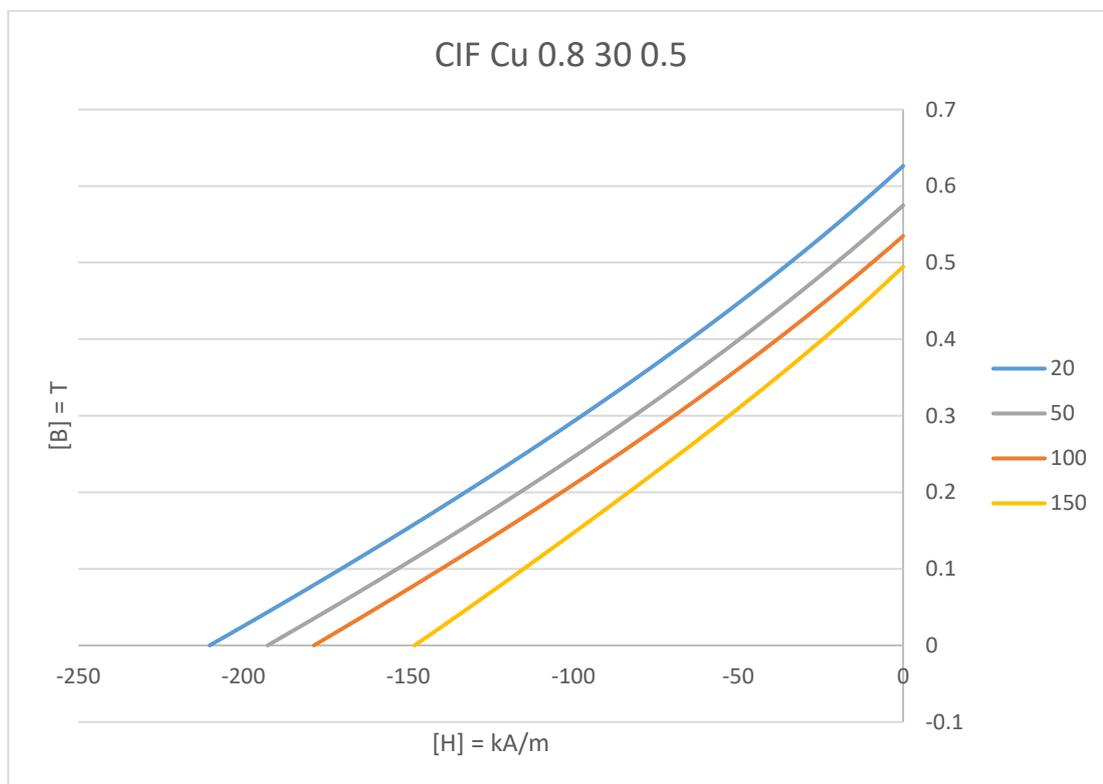


Fig 139 Curve $B(H)$ al variare della temperatura per CIF Cu 0.8 30 0.5

Studio del coefficiente termico

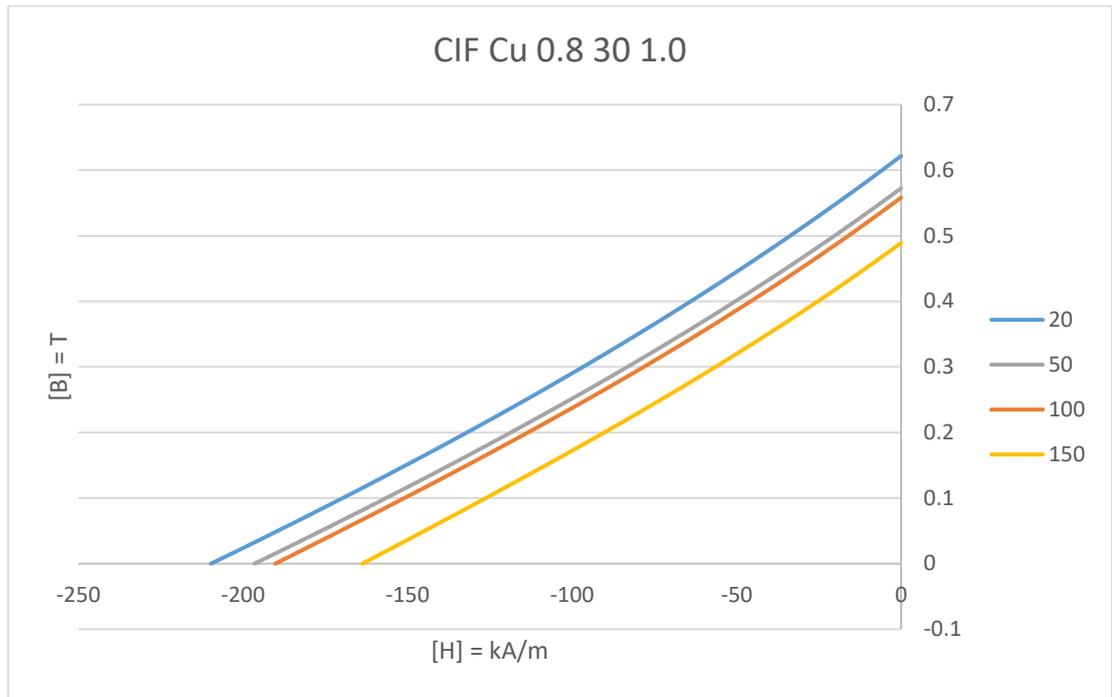


Fig 140 Curve $B(H)$ al variare della temperatura per CIF Cu 0.8 30 1.0

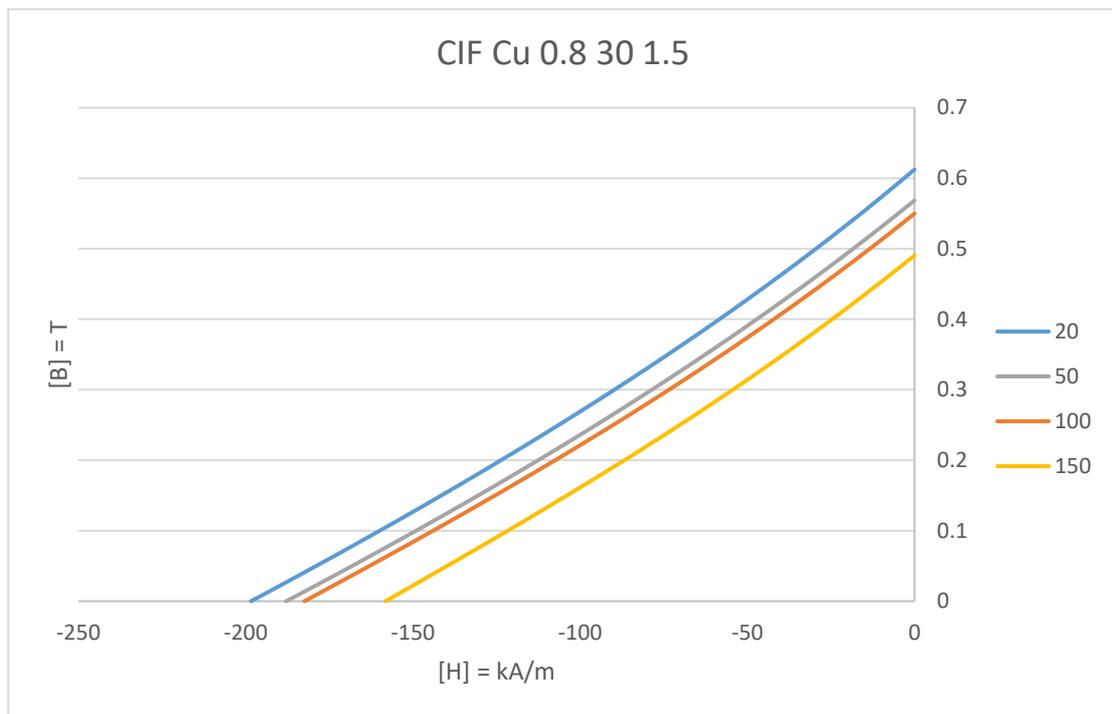


Fig 141 Curve $B(H)$ al variare della temperatura per CIF Cu 0.8 30 1.5

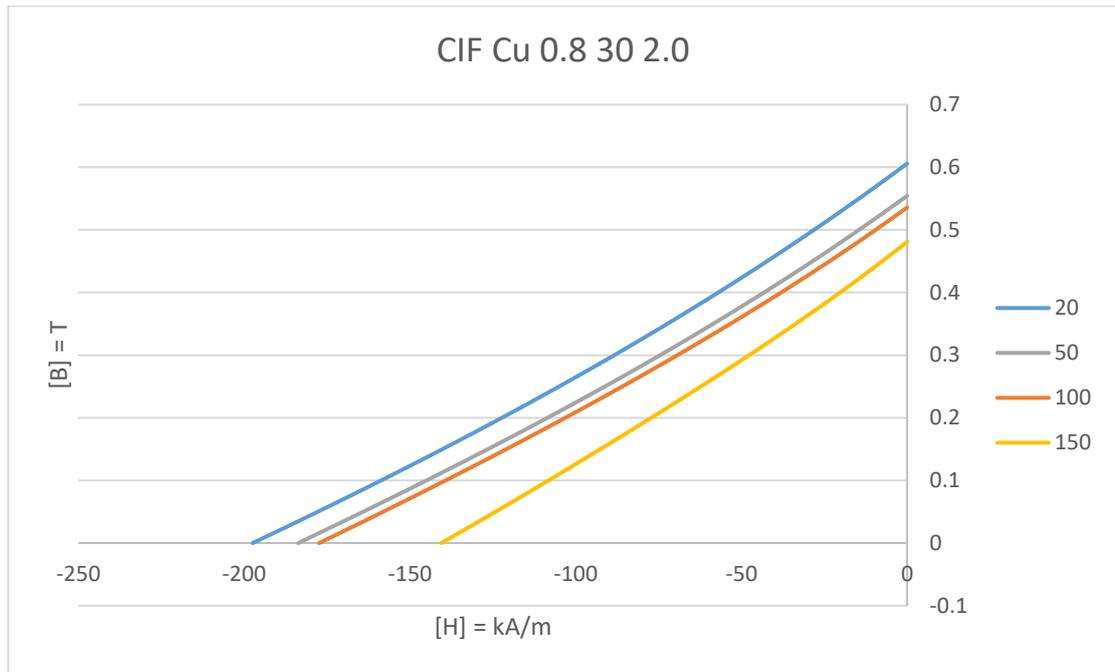


Fig 142 Curve B(H) al variare della temperatura per CIF Cu 0.8 30 2.0

5. Commenti e confronti

Per poter valutare gli effetti è necessario calcolare α e β , per ogni singola temperatura di esercizio, i coefficienti si ottengono dalle seguenti formule:

$$\alpha = \frac{(B_{r(\vartheta)} - B_{r(\vartheta_1)})}{B_{r(\vartheta_1)}} \cdot \frac{1}{\vartheta - \vartheta_1}$$

$$\beta = \frac{(H_{cb(\vartheta)} - H_{cb(\vartheta_1)})}{H_{cb(\vartheta_1)}} \cdot \frac{1}{\vartheta - \vartheta_1}$$

Tenendo sempre come ϑ_1 la temperatura ambiente, riporto due istogrammi riassuntivi per tutti i casi studiati:

Studio del coefficiente termico

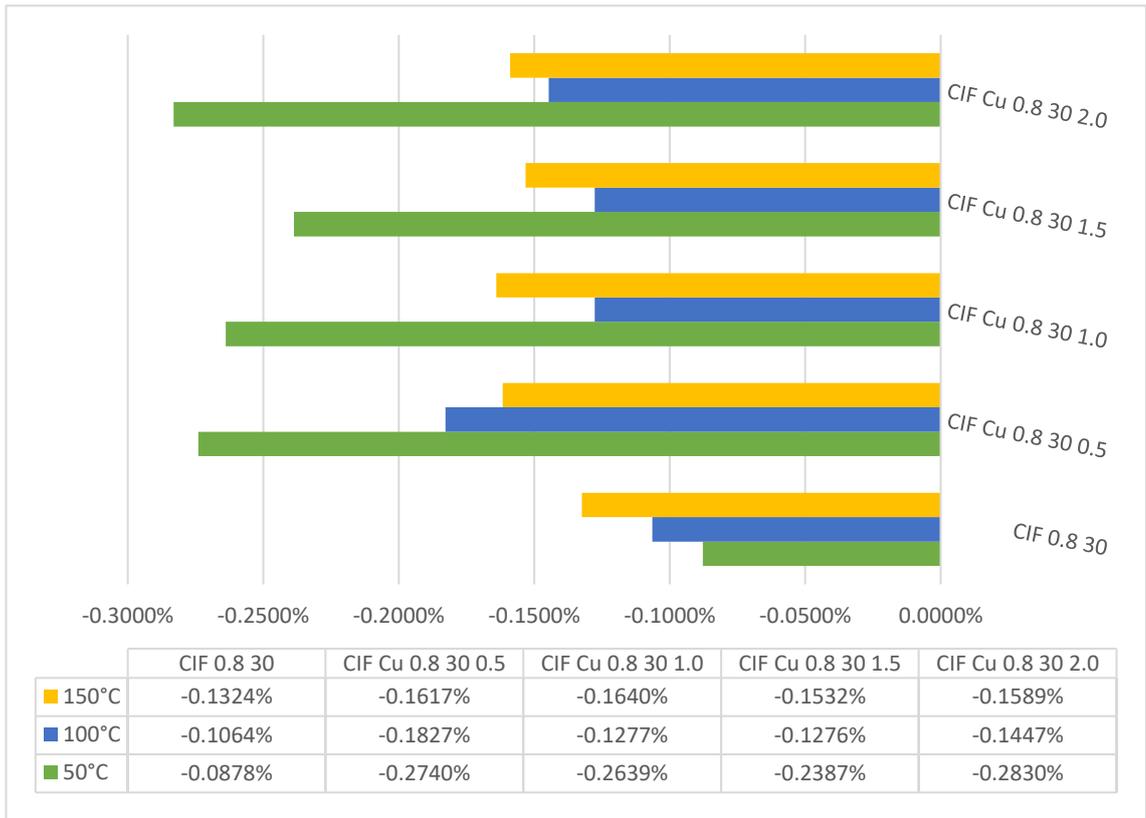


Fig 143 Valori calcolati di α

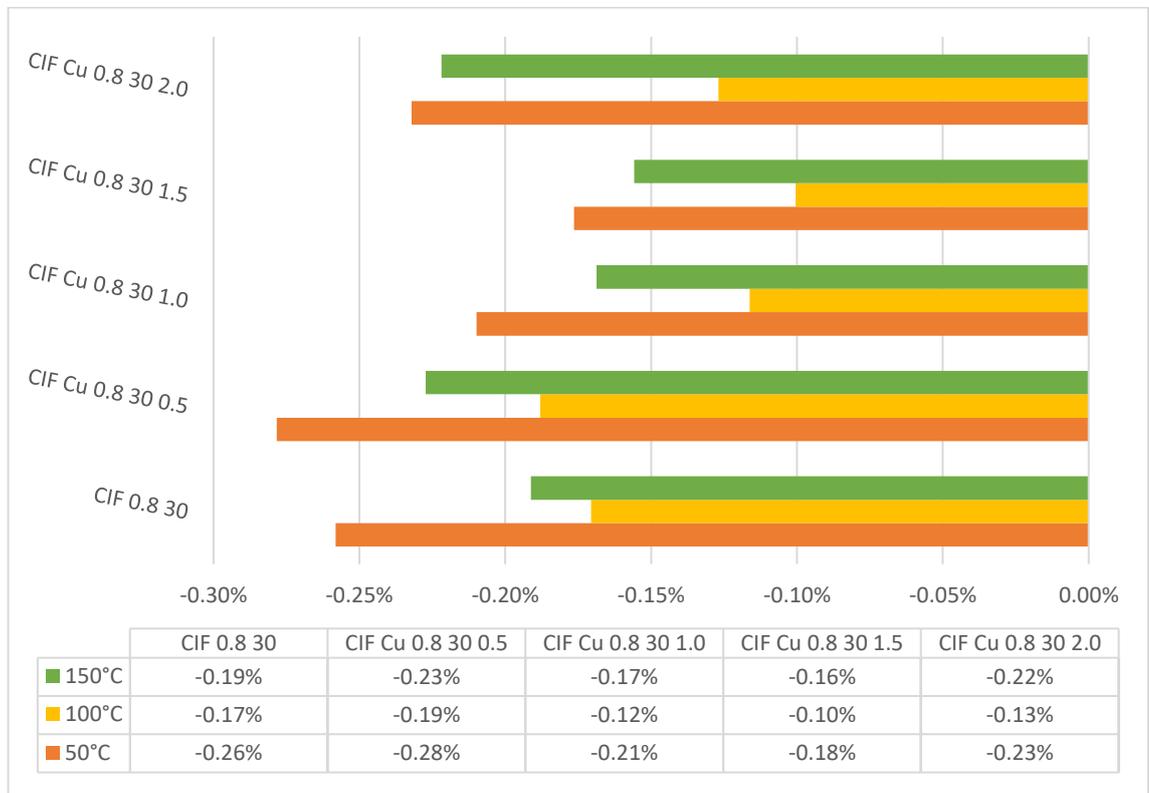


Fig 144 Valori calcolati di β

Studio del coefficiente termico

Come si evince dai grafici, per quanto riguarda β il materiale migliore risulta il CIF Cu 0.8 30 1.5, invece per α addirittura il materiale senza rame risulta il migliore. Se consideriamo come riferimento una serie di materiali commerciali:

Magnete	$[\alpha]= \%/^{\circ}\text{C}$	$[\beta]= \%/^{\circ}\text{C}$
AlNiCo	0.02÷0.03	0.02÷0.03
NdFeB	≈ 0.1	0.5÷0.6
SmCo	≈ 0.03	≈ 0.2

Possiamo notare come i risultati si inseriscano nei valori di riferimento, in cui comunque gli AlNiCo hanno sempre dominato con ampio margine. Rimane che, soprattutto per α , l'aggiunta di rame non abbia migliorato le prestazioni ma addirittura le abbia peggiorate.

Durante le prove, inoltre, sono sorti gravi problemi di coesione del materiale poiché, a causa delle sollecitazioni termiche alternate e ripetute nel tempo, in concomitanza con le continue magnetizzazioni, due campioni hanno subito danni irreversibili. Si sospetta che la resina fenolica in queste condizioni non sia assolutamente la più indicata e che serva una soluzione alternativa.

Concludendo, i plastomagnetri ibridi legati da resina fenolica non sono adatti per queste temperature e l'aggiunta di rame non comporta alcun effetto benefico.



Fig 145 Campione distrutto durante una prova

X. CONSIDERAZIONI FINALI

Il lavoro svolto ha confermato le tesi iniziali e la bontà del modello creato, i pickup ottenuti sono **conformi alle aspettative** e sono utilizzabili su uno strumento musicale. La chitarra utilizzata per le prove sicuramente non è la migliore possibile ma il suono generato dal trasduttore progettato è assolutamente paragonabile a quello di uno attualmente disponibile sul mercato. Inoltre, rimane aperta la possibilità di realizzare sensori a riluttanza variabile, per applicazioni specifiche utilizzando i materiali da me studiati.

1. Problematiche riscontrate

I risultati restituiti dal modello FEMM però non sono rappresentativi della realtà ma solo indicativi del comportamento dei materiali, purtroppo l'impossibilità di calcolare tutti i parametri concentrati associati al trasduttore ha introdotto degli errori di misura non trascurabili. Alcuni materiali meccanicamente non sono ottimi, il degrado che hanno subito, soprattutto alle alte temperature li rende inutilizzabili in applicazioni industriali. Tuttavia, l'aumento del contenuto di ferro migliora le prestazioni meccaniche. L'assenza inoltre di uno stampo creato appositamente per questa applicazione ha impedito di ottenere dei poli con tutte le caratteristiche necessarie e il lavoro di fresatura rimane oneroso in termini di tempo e costo materiale ma del resto sarebbe stato insensato l'investimento economico per realizzare uno stampo dedicato vista la natura sperimentale del lavoro. Del resto, l'esclusione totale della lavorazione meccanica dopo la pressatura potrebbe incidere sulle caratteristiche dei materiali. Il lavoro di miscelatura è un'attività lunga e propagatrice di una serie di errori percentuali non trascurabili, soprattutto quando vengono realizzate piccole quantità, quindi al fine di essere sicuri di aver miscelato le quantità corrette sarebbe necessario eseguire un numero enorme di campioni. Il mio lavoro rimane una base di partenza che ha evidenziato tanti spunti interessanti per poter andare a migliorare questa gamma di materiali, individuando alcuni punti sui quali agire per andare a cercare l'ottimo, che sicuramente esiste e non è stato ancora raggiunto. Non mi sono addentrato in stime di carattere commerciale, perché sarebbe stato difficile fare valutazioni comparate tra i costi di un plastomagnete ibrido così realizzato e un processo industriale. Se si dovesse mai valutare la commercializzazione di un oggetto del genere bisognerebbe rivedere tutta una serie di procedure che al momento sono, come è giusto che sia, allo stato di artigianato più puro.

2. Sviluppi futuri

Resina Epossidica

I **problemi di coesione** del materiale sono sicuramente risolvibili con l'utilizzo di altre resine leganti, nei lavori passati la resina epossidica ha dato risultati molto superiori. Questa opzione è stata scartata nel mio lavoro perché l'utilizzo della resina epossidica complica il lavoro di realizzazione dei campioni che qui è già stato lungo. Rimane aperta la possibilità di confrontare plastomagnetri ibridi realizzati con le due resine per valutare i benefici di questa opzione; un lavoro già imbastito nelle tesi che ho citato in partenza.

Considerazioni finali

Inoltre sono allo studio, nella sede di Alessandria, soluzioni alternative con nuovi leganti, con l'interessante variante di un legante con proprietà magnetiche.

Variazione più fine delle percentuali

Al fine di identificare il materiale ideale si può pensare di eseguire un **campionamento più fine** delle percentuali, soprattutto del ferro, ottenendo una platea più allargata di campioni che potrebbero anche rendere possibile la creazione del modello matematico che io non sono riuscito a sviluppare. Senza considerare l'introduzione di altre soluzioni che al momento sono in fase di studio, specialmente quella di eseguire la pressatura delle polveri in un ambiente in cui si fa variare il valore di induzione e quello della temperatura; due parametri fondamentali nella realizzazione industriale dei magneti AlNiCo.

Pressioni maggiori e valutazione meccanica

Come anticipato la pressione ideale per questi materiali è 700MPa, posso ipotizzare un futuro lavoro di confronto meccanico tra i materiali da me sviluppati e gli stessi realizzati a pressioni differenti, alla ricerca dell'ottimo meccanico. Del resto, la caratterizzazione meccanica di questi materiali esulava dal mio studio, che è già stato lungo e tempestato di difficoltà, come ogni lavoro di laboratorio che si rispetti.

Ringraziamenti

XI. RINGRAZIAMENTI

A mia madre, senza la quale niente di tutto questo sarebbe stato possibile.

A Fabrizio e Saverio, per aver reso le ore di studio e laboratorio l'unico ricordo piacevole del Politecnico.

Alla Nerdzone, per avermi spronato a non mollare mai.

Alla musica, per avermi accompagnato in ogni momento e viaggio con la giusta colonna sonora.

XII. BIBLIOGRAFIA

- [1] Z. a. Meyer, *Platonis Opera*, 1839, p. p. 989.
- [2] S. G. I. T. A. M. Naveed A. Zaidia, «Room temperature magnetic order in an organic magnet,» *Polymer*, 2004.
- [3] I. P. E. A. Vagati, *Lez. 06 Materiali magnetici permanenti e loro impiego motoristico*, Videolezioni Rai Nettuno, Azionamenti Elettrici 2.
- [4] S. Magnetfabrik, *Catalogo*.
- [5] «duramag.com,» Duramagnetics Inc., [Online]. Available: <https://www.duramag.com/alnico-magnets/available-alnico-magnet-grades/>.
- [6] D. Shabani, L. Ferraris e E. Poskovic, *Processi di magnetizzazione: studio e realizzazione di una bobina*, Torino: Politecnico di Torino, 2014.
- [7] M. Bensi, L. Ferraris, E. Poskovic e F. Franchini, *Magneti ibridi: generatori di flusso in trasduttori magnetici*, Politecnico di Torino, 2014.
- [8] P. de Lambertye, M. A. Grande e E. Poskovic, *Studies and developments of hybrid magnetic materials for particular transducer application*, Politecnico di Torino e Polytech Nantes.
- [9] P. D. D. Meeker, «Finite Element Method Magnetics,» [Online]. Available: femm.info/wiki/DavidMeeker.
- [10] D. M. Technologies. [Online]. Available: <https://www.dextermag.com/>.
- [11] D. Damiani, M. A. Grande, E. Poskovic, F. Franchini e L. Ferraris, «Studio e ottimizzazione di materiali magnetici soft per la realizzazione di dispositivi per applicazioni elettromagnetiche,» 2017.

Bibliografia

- [12] «CERN,» [Online]. Available: <https://home.cern/about/updates/2017/09/20-tesla-and-beyond-high-temperature-superconductors>.
- [13] E. P. F. F. L. F. Saverio Stefano Furio, «Realizzazione di un motore a flusso assiale adottando materiali magnetici innovativi,» 2017.
- [14] «Liceo Scientifico "Ulisse Dini",» [Online]. Available: <http://wunderkammer.liceodini.it/elettromagnetismo/campo-magnetico/generatori-di-campo-magnetico/bobine-di-helmholtz.html>.
- [15] «Yuxiang,» [Online]. Available: x-magnet.net.

XIII. INDICE DELLE IMMAGINI

Fig 1 Cella elementare SmCo_5	2
Fig 2 Cella elementare $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	2
Fig 3 Cella elementare $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	3
Fig 4 Statore in SMC per macchina a flusso assiale [14]	3
Fig 5 Caratteristiche $B(H)$ generali [3].....	4
Fig 6 Leghe AlNiCo	4
Fig 7 Ciclo di isteresi generico	5
Fig 8 Curve $J(H)$ e $B(H)$ nel secondo quadrante	6
Fig 9 Pickup piezoelettrico a pastiglia per chitarra classica.....	7
Fig 10 Brevetto di chitarra amplificata di Lloyd Loar, 1935.....	7
Fig 11 Brevetto di Horseshoe Pickup ad opera di G.D. Beauchamp, 1937.....	8
Fig 12 Principio di cancellazione del rumore in un pickup humbucker	8
Fig 13 Brevetto di pickup humbucker di A.F. Knoblough, 1935.....	9
Fig 14 VRS semplificato.....	9
Fig 15 Pickup Single Coil, assemblato ed esploso	10
Fig 16 Disposizione magneti (vista frontale)	10
Fig 17 Tipico circuito pickup-ono-volume.....	11
Fig 18 Attacco, decadimento, mantenimento e rilascio	11
Fig 19 Circuito elettrico equivalente al circuito magnetico.....	12
Fig 20 Punti di lavoro di due materiali con caratteristica $B(H)$ a pendenza diversa	15
Fig 21 Caratteristiche magnetiche di alcuni materiali simulati	16
Fig 22 Flusso di B su generica superficie S	17
Fig 23 Confronto tra un pickup reale (sx) e quello simulato (dx)	20
Fig 24 Disegno CAD del pickup	21
Fig 25 Modello FEMM	22
Fig 26 Simulazione FEMM, prima versione (a).....	22
Fig 27 Simulazione FEMM, seconda versione (b) con condizioni al contorno di Neumann.....	23
Fig 28 Dettaglio del fenomeno di rifrazione delle linee di campo	23

Indice delle immagini

Fig 29 Flusso concatenato per AlNiCo8 calcolato con o senza condizioni al contorno di Neumann	24
Fig 30 Forza elettromotrice calcolata per AlNiCo8 con o senza condizioni al contorno di Neumann.....	24
Fig 31 Distinzione tra le simulazioni.....	25
Fig 32 Dettaglio della simulazione FEMM con indicata la corda usata per le prove	26
Fig 33 Processo per il calcolo della Forza Elettromotrice.....	27
Fig 34 Andamento del flusso concatenato per il materiale CPF10 (simulazione b)	28
Fig 35 Andamento della Forza Elettromotrice per il materiale CPF10 (simulazione b).....	29
Fig 36 Istogramma di tutti i valori di flusso concatenato	30
Fig 37 Istogramma di tutti i valori di Forza Elettromotrice.....	31
Fig 38 Andamento della forza meccanica in funzione della distanza	32
Fig 39 Simulazione CIF 0.8 30 su FEMM	35
Fig 40 Prova CIF 0.8 30 su prototipo reale	35
Fig 41: Istogramma in PU della Forza Elettromotrice	36
Fig 42 Istogramma in PU della forza meccanica	36
Fig 43 Errore sul calcolo della forza meccanica tra simulazione b e c	37
Fig 44 Errore sul calcolo della forza elettromotrice tra simulazione b e c	38
Fig 45 Composizione delle miscele	39
Fig 46 Strumenti necessari per la miscelatura.....	41
Fig 47 Ambiente di lavoro per la pesatura e miscelatura.....	41
Fig 48 Dettaglio del contenitore di resina fenolica aperto.....	42
Fig 49 Polvere di ferro nel beaker.....	43
Fig 50 Fasi di aggiunta delle tre componenti del campione.....	43
Fig 51 Fase di miscelatura manuale	44
Fig 52 Contenitore di CIF 0.5 30.....	44
Fig 53 Turbula con dettaglio del posizionamento di un contenitore	45
Fig 54 Disegno di concetto dello stampo.....	46
Fig 55 Stampo montato sulla pressa con camera pronta	46
Fig 56 Dettaglio del punzone superiore in posizione	47
Fig 57 Dettaglio della camera nello stampo.....	47

Indice delle immagini

Fig 58 Camera riempita con la polvere, a fianco il dosatore.....	48
Fig 59 Pressa con il punzone calato nella camera	48
Fig 60 Campione estratto dalla camera	48
Fig 61 Campioni verdi, pronti per la cottura	49
Fig 62 : Curva per il trattamento termico.....	50
Fig 63 Campioni inseriti nel forno	50
Fig 64 Campioni dopo il trattamento termico	50
Fig 65 Densità dei campioni in funzione della percentuale di ferro con linea di tendenza	52
Fig 66 Inserimento dello Charpy nella morsa del troncatore	52
Fig 67 Operazione di taglio con il carter del troncatore chiuso.....	53
Fig 68 Sotto-campione tagliato a lunghezza 10mm.....	53
Fig 69 Principio costruttivo di un magnetizzatore	55
Fig 70 Costruzione della bobina di Helmholtz (sopra) e distribuzione di campo (sotto) [15]....	55
Fig 71 Corpo del magnetizzatore	56
Fig 72 Campione posto dentro la bobina	56
Fig 73 Bobina collegata al magnetizzatore	57
Fig 74 Corpo del magnetizzatore	57
Fig 75 Corpo e spira con il cavo di collegamento	58
Fig 76 Interno della bobina	58
Fig 77 Controllo remoto.....	59
Fig 78 Campione visti tramite la carta verde	59
Fig 79 Isteresigrafo	60
Fig 80 Misuratore con campione in posizione	60
Fig 81 Misuratore con polo sollevato e campione in posizione	61
Fig 82 Dettaglio del campione in posizione con intorno la bobina di misura	61
Fig 83 Pannello di controllo con misura di H (sopra) e J (sotto).....	61
Fig 84 Esempio di scheda campione sul terminale	62
Fig 85 Esempio di caratteristiche J(H) e B(H) in forma grafica.....	62
Fig 86 Interpolazione polinomiale dei punti (j,h)	63
Fig 87 Confronto tra la caratteristica interpolata (nera) e i campioni	64
Fig 88 Caratteristiche B(H) per i materiali con 30% di ferro	64

Indice delle immagini

Fig 89 Valori di induzione residua $[Br]=T$	65
Fig 90 Andamento di campo coercitivo $[Hcb]=kA/m$	65
Fig 91 Caratteristiche $B(H)$ dei materiali con 0.8% di resina	66
Fig 92 Confronto tra CIF 0.5 30 (sx) e CIF 0.8 30 (dx) dopo le prove	66
Fig 93 Valori di induzione residua $[Br]=T$	67
Fig 94 Andamento di campo coercitivo $[Hcb]=kA/m$	67
Fig 95 Ciclo di isteresi completo $B(H)$ per il campione CIF 0.5 30 II C	68
Fig 96 Ciclo di isteresi completo $B(H)$ del campione CIF 0.8 50 II A	69
Fig 97 Cicli di isteresi $B(H)$ e $J(H)$ come si presentano sul terminale dell'isteresigrafo	69
Fig 98 Andamento del flusso concatenato, depurato del valor medio	70
Fig 99 Andamento della forza elettromotrice	70
Fig 100 Istogramma riassuntivo in PU per la forza elettromotrice	71
Fig 101 Andamento della forza meccanica	71
Fig 102 Istogramma riassuntivo per le forze meccanica in PU	72
Fig 103 Induzione residua in funzione della percentuale di ferro	73
Fig 104 Induzione residua in funzione della percentuale di resina	73
Fig 105 Campo coercitivo in funzione della percentuale di ferro	73
Fig 106 Campo in coercitivo in funzione della percentuale di resina	74
Fig 107 Disegno della lavorazione	75
Fig 108 Fresatura di uno Charpy	75
Fig 109 Profilo di fresatura sul controllo CNC	76
Fig 110 Fresatura in ripresa su mandrino	76
Fig 111 Pickup di prova con tre poli assemblati e i rimanenti Charpy da lavorare	77
Fig 112 Supporto magneti	77
Fig 113 Pickup assemblato sulla chitarra di prova	77
Fig 114 Prove in camera anecoica	78
Fig 115 Carta verde applicata al pickup	78
Fig 116 Impianto di prova	79
Fig 117 Schema del circuito di prova	79
Fig 118 Dispositivo di prova con plettro	80
Fig 119 EBow	80

Indice delle immagini

Fig 120 Render del supporto per EBow.....	81
Fig 121 Supporto in posizione	81
Fig 122 Pannello di controllo su LabVIEW.....	82
Fig 123 Andamento di Urms per CIF 0.8 40 in funzione del tempo.....	82
Fig 124 Andamento dei tre involuipi delle oscillazioni libere.....	83
Fig 125 Forma d'onda per un ciclo (CIF 0.8 30)	84
Fig 126 Oscillazione libera della corda (CIF 0.8 30).....	84
Fig 127 Forma d'onda (CIF 0.8 40).....	85
Fig 128 Oscillazione libera della corda (CIF 0.8 40).....	85
Fig 129 Forma d'onda (CIF 0.8 70).....	86
Fig 130 Oscillazione libera della corda (CIF 0.8 70).....	86
Fig 131 PSD tra 20Hz e 20kHz.....	87
Fig 132 PSD tra 20Hz e 1500Hz.....	87
Fig 133 Caratteristiche B(H) e J(H) di un Sm2Co17 in funzione della temperatura [13]	88
Fig 134 Composizione miscele con rame studiate	89
Fig 135 Polvere di rame usata	89
Fig 136 Controllo riscaldamento poli su isteresigrafo	90
Fig 137 Termografie di un campione	90
Fig 138 Curve B(H) al variare della temperatura per CIF 0.8 30	91
Fig 139 Curve B(H) al variare della temperatura per CIF Cu 0.8 30 0.5	91
Fig 140 Curve B(H) al variare della temperatura per CIF Cu 0.8 30 1.0	92
Fig 141 Curve B(H) al variare della temperatura per CIF Cu 0.8 30 1.5	92
Fig 142 Curve B(H) al variare della temperatura per CIF Cu 0.8 30 2.0	93
Fig 143 Valori calcolati di α	94
Fig 144 Valori calcolati di β	94
Fig 145 Campione distrutto durante una prova	95

XIV. GLOSSARIO

ABC (Absorbing Boundary Condition): condizioni al contorno di FEMM che prevedono uno strumento analitico per risolvere le equazioni di Maxwell al di fuori del campo di simulazione.

IABCs (Improvised Asynthotical Boundary Conditions): condizioni al contorno di FEMM ottimizzate ed introdotte il 23 agosto 2013. Permettono una soluzione più precisa e in tempi più brevi delle ABC.

Carta verde: strumento utilizzato per visualizzare i campi magnetici, composto da una sottile lamina di materiale plastico, coperta con particelle di Nickel sospese in olio, le particelle si dispongono lungo le linee di campo magnetico.

DPI (Dispositivi di Protezione Individuale): prodotti che hanno la funzione di salvaguardare la persona che l'indossi o comunque li porti con sé, da rischi per la salute e la sicurezza, sia in ambito domestico, sia in ambito sportivo, sia in ambito ricreativo e, ovviamente, in campo lavorativo. (cfr. D.Lgs. 475/92)

FLIR: leader mondiale nella produzione di termocamere. L'acronimo sta per Forward Lookin Infra Red.

FFT (fast fourier transformation): algoritmo per la scomposizione in serie di Fourier di forme d'onda anche complesse, solitamente implementato in strumenti di calcolo.

Jack TS (Tip Sleeve): connettore standard nel settore audio, utilizzato in cavi solitamente coassiali che richiedono due connessioni: la punta (Tip), opportunamente sagomata per fungere anche da vincolo meccanico, è collegata al conduttore centrale mentre il codolo posteriore (Sleeve) è connesso alla maglia esterna, la quale funge da schermo.

LabVIEW: pacchetto software della National Instruments specializzato nell'elaborazione di dati e per l'implementazione di logiche di controllo anche complesse.

PSD (Power Spectral Density): successiva alla scomposizione di Fourier, restituisce il valore di potenza associato alle armoniche di un segnale scomposto.

Resina Epossidica: polimeri termoindurenti con reazione a freddo. Solitamente ottenuti dalla miscelazione tra una resina base e il suo indurente.

Resine Fenoliche: famiglia di polimeri ottenuti per reazione tra fenolo e formaldeide.

Rhinoceros: programma di disegno tridimensionale sviluppato da Robert McNeel & Associates.

Scalatura: dimensionamento delle corde per uno strumento.

XV. APPENDICI

1. Appendice A: Programmazione LUA

Programma per il calcolo del flusso concatenato

```
--Inizializzazione del programma
--open file
showconsole();
mydir="."
open(mydir .. "Prova_pickup_10anelli_Neumann_A.fem")
mi_saveas(mydir .. "temp_A.fem")
data={};
--Spostamento iniziale della corda
--select string and move to -1.5
    mi_seteditmode("group")
    mi_selectgroup(1);
    mi_movetranslate(-1.5,0);

--Movimento sinusoidale della croda in16 passi
--move string
    for k=0,16,1 do
        a=2*sin((k-8)/16*PI);
        b=((k-8)/16*180);
        print(b);
        print(a);
        mi_seteditmode("group")
        mi_selectgroup(1);
        mi_movetranslate(a,0)
        mi_analyze(1);
        mi_loadsolution();
        mo_zoom(-20,-20,10,-10)
        mo_refreshview()
        data[k]={};
--Calcolo del flusso concatenato
-- compute flux linkage
    v1,v2,data[k][1] = mo_getcircuitproperties("Coil");
    mi_seteditmode("group")
    mi_selectgroup(1);
    mi_movetranslate(-a,0)
    end
--Esportazione dei dati calcolati
-- write results to disk for further analysis.
    fp=openfile(mydir .. "flux-results_A.txt","w")
    for j = 0,16 do
        write(fp,data[j][1]," \n")
    end
--Chiusura del programma
closefile(fp);
mi_close();
mo_close();
```

Programma per il calcolo della forza esercitata sulla corda

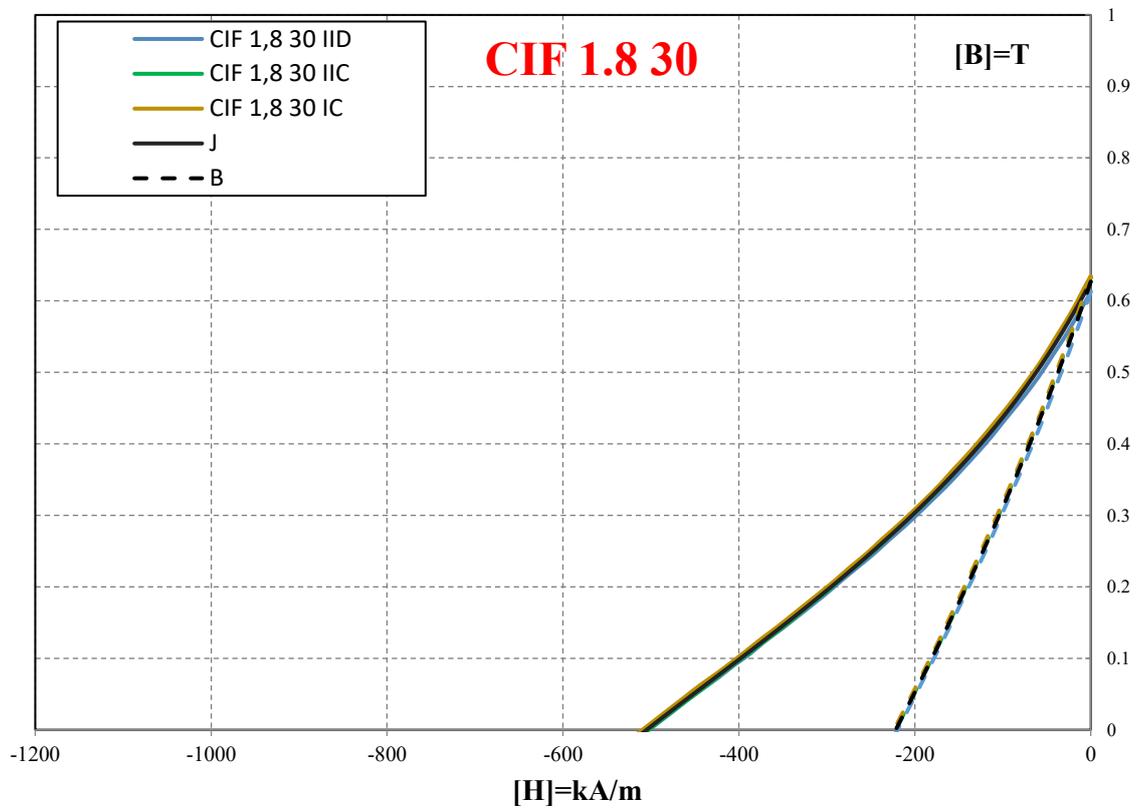
```
--Inizializzazione del programma
--open file
showconsole()
mydir="."
open(mydir .. "Prova_pickup_10anelli_Neumann_A.fem")
mi_saveas(mydir .. "temp_A.fem")
data={}
```

Appendici

```
--Movimento della corda
--select string and move to -1.5
    mi_seteditmode("group")
    mi_selectgroup(1);
    mi_movetranslate(-1.5,0);
--Movimento lineare della corda in 16 passi
--cicle for moving the string
    for k=0,16,1 do
        showconsole();
        clearconsole();
        print(k);
        mi_seteditmode("group")
        mi_selectgroup(1)
        mi_analyze(1)
        mi_loadsolution()
        mo_groupselectblock(1)
        data[k]={};
        data[k][1]=mo_blockintegral(19)
--Esportazione dei dati
--write results to disk for further analysis.
        fp=openfile(mydir .. "force-results_A.txt","w")
        for j = 1,(k) do
            write(fp,data[j][1]," \n")
            mi_movetranslate(0.2,0)
--Chiusura del programma
        end
    end
end
closefile(fp)
mo_close()
mi_close()
```

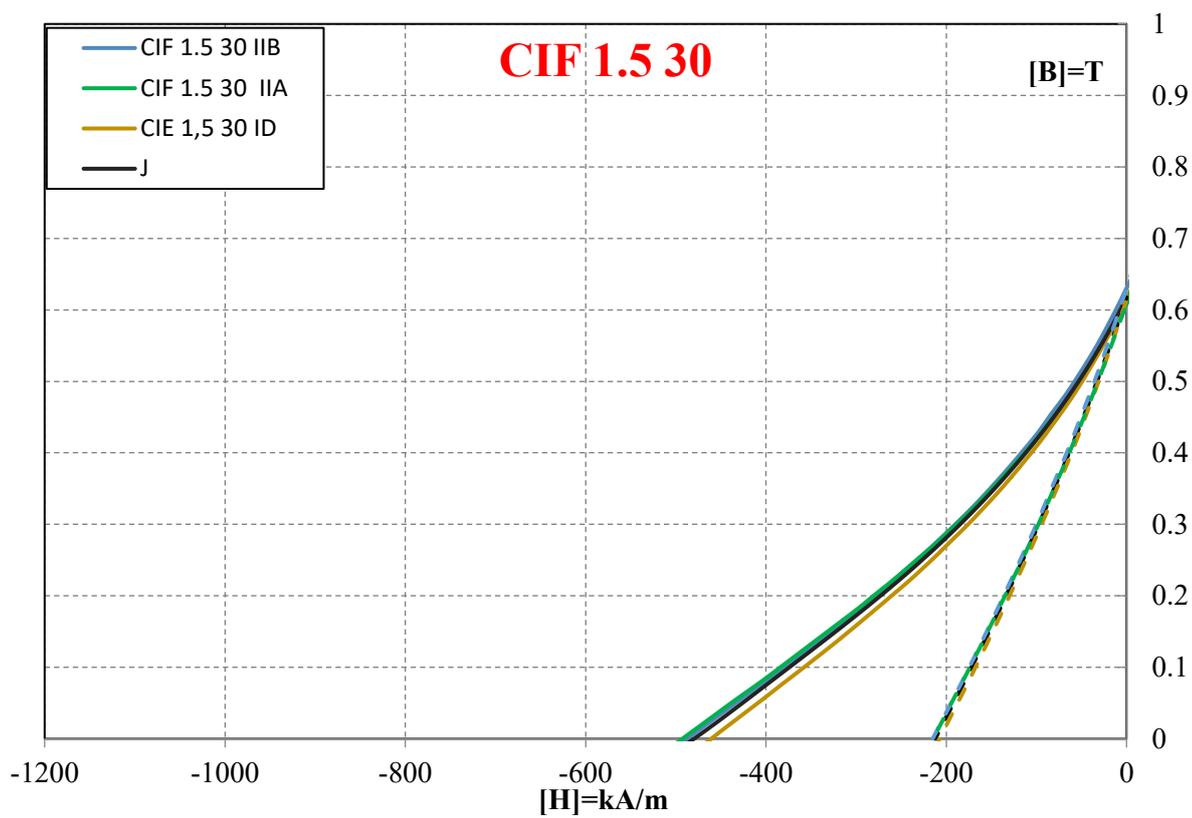
2. Appendice B: Caratterizzazione materiali magnetici

CIF 1.8 30



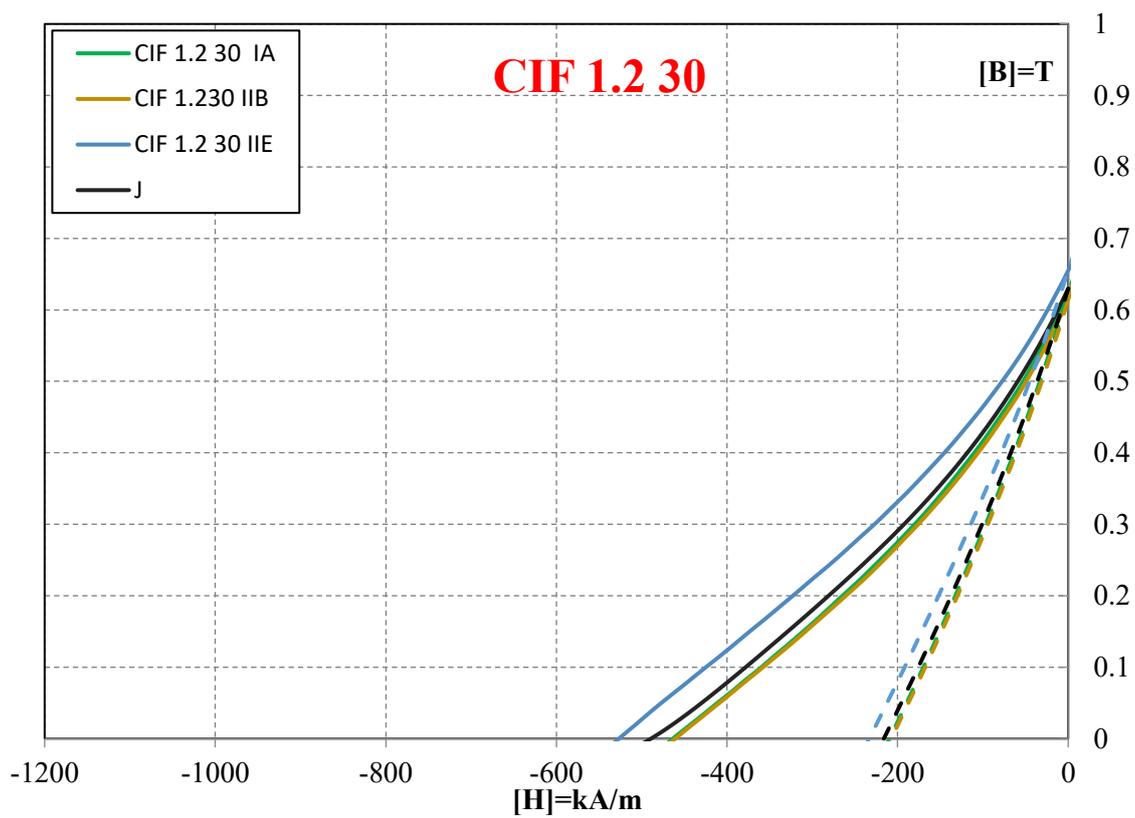
Parametri magnetici		
H_{cj}	-486.3	kA/m
H_{cb}	-221.7	kA/m
B_r	0.627	T

CIF 1.5 30



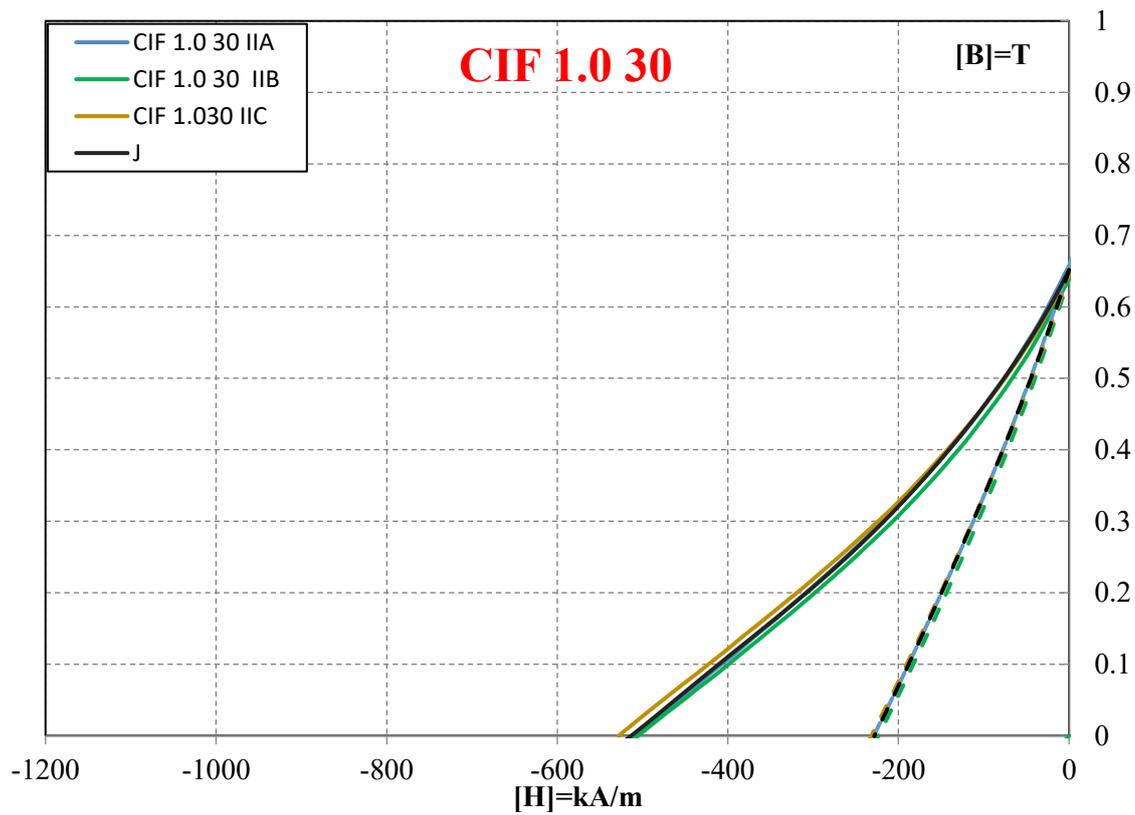
Parametri magnetici		
H_{cj}	-479.8	kA/m
H_{cb}	-212.3	kA/m
B_r	0.617	T

CIF 1.2 30



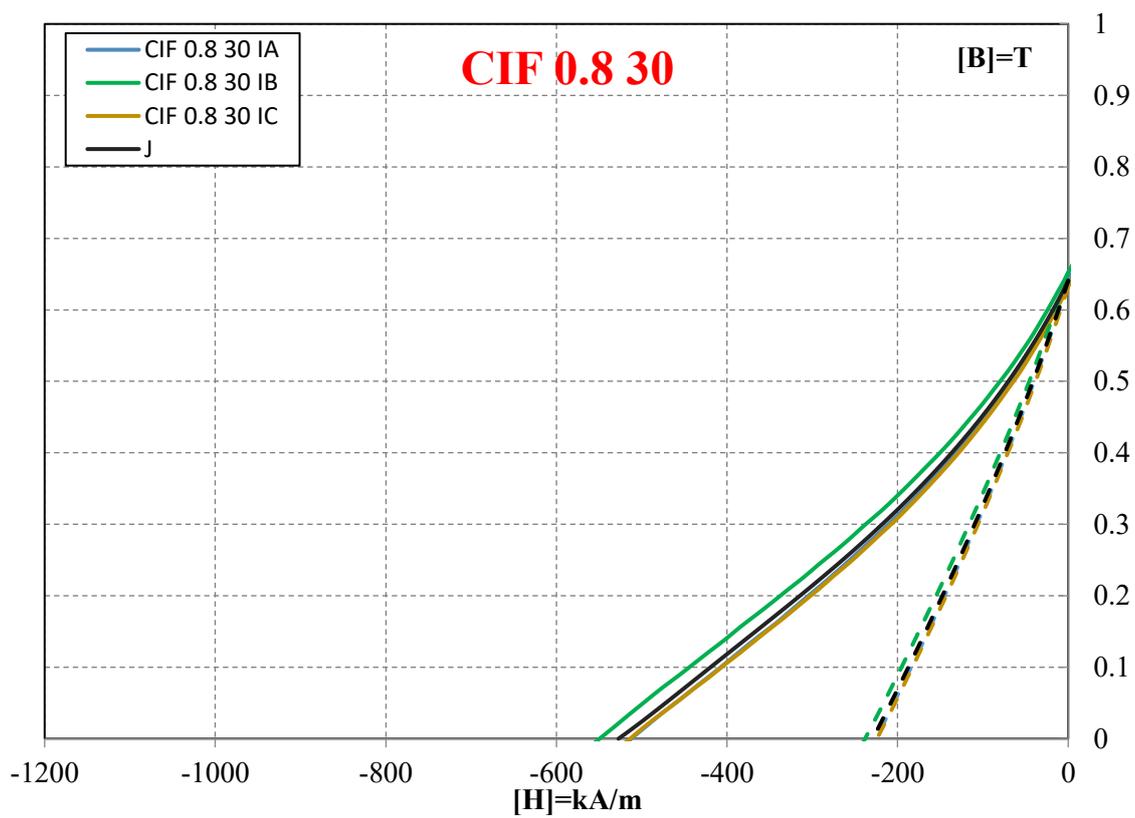
Parametri magnetici		
H_{cj}	-489.4	kA/m
H_{cb}	-216.2	kA/m
B_r	0.630	T

CIF 1.0 30



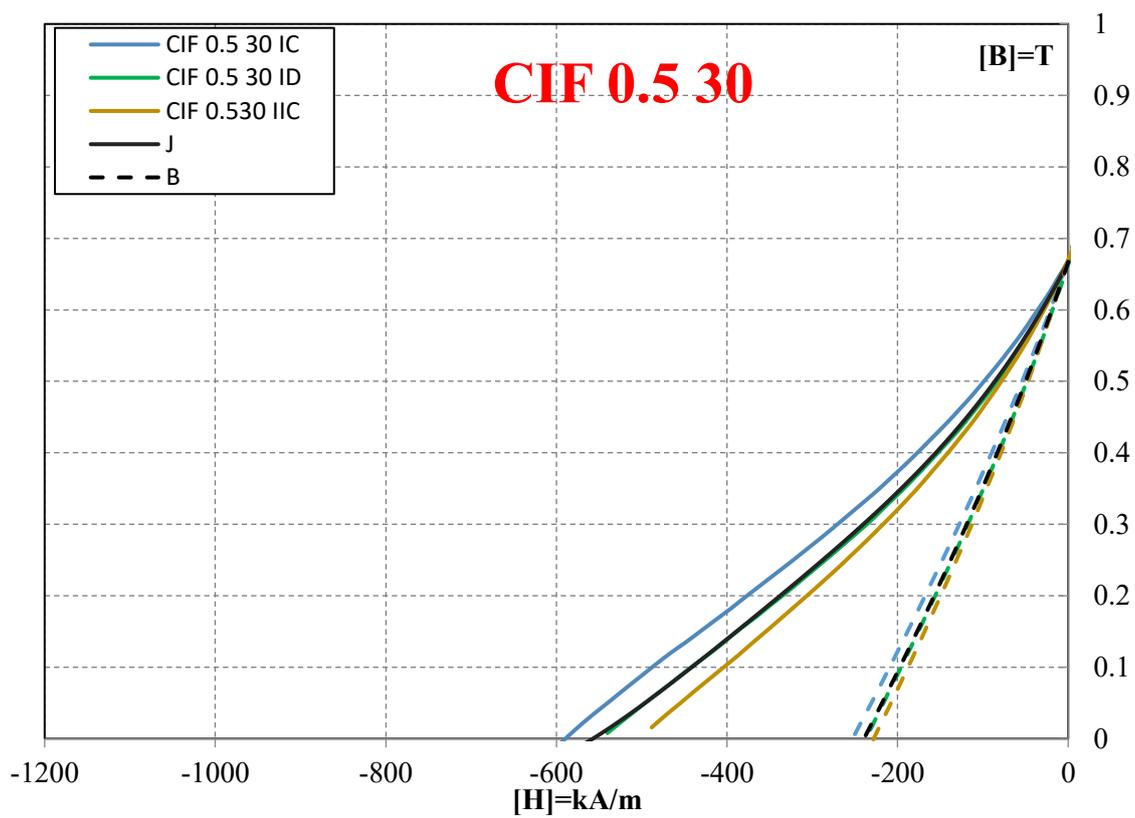
Parametri magnetici		
H_{cj}	-513.3	kA/m
H_{cb}	-228.5	kA/m
B_r	0.652	T

CIF 0.8 30



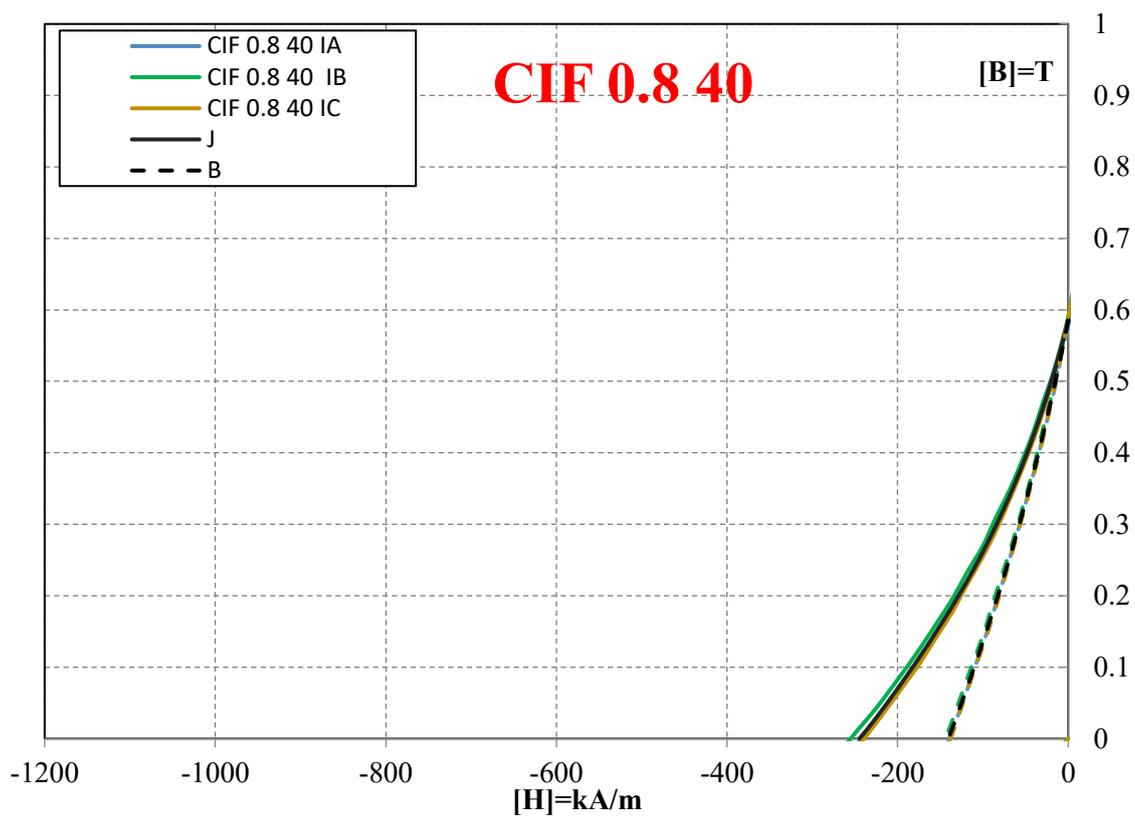
Parametri magnetici		
H_{cj}	-527.3	kA/m
H_{cb}	-229.5	kA/m
B_r	0.641	T

CIF 0.5 30



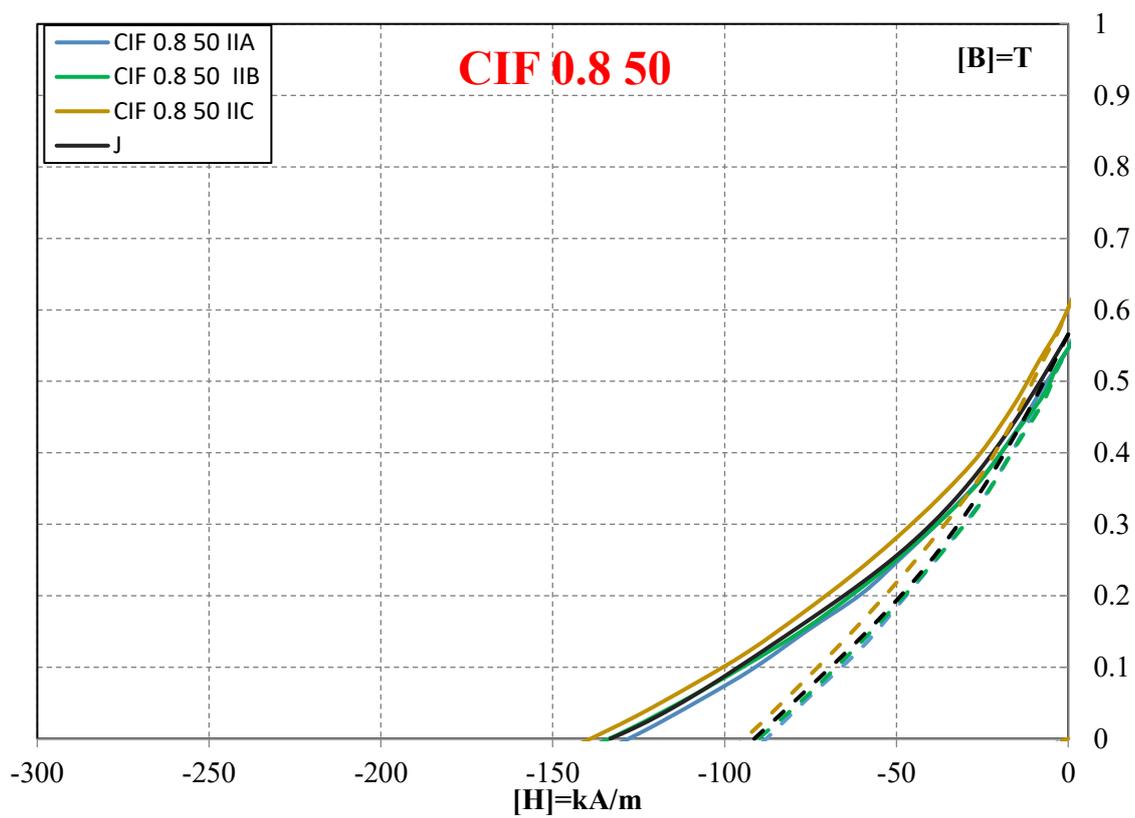
Parametri magnetici		
H_{cj}	-557.4	kA/m
H_{cb}	-239.4	kA/m
B_r	0.667	T

CIF 0.8 40



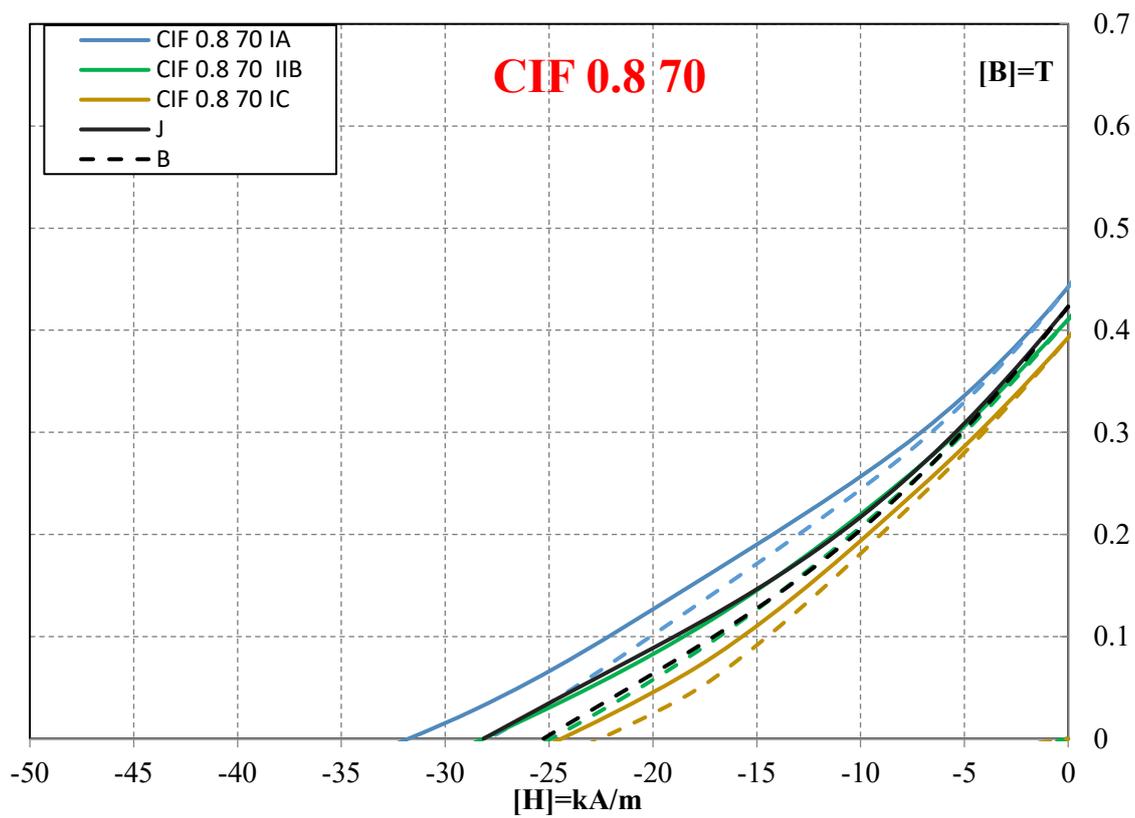
Parametri magnetici		
H_{cj}	-244.8	kA/m
H_{cb}	-140.45	kA/m
B_r	0.585	T

CIF 0.8 50



Parametri magnetici		
H_{cj}	-133.2	kA/m
H_{cb}	-91.345	kA/m
B_r	0.566	T

CIF 0.8 70



Parametri magnetici		
H_{cj}	-28.15	kA/m
H_{cb}	-25.27	kA/m
B_r	0.423	T