

POLITECNICO DI TORINO

Elettromagnetismo Applicato



Tesina

Applicazioni Pratiche di Campi Magnetici Stazionari

Gruppo 2

Componenti

Alex Aiello 336698
Eduardo Cipolletta 346566
Andrea Campanella 286921

Anno Accademico 2024-2025

Indice

1 Esercizio 1: Elettromagnete a Bicchiere	2
1.1 Dati:	2
1.2 Modello FEMM	3
1.3 Analisi FEMM	6
1.3.1 Mappa Cromatica	6
1.3.2 Induzione al traferro &Forza agente su ancoretta	7
1.4 Modello CST	10
1.5 Analisi CST	11
1.5.1 Mappa Cromatica	11
1.5.2 Ottimizzazione dello sfruttamento di un elettromagnete con il metodo delle riluttanze	11
1.5.3 Calcolo e comparazione dei flussi magnetici	13
1.5.4 Induzione al traferro	15
1.6 Confronto FEMM-CST	16
2 Esercizio 2: Macchina per magnetoscopia	18
2.1 Dati:	18
2.2 Modello equivalente a riluttanze	19
2.3 Modello CST	21
2.3.1 Prova 1: NI=12000 Asp, a=9.06cm	22
2.3.2 Prova 2: NI =10000 Asp, a=10.95cm	23
2.4 Modello FEMM	24
2.4.1 Analisi FEMM	25
2.5 Caso con materiale acciaio 410 non lineare	28
2.5.1 Prova 1: NI = 10000 Asp,a = 10.95cm	29
2.5.2 Prova 2: NI=5500Asp, a=9cm	30
3 Esercizio 3: Elettromagnete a Spina	32
3.1 Dati:	32
3.2 Modello CST con materiale lineare	32
3.2.1 Analisi CST	33
3.3 Modello CST con materiale non lineare	34
3.3.1 Analisi CST	35

Capitolo 1

Esercizio 1: Elettromagnete a Bicchiere

1.1 Dati:

- Raggio Esterno: $R_e = 12.5mm$
- Altezza Base: $h_b = 4mm$
- Altezza Bobina: $h_{bob} = 15mm$
- Altezza Ancora: $h_{anc} = 4mm$
- Altezza Magnete: $h_m = (h_b + h_{bob}) + 1 = 20mm$
- Altezza Traferro: $h_t = 1mm$
- Raggio Interno: $R_i = 4.9mm$
- Larghezza Bobina: $w_{bob} = 5.9mm$

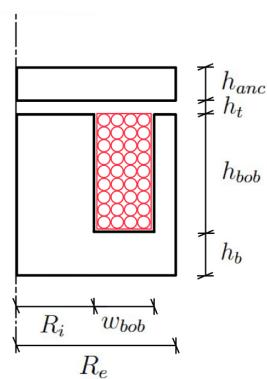


Figura 1.1: Modello geometrico

1.2 Modello FEMM

In seguito è riportato il modello in esame.

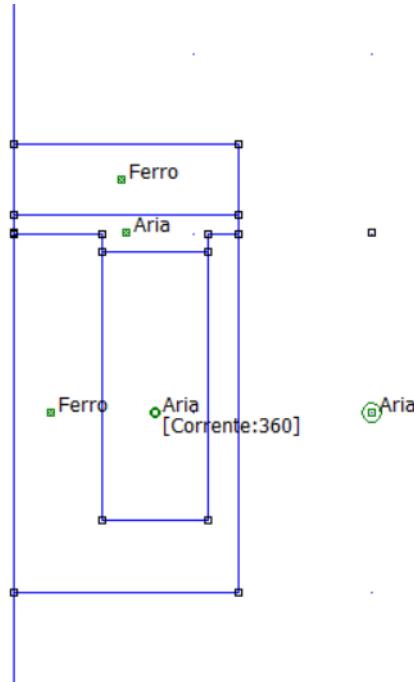


Figura 1.2: Modello Elettromagnete a Bicchiere

Si è assegnato il materiale "Air" sia nel traferro che nei conduttori, dove in questi ultimi si sono definite le correnti pari a 0.34A e 357 spire.

Formula Numero di spire

Per calcolare il numero di spire, abbiamo utilizzato la relazione tra la resistenza R , la resistività del materiale ρ , la lunghezza totale del filo L e la sezione del filo A :

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

da cui possiamo ricavare la lunghezza totale del filo:

$$L = \frac{R \cdot A}{\rho}$$

Sapendo che il raggio del filo è $r = 0.05$ mm, la sezione A è data da:

$$A = \pi r^2 = \pi (0.05 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}^2$$

La resistività del materiale, essendo l'inverso della conducibilità $\sigma = 56$ MS/m, è:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{56 \cdot 10^6} \Omega \cdot \text{m}$$

Con $R = 40\Omega$, otteniamo la lunghezza totale del filo L . Successivamente, calcoliamo la lunghezza media di una spira come la circonferenza di un cerchio con raggio medio $r_{\text{medio}} = 7.85 \text{ mm}$:

$$\text{Lunghezza media spira} = 2\pi r_{\text{medio}} = 2\pi(7.85 \cdot 10^{-3}) \text{ m}$$

Infine, il numero di spire N è dato dal rapporto tra la lunghezza totale L e la lunghezza media della singola spira:

$$N = \frac{L}{\text{Lunghezza media spira}}$$

Sostituendo i valori, otteniamo che il numero di spire è approssimativamente $N \approx 357$.

Mesh

Per il circuito magnetico si è utilizzato un ferro ideale con $\mu = 1000$ e lineare.

Le grandezze di mesh assegnate sono:

- Mesh aria esterna: 1
- Mesh aria traferro: 0.05
- Mesh aria bobina: 0.5
- Mesh ferro: 0.1

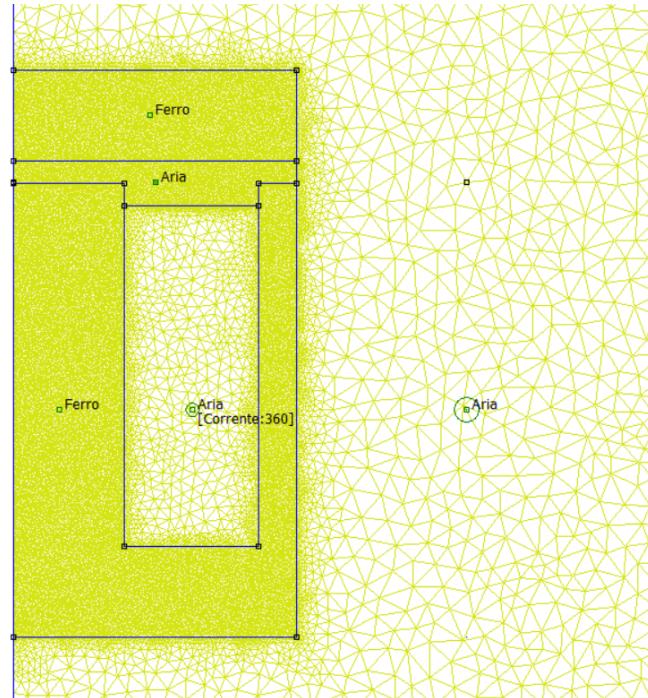


Figura 1.3: Mesh totale

Per le condizioni al contorno in questo contesto, utilizziamo una condizione "mista" o "mixed boundary condition", che introduce un coefficiente c_0 per simulare un dominio infinito mantenendo comunque un dominio finito (graficamente). La condizione prevede:

$$c_0 = \frac{n}{\mu_0 \cdot r_0}$$

dove:

- n rappresenta il numero di armoniche considerate; in questo caso specifico, assumiamo solo la prima armonica, quindi $n = 1$.
- μ_0 è la permeabilità magnetica nel vuoto.
- r_0 è il raggio del dominio.

Impostando questa condizione, si crea un effetto di "assorbimento" dei campi al bordo del dominio finito che imita un dominio infinito, evitando i riflessi e le distorsioni che si verificherebbero con contorni riflettenti. Questo approccio consente di ridurre la complessità computazionale simulando comunque con buona approssimazione un sistema non delimitato.

1.3 Analisi FEMM

1.3.1 Mappa Cromatica

In seguito è presente la mappa cromatica del modello in questione, in particolare con un traferro di 1 mm.

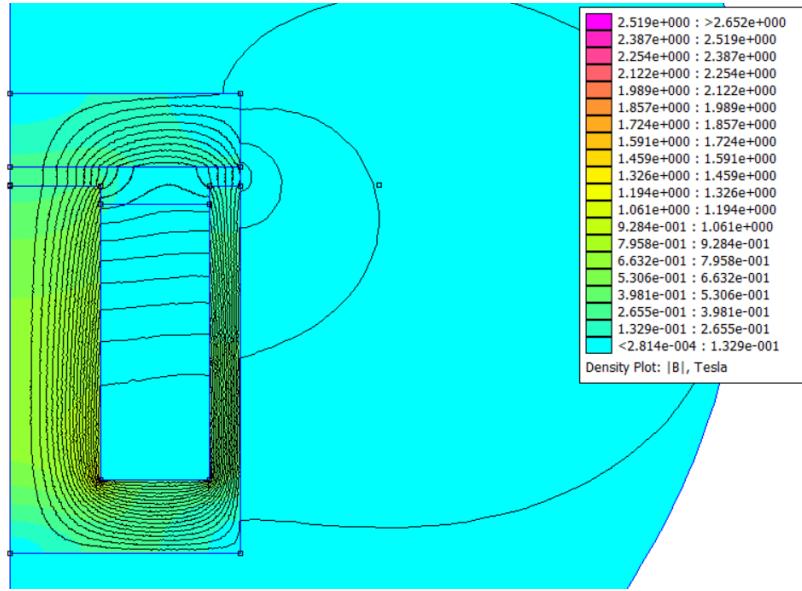
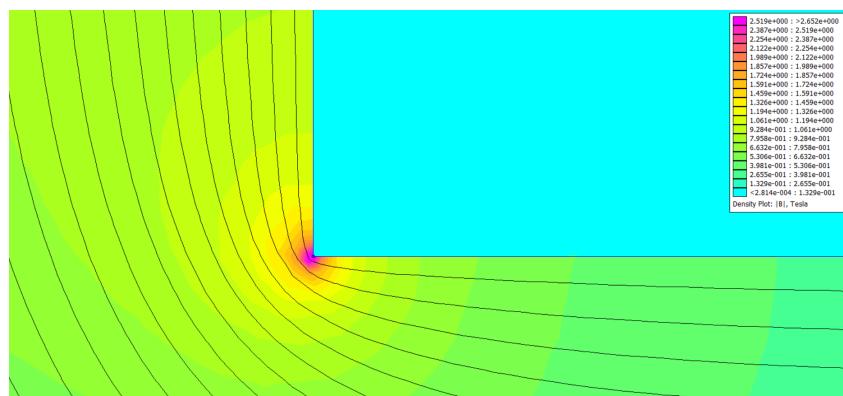


Figura 1.4: Mappa Cromatica Elettromagente a Bicchiere FEMM

Si può notare ingrandendo verso lo spigolo inferiore come le linee di induzione tendano a seguire la strada più facile all'interno del tubo di flusso, saturando in particolar modo gli spigoli interni, in particolare quelli inferiori essendo in alto presente l'aria che è difficilmente saturabile.



1.3.2 Induzione al traferro & Forza agente su ancoretta

Per calcolare l'induzione al traferro e la forza sull'ancoretta si è utilizzato un codice MATLAB che permette di confrontare i risultati ottenuti da FEMM con il calcolo analitico durante uno sweep di posizione dell'ancora, aumentando il traferro da 0,1mm a 1mm

Calcolo dell'induzione magnetica B nel traferro

Per il traferro interno:

$$B_{\text{int}} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$

Per il traferro esterno:

$$B_{\text{est}} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$

Dove B_x e B_y sono le componenti del campo magnetico calcolate nei rispettivi punti.

Calcolo della forza magnetica

La forza magnetica nel traferro interno è calcolata come:

$$F_{\text{int}} = \frac{1}{2} \frac{B_{\text{int}}^2 S_{\text{int}}}{\mu_0}$$

La forza magnetica nel traferro esterno è calcolata come:

$$F_{\text{est}} = \frac{1}{2} \frac{B_{\text{est}}^2 S_{\text{est}}}{\mu_0}$$

La forza totale risultante è quindi:

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{int}} + F_{\text{est}}$$

Calcolo del flusso magnetico Φ

Il flusso magnetico totale attraverso il circuito è:

$$\Phi = \frac{N \cdot I}{\mathcal{R}_{\text{tot}}}$$

Dove:

- N è il numero di spire della bobina.
- I è la corrente elettrica.
- \mathcal{R}_{tot} è la riluttanza totale del circuito magnetico.

Calcolo della riluttanza totale

La riluttanza totale è data dalla somma delle riluttanze dei vari tratti del circuito magnetico:

$$\mathcal{R}_{\text{tot}} = \mathcal{R}_{\text{fe_est}} + \mathcal{R}_{\text{fe_int}} + \mathcal{R}_{\text{tr_int}} + \mathcal{R}_{\text{tr_est}} + \mathcal{R}_{\text{anc}} + \mathcal{R}_{\text{base}}$$

Le riluttanze dei traferro interno ed esterno sono calcolate come:

$$\mathcal{R}_{\text{tr_int}} = \frac{l_{\text{int}}}{\mu_0 S_{\text{int}}}$$

$$\mathcal{R}_{\text{tr_est}} = \frac{l_{\text{est}}}{\mu_0 S_{\text{est}}}$$

Dove:

- l_{int} e l_{est} sono le lunghezze dei traferro interno ed esterno.
- S_{int} e S_{est} sono le aree dei traferro interno ed esterno.
- μ_0 è la permeabilità del vuoto.

Induzione magnetica analitica nei traferro

Per il traferro interno:

$$B_{\text{int, an}} = \frac{\Phi}{S_{\text{int}}}$$

Per il traferro esterno:

$$B_{\text{est, an}} = \frac{\Phi}{S_{\text{est}}}$$

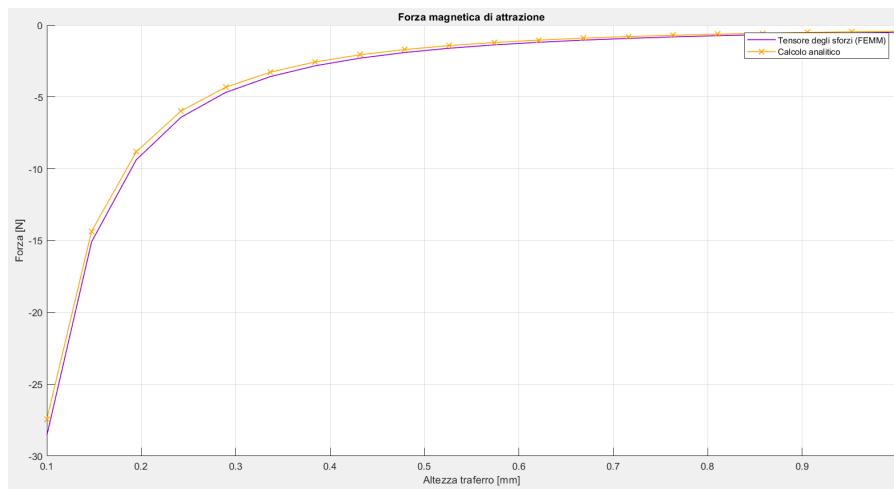


Figura 1.6: Confronto FEMM-Analitico Forza

Esercizio 1: Elettromagnete a Bicchiere

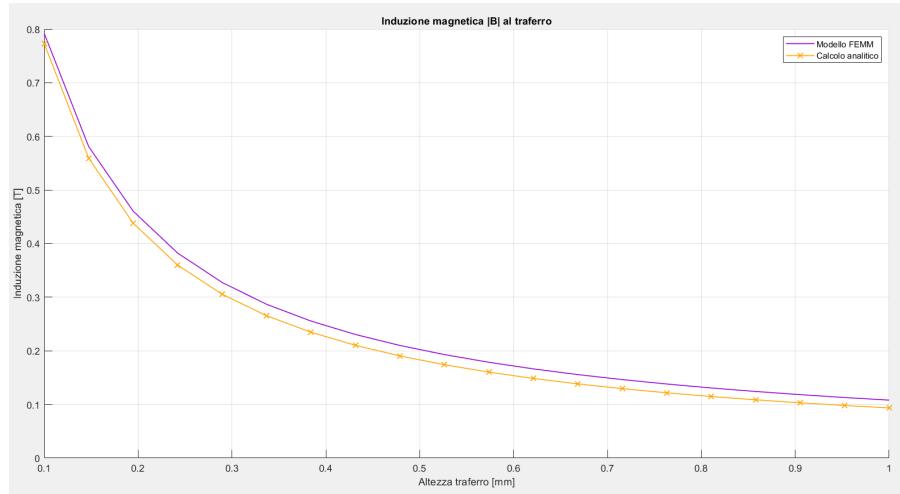


Figura 1.7: Confronto FEMM-Analitico induzione

1.4 Modello CST

In seguito è riportato il modello in esame.

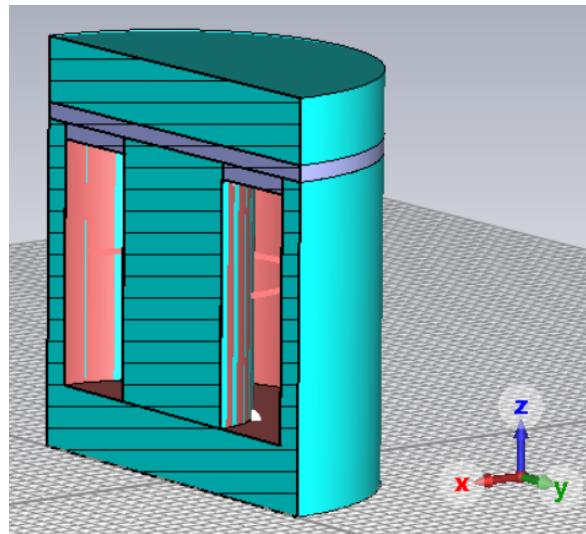


Figura 1.8: Modello Elettromagnete a Bicchiere

Le caratteristiche utilizzate per i materiali e il circuito sono identiche al modello FEMM, per poter essere in grado di confrontarne i risultati ottenuti.

Le grandezze di mesh (Max. Step Width) assegnate sono:

- Mesh aria: 1
- Mesh aria traferro: 0.5
- Mesh ferro: 2

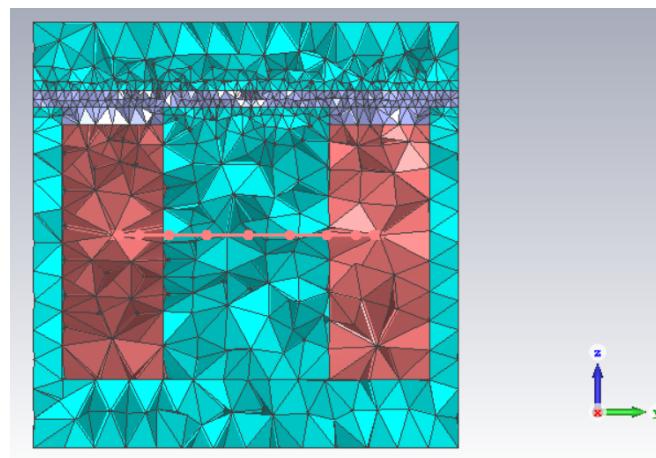


Figura 1.9: Mesh totale

1.5 Analisi CST

1.5.1 Mappa Cromatica

In seguito è presente la mappa cromatica del modello in questione, in particolare con un traferro di 1 mm.

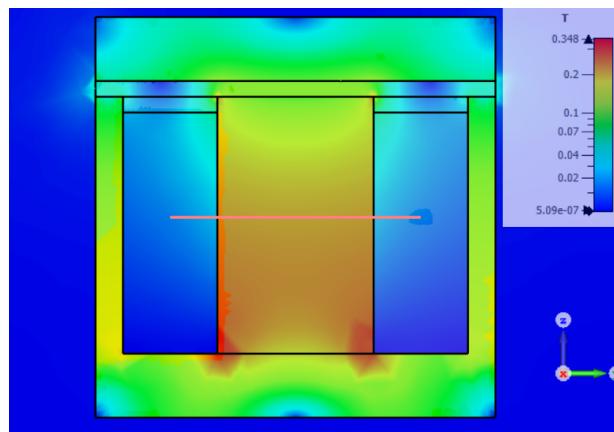


Figura 1.10: Mappa cromatica CST

1.5.2 Ottimizzazione dello sfruttamento di un elettromagnete con il metodo delle riluttanze

L'obiettivo principale dell'ottimizzazione è garantire che i flussi magnetici nei due rami laterali siano uguali al flusso nella colonna centrale, sfruttando al meglio il ferro disponibile. Questo approccio minimizza le perdite magnetiche e garantisce un uso efficiente del materiale.

La **riluttanza magnetica** è definita come:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$$

Dove:

- l è la lunghezza del percorso magnetico,
- μ è la permeabilità magnetica del materiale (ad esempio μ_0 per il traferro),
- S è l'area della sezione trasversale.

Definizione del problema

L'elettromagnete ha:

- Un raggio totale $R_{\text{tot}} = 12.5$ mm,
- Una bobina larga $L_{\text{bobina}} = 5.9$ mm,

Il ferro utile è lo spazio tra il raggio totale e la bobina:

$$R_{\text{ferro}} = R_{\text{tot}} - L_{\text{bobina}} = 12.5 \text{ mm} - 5.9 \text{ mm} = 6.6 \text{ mm}.$$

Per ottimizzare il ferro utile, il flusso magnetico deve rispettare la condizione:

$$\Phi_{\text{tot}} = \Phi_{\text{colonna centrale}} = 2\Phi_{\text{colonne laterali}}$$

Dove:

- Φ_{tot} è il flusso totale generato dall'elettromagnete,
- $\Phi_{\text{colonna centrale}}$ è il flusso nella colonna centrale,
- $\Phi_{\text{colonne laterali}}$ è il flusso in ciascuna delle due colonne laterali.

Calcolo della larghezza delle colonne

Per uguagliare i flussi, le riluttanze devono essere bilanciate:

$$\mathcal{R}_{\text{colonna centrale}} = \mathcal{R}_{\text{colonne laterali}}.$$

La riluttanza per ogni colonna dipende dall'area della sezione trasversale:

$$S_{\text{colonna centrale}} = 2S_{\text{colonna laterale}}.$$

Dato che il ferro utile ha larghezza totale di 6.6 mm:

$$S_{\text{colonna centrale}} = 2S_{\text{colonna laterale}} \implies 6.6 = 2(3.3).$$

Pertanto:

- Ogni colonna laterale ha una larghezza di 3.3 mm,
- La colonna centrale ha una larghezza di 6.6 mm.

In seguito sono riportati la mappa cromatica e il grafico di induzione con le sezioni ottimizzate

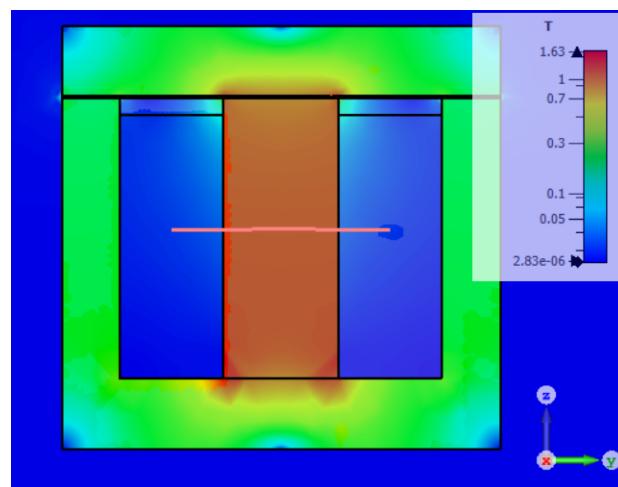


Figura 1.11: Mappa cromatica CST con sezioni ottimizzate

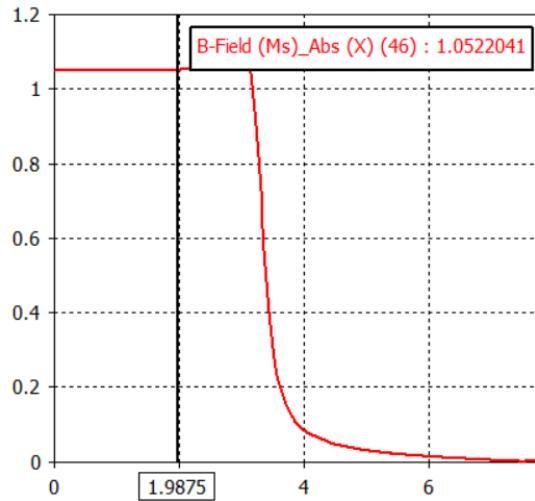


Figura 1.12: Induzione colonna centrale

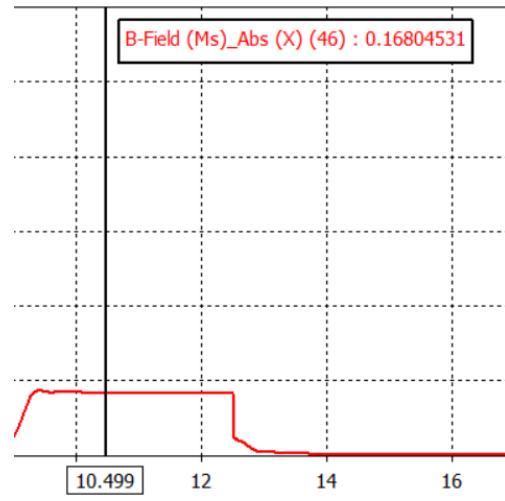


Figura 1.13: Induzione colonna laterale

1.5.3 Calcolo e comparazione dei flussi magnetici

Per verificare il bilanciamento dei flussi magnetici nell'elettromagnete, calcoliamo il flusso nella colonna centrale (Φ_{grande}) e il flusso nelle colonne laterali (Φ_{piccolo}) utilizzando le seguenti formule.

Flusso nella colonna centrale

Il flusso nella colonna centrale è dato da:

$$\Phi_{\text{grande}} = B_{\text{centrale}} \cdot A_{\text{centrale}},$$

dove:

- $B_{\text{centrale}} = 1.052 \text{ T}$ è l'induzione magnetica nella colonna centrale,
- $A_{\text{centrale}} = \pi \cdot r_{\text{centrale}}^2$ è l'area della sezione trasversale della colonna centrale.

Sostituendo $r_{\text{centrale}} = 3.3 \text{ mm} = 3.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$:

$$A_{\text{centrale}} = \pi \cdot (3.3 \cdot 10^{-3})^2,$$

$$\Phi_{\text{grande}} = 1.052 \cdot \pi \cdot (3.3 \cdot 10^{-3})^2 \approx 35.99 \text{ Wb}.$$

Flusso nelle colonne laterali

Il flusso nelle colonne laterali è dato da:

$$\Phi_{\text{piccolo}} = B_{\text{laterale}} \cdot A_{\text{laterale}},$$

dove:

- $B_{\text{laterale}} = 0.168 \text{ T}$ è l'induzione magnetica nelle colonne laterali,
- $A_{\text{laterale}} = \pi \cdot (r_{\text{est}}^2 - r_{\text{int}}^2)$ è l'area della sezione trasversale delle colonne laterali.

Sostituendo:

- $r_{\text{est}} = 12.5 \text{ mm} = 12.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$,
- $r_{\text{int}} = 9.2 \text{ mm} = 9.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$,

l'area diventa:

$$A_{\text{laterale}} = \pi \cdot \left((12.5 \cdot 10^{-3})^2 - (9.2 \cdot 10^{-3})^2 \right),$$
$$\Phi_{\text{piccolo}} = 0.168 \cdot \pi \cdot \left((12.5 \cdot 10^{-3})^2 - (9.2 \cdot 10^{-3})^2 \right) \approx 37.79 \text{ Wb.}$$

Comparazione dei flussi

I due flussi calcolati risultano:

$$\Phi_{\text{grande}} = 35.99 \text{ Wb}, \quad \Phi_{\text{piccolo}} = 37.79 \text{ Wb.}$$

Questi valori sono molto simili, dimostrando che il design ottimizza il bilanciamento dei flussi magnetici nell'elettromagnete.

1.5.4 Induzione al traferro

Per calcolare l'induzione al traferro in due casi diversi, uno con traferro da 0.1 a 1mm (fissando la corrente a 0,34A) e uno con corrente da 0,126 a 1A (fissando l'ancoretta ad una distanza di 1mm), si è utilizzata la modalità sweep parameter che permette di variare i parametri selezionati in un range con uno step specifico o con un numero di sample predefiniti.

Sweep in corrente

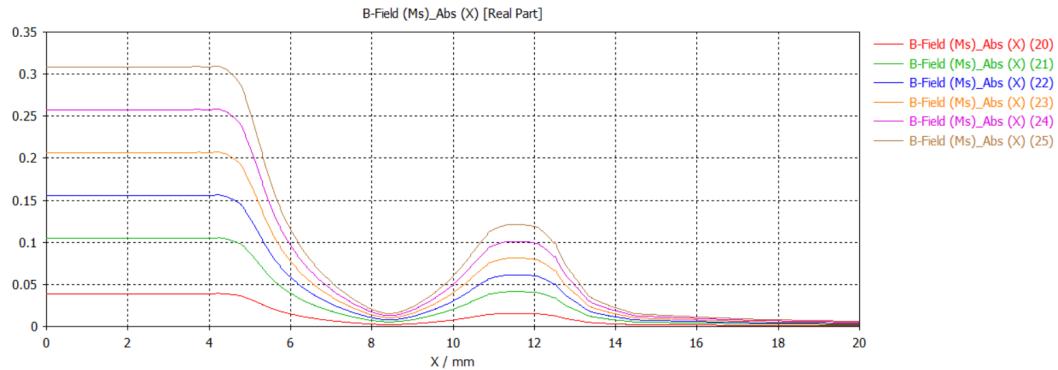


Figura 1.14: Curve sweep in corrente 0.126-1A ($h_{traf}=1\text{mm}$)

Sweep traferro

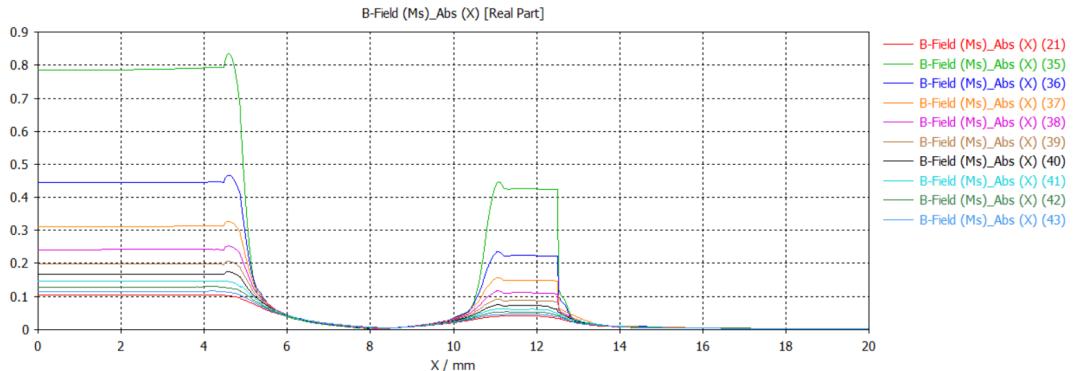


Figura 1.15: Curve sweep in posizione 0.1-1mm (corr=0.34A)

Nel primo caso, variando la corrente da 0,126 a 1 A con traferro fisso a 1 mm, l'induzione aumenta proporzionalmente alla corrente, poiché un maggior valore di corrente genera un campo magnetico più intenso. Nel secondo caso, variando il traferro da 0,1 a 1 mm con corrente fissa a 0,34 A, l'induzione magnetica diminuisce significativamente all'aumentare della distanza, poiché il traferro più ampio aumenta la riluttanza del circuito magnetico, riducendo il flusso magnetico.

1.6 Confronto FEMM-CST

Infine per verificare che entrambi i modelli siano validi è possibile, salvando le soluzioni, sovrapporre i grafici ottenuti da FEMM e CST.

In questo caso si sono messi a confronto i valori di induzione con un traferro di 0.1mm, un grafico rappresenta i valori di $|B|$ e l'altro B_n .

In particolare il grafico di B_n ci permette di capire il verso del flusso lungo il magnete.

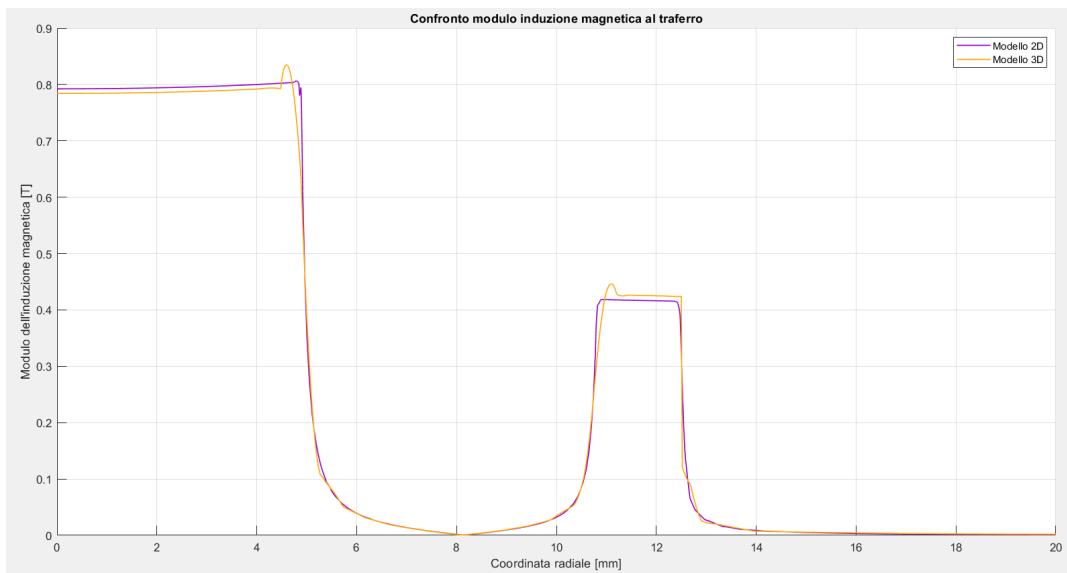


Figura 1.16: Confronto $|B|$ FEMM-CST

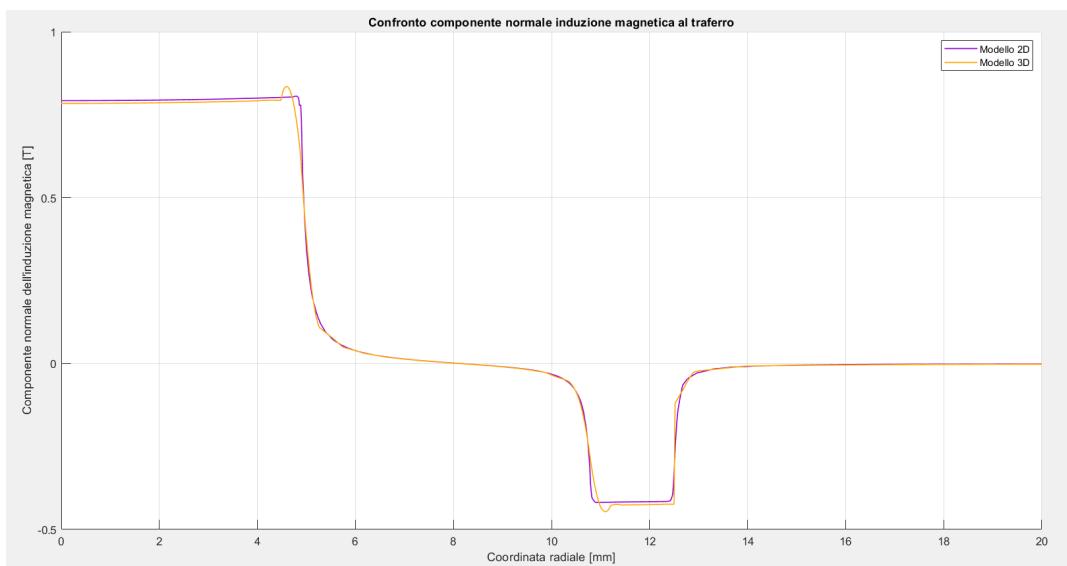


Figura 1.17: Confronto B_n FEMM-CST

Esercizio 1: Elettromagnete a Bicchiere

Inoltre si può fare un confronto finale totale tra le forze agenti sull'ancoretta con un aumento del traferro da 0.1mm a 1mm, sovrapponendo calcoli analitici, FEMM e CST.

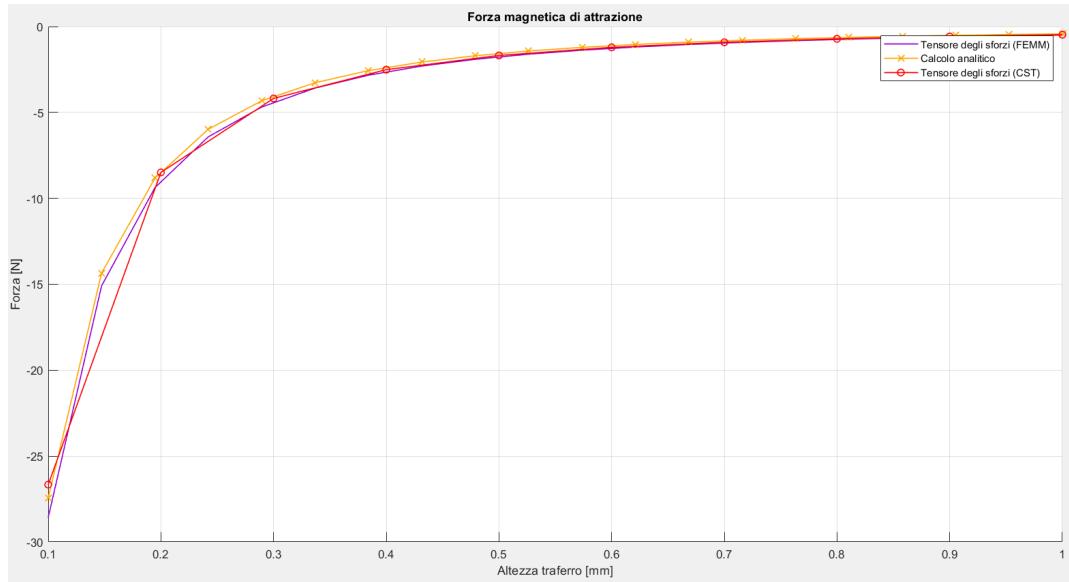


Figura 1.18: Grafico Forza agente sull'ancoretta analitico-FEMM-CST

Capitolo 2

Esercizio 2: Macchina per magnetoscopia

2.1 Dati:

- Lunghezza struttura: $L = 200\text{cm}$
- Altezza struttura: $h = 100\text{cm}$
- Larghezza struttura: $\Delta z_1 = 20\text{cm}$
- Gap traferro: $g = 0.5\text{cm}$
- Diametro esterno tubo: $\text{Dia}_{tubo} = 20(1 + \frac{2}{20}) = 22\text{cm}$
- Spessore tubo: $\Delta_{tubo} = 2(1 + \frac{2}{20}) = 2.2\text{cm}$
- Permeabilità magnetica relativa ferro: $\mu_{Fe} = 1000$
- Permeabilità magnetica relativa 410 (materiale tubo): $\mu_{410} = 400$ (lineare)
- Larghezza tubo: $\Delta z_2 = 40\text{cm}$
- Densità di corrente massima: $\delta = 5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$
- Campo magnetico tangenziale tubo: $24 \frac{\text{A}}{\text{cm}} \leq H_{tan} \leq 48 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$

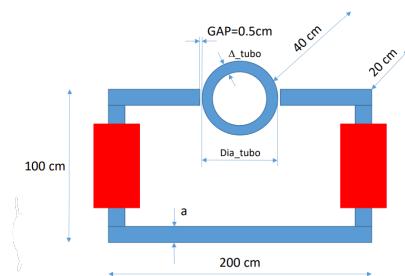


Figura 2.1: Modello geometrico

2.2 Modello equivalente a riluttanze

Partendo dalla condizione relativa al valore del campo magnetico tangenziale sulla superficie del tubo, si procede attraverso la risoluzione del circuito magnetico equivalente. In questo caso si intende lineare il materiale 410 del tubo. Le due bobine sono modellizzate dai generatori NI , in modo che essi concorrono alla generazione di un flusso concorde. Inoltre, vengono rappresentate le riluttanze dei tratti del circuito magnetico, comprese quelle del traferro e del tubo, quest'ultimo trattato come due riluttanze in parallelo. Di seguito il modello.

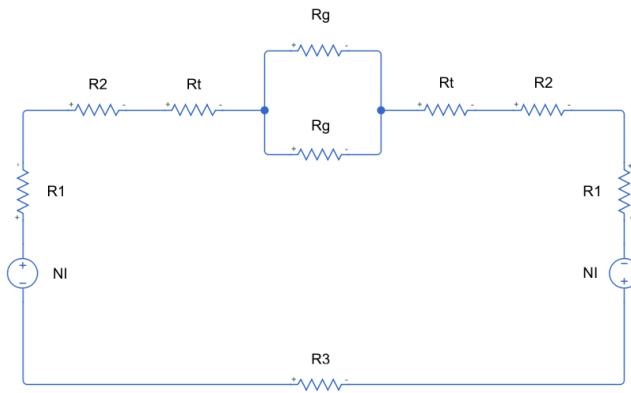


Figura 2.2: Circuito magnetico equivalente

L'obiettivo è quello di trovare una funzione che leggi le grandezze di spessore del ferro a e il numero di Ampere-spire NI affinché si raggiungano i valori di campo desiderati. Si scrive la legge di Kirchhoff che risolve il circuito:

$$\Phi = \frac{2NI}{R_{eq}} \quad (2.1)$$

in cui

$$Req = 2R_1 + 2R_2 + R_3 + 2R_t + \frac{1}{2}R_g \quad (2.2)$$

Definisco le riluttanze con le seguenti espressioni:

$$R_1 = \frac{1}{4\pi * 10^{-7} * \mu_{Fe}} \frac{h-a}{a\Delta_{z1}} = 3979 \frac{1-a}{a} H^{-1} \quad (2.3)$$

$$R_2 = \frac{1}{4\pi * 10^{-7} * \mu_{Fe}} \frac{\frac{L}{2} - \frac{a}{2} - g - \frac{Dia_{tubo}}{2}}{a\Delta_{z1}} = 3979 \frac{0.885 - \frac{a}{2}}{a} H^{-1} \quad (2.4)$$

$$R_3 = \frac{1}{4\pi * 10^{-7} * \mu_{Fe}} \frac{L-a}{a\Delta_{z1}} = 3979 \frac{2-a}{a} H^{-1} \quad (2.5)$$

$$R_t = \frac{1}{4\pi * 10^{-7}} \frac{g}{a \frac{\Delta_{z1} + \Delta_{z2}}{2}} = \frac{13263}{a} H^{-1} \quad (2.6)$$

$$R_g = \frac{1}{4\pi * 10^{-7} * \mu_{410}} \frac{\pi (\frac{D_{tubo}}{2} - \frac{\Delta_{tubo}}{2})}{a \Delta_{tubo}} = 70312.5 H^{-1} \quad (2.7)$$

Dopo una serie di passaggi algebrici, si ottiene l'espressione finale di R_{eq} :

$$R_{eq} = (19240 + \frac{49485}{a}) H^{-1} \quad (2.8)$$

A questo punto, è necessario fissare il valore di flusso desiderato, dimensionandolo rispetto al valor massimo di campo magnetico ammissibile sul tubo, ovvero $4800 \frac{A}{m}$. Si ricava in primo luogo il valore di induzione magnetica B_{max} corrispondente.

$$B_{max} = \mu_0 \mu_{410} H_{max} = 2.41 T \quad (2.9)$$

Considerando che tale induzione magnetica è misurata sul "lato superiore" del tubo, che è interessato dalla metà del flusso complessivo (vedi circuito modello a riluttanze), si usa la seguente per ottenere il flusso magnetico Φ :

$$\Phi = 2B_{max}S = 2B_{max}\Delta_z \Delta_{tubo} = 0.0425 Wb \quad (2.10)$$

Sostituendo i risultati ottenuti si ricava la relazione diretta tra le grandezze incognite a e NI .

$$a = \frac{49485}{\frac{2NI}{0.0425} - 19240} \quad (2.11)$$

Attraverso il codice MATLAB riportato, si ottiene una funzione che descrive l'andamento dello spessore a rispetto al numero di Ampere-spire NI . Dunque, analizzando il grafico ottenuto, possono essere individuate le possibili coppie di valori da utilizzare, facendo attenzione a sfruttare al meglio i materiali. Altro requisito importante sarà quello di permettere al tubo di saturare, senza che ciò avvenga nel ferro del circuito magnetico.

```

untitled.m
1 H_tan = 4800;
2 mu0 = 1.256637e-6;
3 B_tan = H_tan*mu0*400;
4 Dz = 0.4;
5 Dt = 0.022;
6 fi = 2*Dt*Dz*B_tan;
7 NI = 12000;
8 Req = (2*NI)/(fi);
9 a = 49485/(Req-19240)

```

Figura 2.3: Codice MATLAB di risoluzione

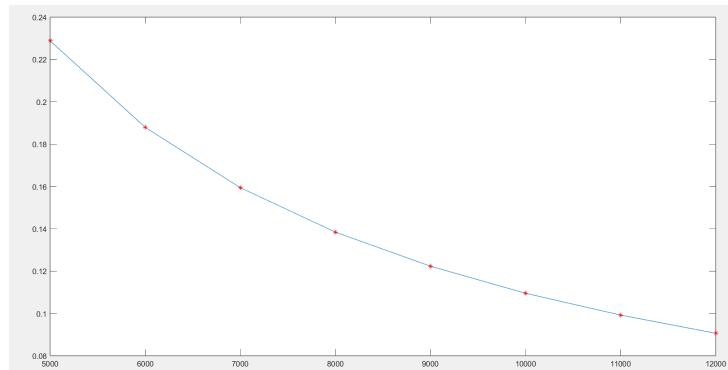


Figura 2.4: Andamento di a in funzione di NI

2.3 Modello CST

Il modello in CST si presenta in questo modo.

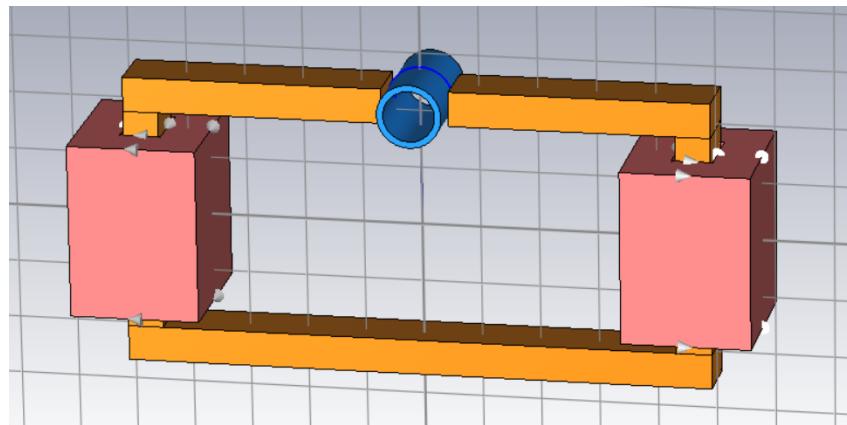


Figura 2.5: Modello CST magnetoscopio

Vengono definiti due archi in prossimità (a distanza 1mm) delle superfici interna ed esterna del tubo; tali curve sono mostrate in figura.

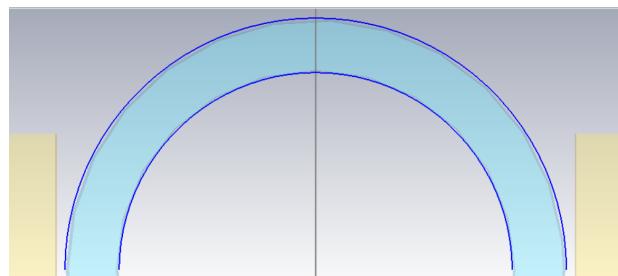


Figura 2.6: Archi per valutazione campo magnetico tangenziale

Sugli archi verrà calcolato il campo magnetico che ci interessa. Tendenzialmente, si cerca di scegliere un valore dello spessore a basso per ridurre la quantità di ferro necessaria, ovviamente entro le condizioni imposte dalle richieste. Inoltre, una mesh più fitta (1) rispetto ai 5 del ferro è stata applicata in prossimità del tubo per ottenere un'accuratezza maggiore dei risultati. Si considera pari a circa $1.8T$ il valore di induzione magnetica oltre il quale il ferro inizia a saturare.

2.3.1 Prova 1: NI=12000 Asp, a=9.06cm

I grafici del campo magnetico lungo le due curve forniscono dei valori accettabili su gran parte della superficie del tubo, tuttavia non sfruttano al massimo il campo disponibile e dunque il flusso, visto il margine che rimane rispetto al limite di $4800 \frac{A}{m}$. Per l'arco esterno si raggiungono i $3000 \frac{A}{m}$, mentre su quello interno i $3500 \frac{A}{m}$.

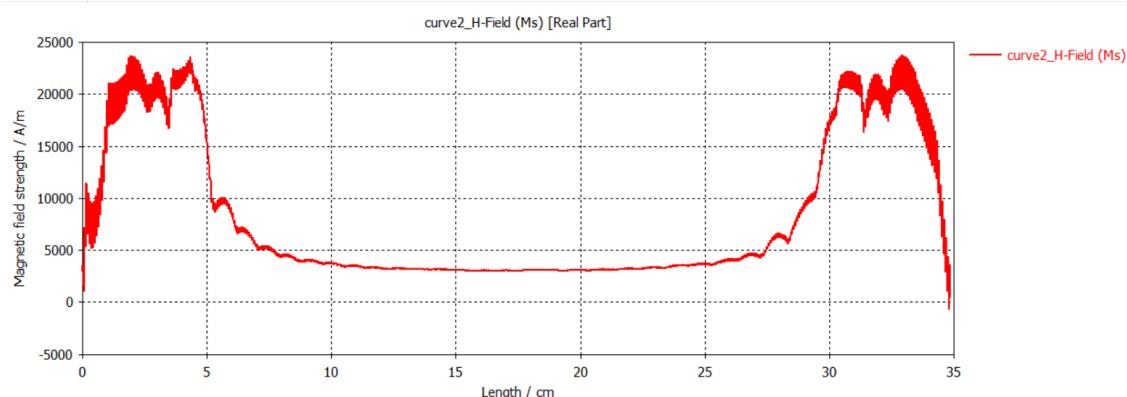


Figura 2.7: Andamento campo magnetico tangenziale H_{tan} lungo l'arco esterno CST Prova 1

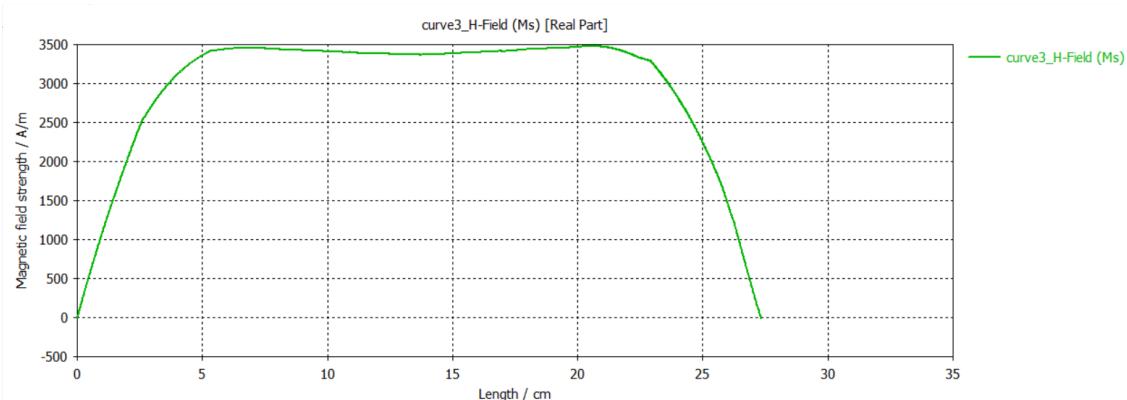


Figura 2.8: Andamento campo magnetico tangenziale H_{tan} lungo l'arco interno CST Prova 1

Inoltre, nella mappa cromatica relativa all'induzione magnetica tangenziale B , si può constatare che il ferro raggiunga valori di induzione maggiori rispetto al tubo. Se ne deduce che sia il caso di aumentare lo spessore a , nonostante tale soluzione sarebbe quella che garantirebbe una porzione maggiore di tubo compresa nei limiti di norma imposti. Pertanto, si cerca un compromesso tra sfruttamento dei materiali e porzione di tubo utile alla misurazione.

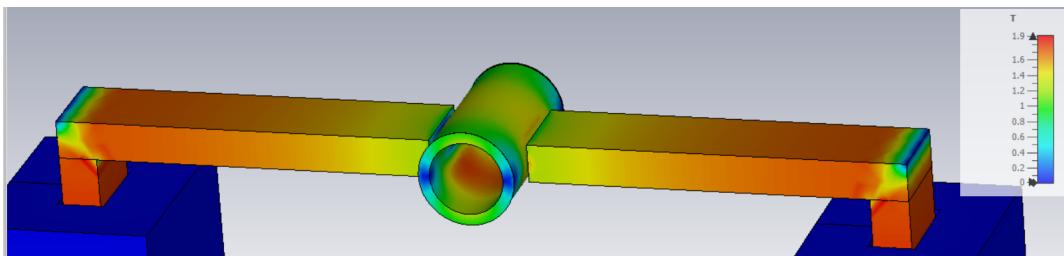


Figura 2.9: Mappa cromatica induzione magnetica tangenziale B Prova 1

2.3.2 Prova 2: NI =10000 Asp, a=10.95cm

Risultati più efficienti sono forniti dal secondo caso preso in considerazione. Mentre l'induzione magnetica B nel ferro diminuisce, essa aumenta leggermente nel tubo. Si riesce a constatare un miglioramento dei valori di campo misurati sui due archi, riportati in figura in verde (confrontati con i risultati del caso precedente di colore rosso).

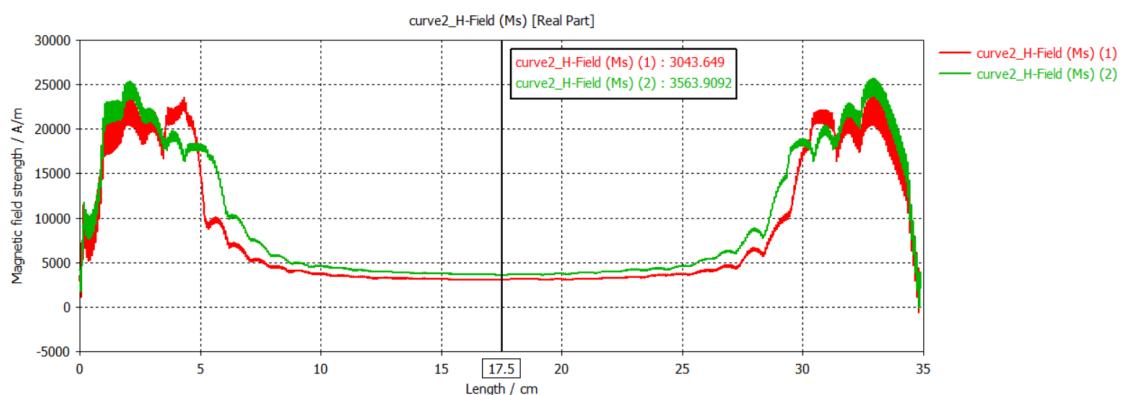


Figura 2.10: Confronto andamenti campi magnetici tangenziali lungo l'arco esterno CST

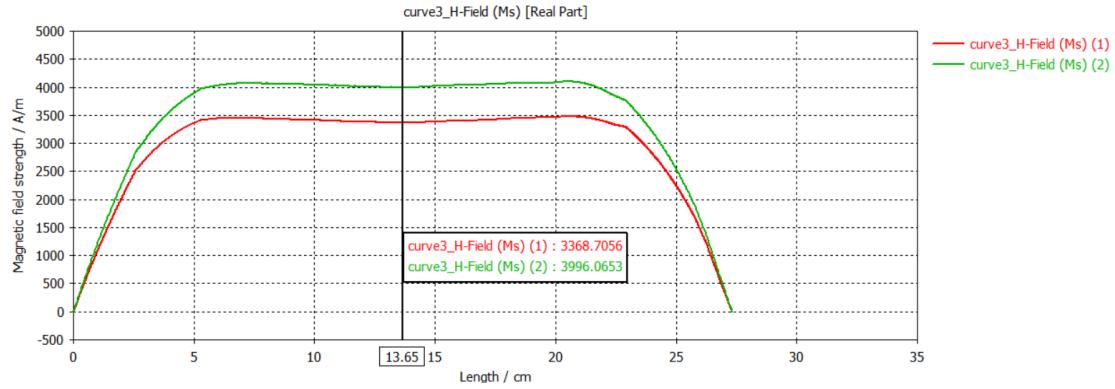


Figura 2.11: Confronto andamenti campi magnetici tangenziali lungo l'arco interno CST

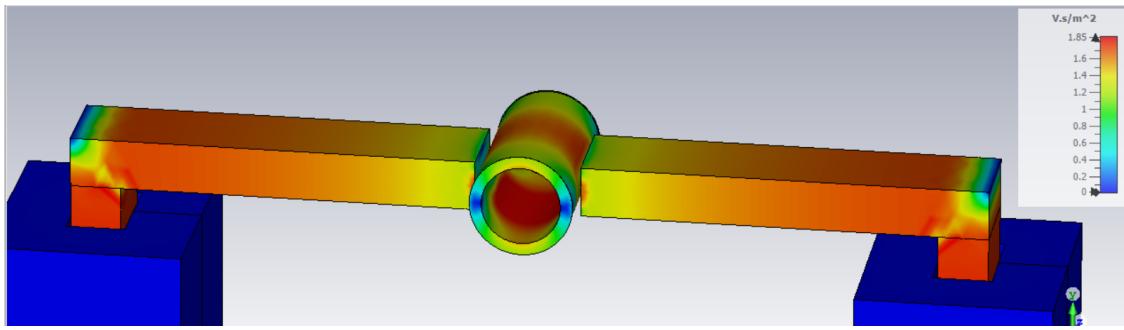


Figura 2.12: Mappa cromatica induzione magnetica tangenziale B Prova 2

Dalle figure è possibile identificare i punti collocati sull'asse geometrico verticale del tubo. Con questa soluzione si ottengono valori di campo superiori di circa $540 \frac{A}{m}$ rispetto alla prova 1 nella zona centrale. È verosimile aspettarsi che tale valore (in eventuali altre prove) aumenti al diminuire delle Ampere-spire e all'aumentare conseguente dello spessore; tuttavia, un'operazione del genere ridurrebbe ancora di più l'area del tubo compresa nei limiti di $2400 \frac{A}{m}$ e $4800 \frac{A}{m}$. Inoltre, la quantità di ferro necessaria crescerebbe. Si sceglie, dunque, di adottare questa prova e i risultati ottenuti per il proseguo del progetto.

2.4 Modello FEMM

Stabiliti i parametri, si procede con la rappresentazione della macchina per magnetoscopia su software FEMM, e successivo confronto tra i risultati ottenuti. Ovviamente, FEMM fornirà risultati meno accurati, in quanto non è possibile stabilire per le diverse parti del modello valori di profondità diverse tra loro, ma può fornire ulteriori conferme riguardanti la scelta effettuata. Considerando il valor massimo ammissibile di densità di corrente $\delta = 5 \frac{A}{mm^2}$, si ricava la sezione delle bobine necessaria a sopportarla S , imponendo un coefficiente di stipamento $k_s = 0.5$.

$$S = \frac{NI}{\delta k_s} = \frac{10000}{5 * 0.5} mm^2 = 4000 mm^2 = 40 cm^2 \quad (2.12)$$

Dunque, provando a sfruttare un rapporto tra larghezza l' e altezza h' di circa 1:4, è possibile ricavare l' :

$$l'^2 = \frac{S}{4} = \frac{40}{4} \text{ cm} = 10 \text{ cm} \quad (2.13)$$

$$l' = \sqrt{10} \text{ cm} = 3.16 \text{ cm} \quad (2.14)$$

$$h' = 4l' = 12.65 \text{ cm} \quad (2.15)$$

Il modello meshato appare come in figura.

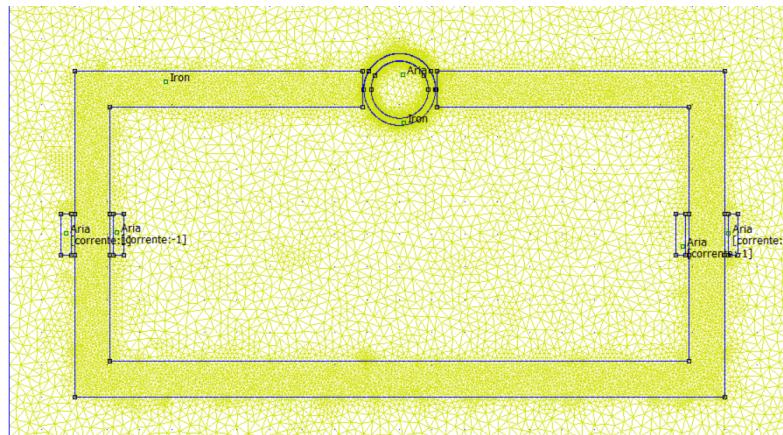


Figura 2.13: Mesh totale macchina per magnetoscopia

Sul dominio esterno è posta la condizione al contorno: "Prescribed A".

2.4.1 Analisi FEMM

Dalla mappa cromatica dell'induzione magnetica B si riesce a constatare la magnetizzazione maggiore del tubo rispetto al ferro, risultato che conferma il lavoro svolto in precedenza.

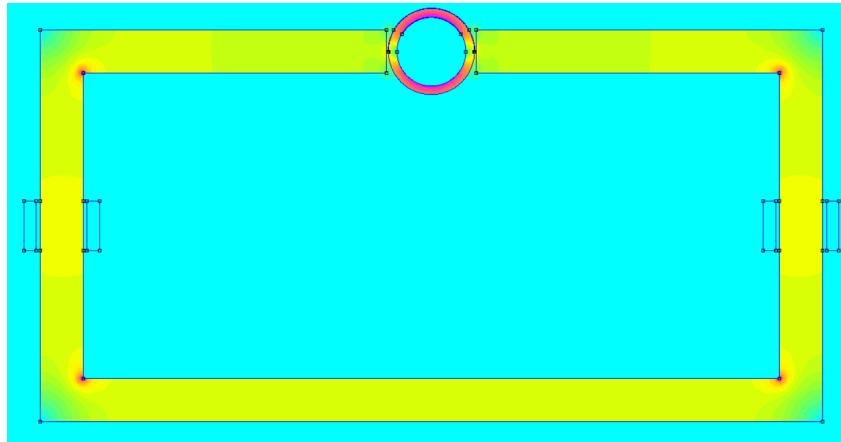


Figura 2.14: Mappa cromatica induzione magnetica B

Inoltre, come fatto anche su software CST, si calcola il campo magnetico tangenziale H_{tan} lungo i due archi (interno ed esterno) distanti 1mm dalle superfici del tubo.

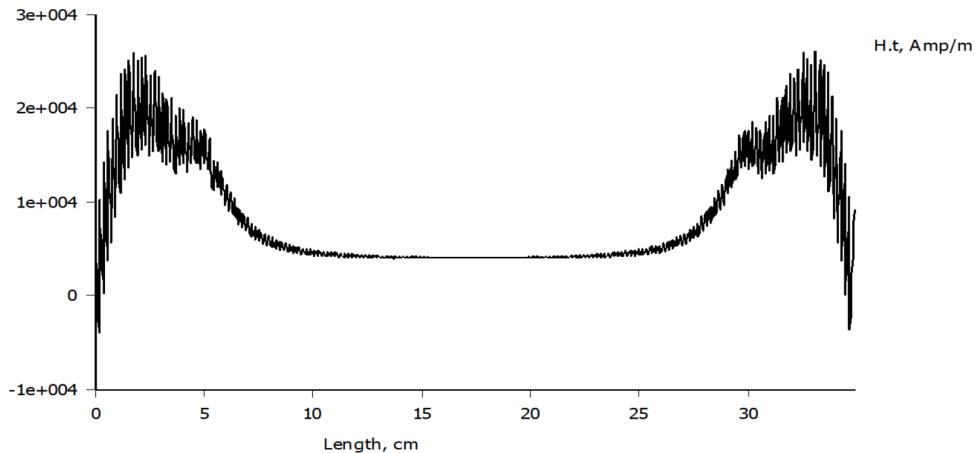


Figura 2.15: Andamento campo magnetico tangenziale H_{tan} lungo l'arco esterno FEMM

Per rendere il grafico più accurato, si stampa il risultato su una porzione limitata di semicirconferenza, dunque considerando un angolo $30^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$. In questo modo, si evita di considerare i punti di massimo del grafico, che rendono la scala sulle ordinate poco accurata per ciò che serve calcolare.

Il punto di minimo è prossimo ai $4000 \frac{A}{m}$ e rimane pressoché costante per gran parte dell'arco. Inoltre è confrontabile con il risultato ottenuto in precedenza con il CST, dove tale valore era di circa $3600 \frac{A}{m}$; la discrepanza è dovuta agli errori di approssimazione e soprattutto alla diversa natura "dimensionale" con cui operano i due software. È importante notare che l'andamento rispecchia pienamente i risultati attesi, sia come forma, sia come valori registrati.

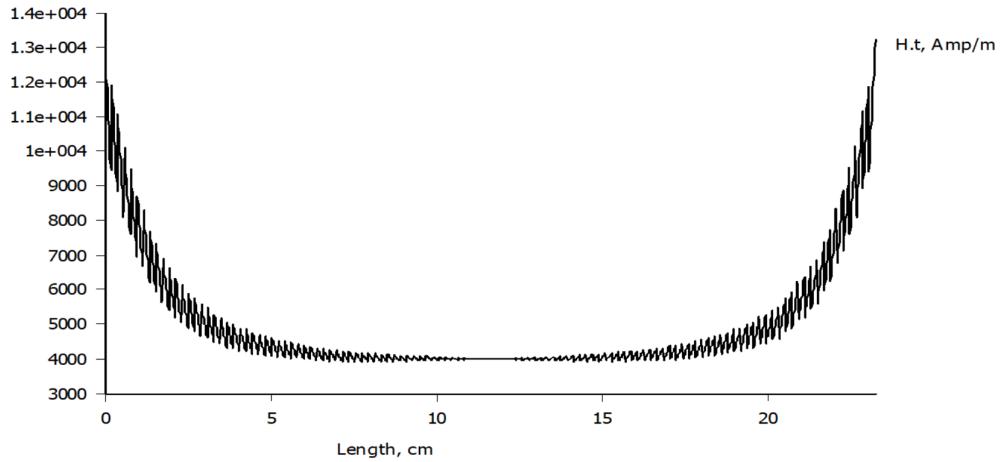


Figura 2.16: Andamento campo magnetico tangenziale H_{tan} lungo parte dell'arco esterno FEMM

Ciò avviene analogamente anche sull'arco interno.
Sul modello FEMM, nel punto centrale dell'arco si raggiungono i $4200 \frac{A}{m}$ circa, mentre sul modello CST si otteneva un numero prossimo ai $4000 \frac{A}{m}$. Anche qui i risultati risultano verificati.

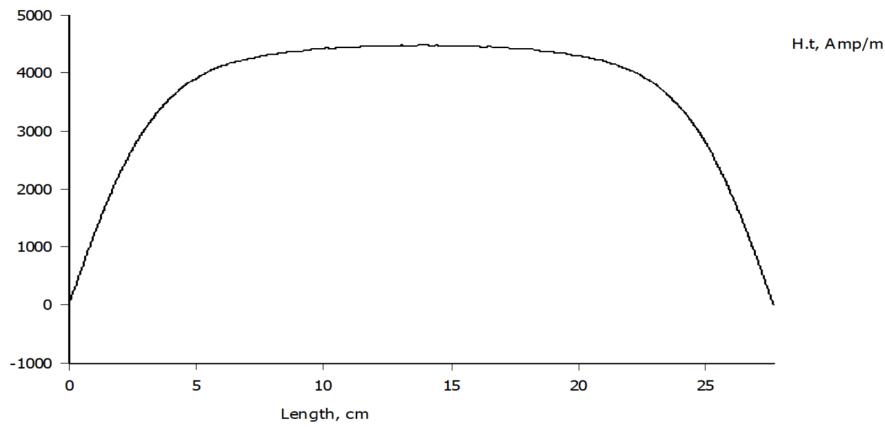


Figura 2.17: Andamento campo magnetico tangenziale H_{tan} lungo l'arco interno FEMM

Di seguito sono riportati i grafici che confrontano in maniera diretta i risultati appena citati. In blu sono tracciati gli andamenti relativi alla simulazione in FEMM, in rosso gli andamenti relativi al CST.

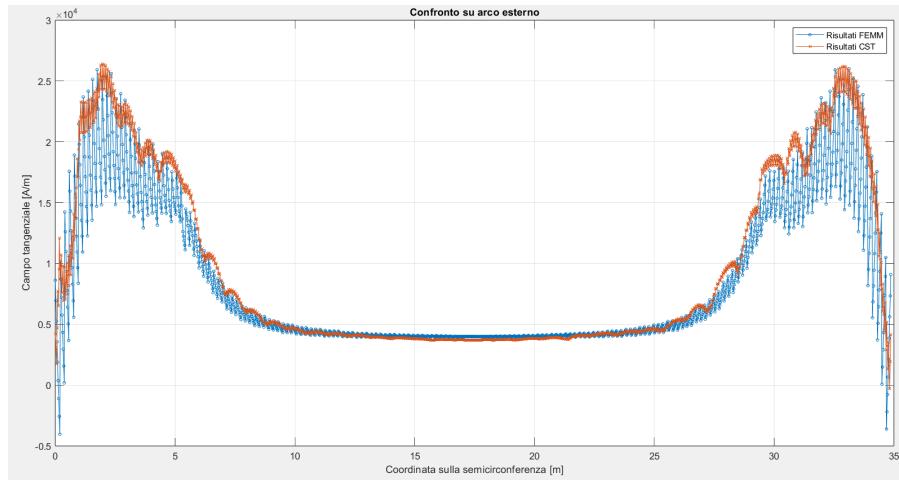


Figura 2.18: Confronto risultati su arco esterno

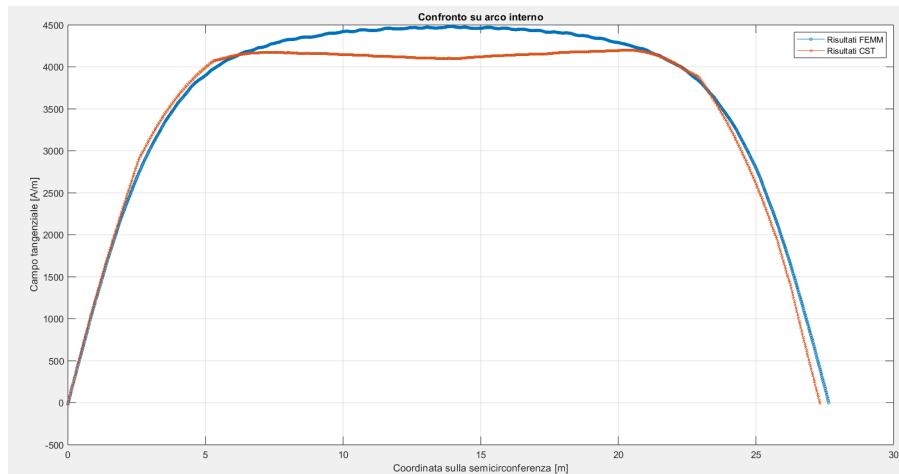


Figura 2.19: Confronto risultati su arco interno

2.5 Caso con materiale acciaio 410 non lineare

Questo approfondimento è stato svolto sostituendo il materiale lineare con cui si era definito il tubo con un acciaio 410 non lineare. Ricavando i dati sperimentali da [1] è stato possibile trovare i punti utili per ricostruire la caratteristica magnetica del "Stainless Steel 410".

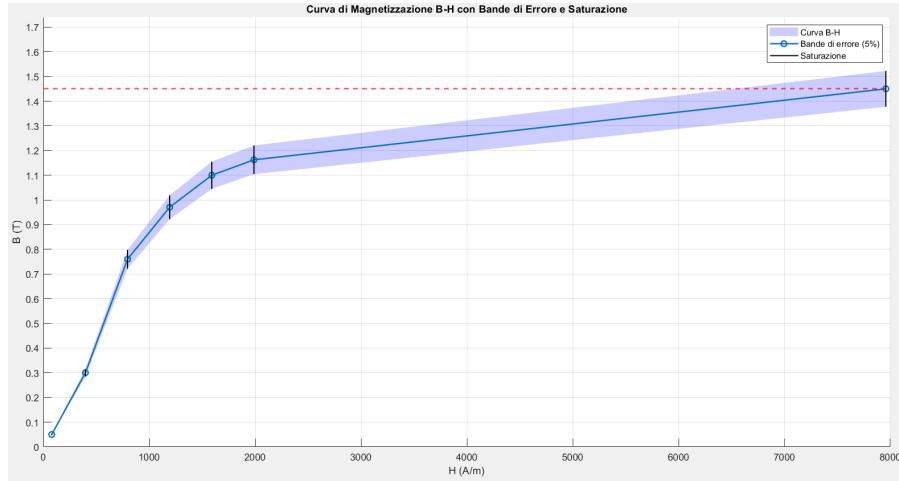


Figura 2.20: Curva di prima magnetizzazione 410SS

Come si può notare è presente un errore relativo del 5% sulle misurazioni, stando a quanto citato in [1].

Nel caso di materiale non lineare, quando si lavora in punti che superano il ginocchio, bisogna considerare un permeabilità magnetica relativa μ_r minore rispetto al caso precedente. Di conseguenza, a parità di induzione magnetica e lasciando invariati i parametri di dimensionamento, si otterranno valori di campo tangenziale decisamente maggiori rispetto al caso lineare.

2.5.1 Prova 1: NI = 10000 Asp, a = 10.95cm

I risultati della simulazione confermano le previsioni appena enunciate; inoltre, rispetto al caso lineare, è possibile osservare una discreta discrepanza tra i valori calcolati sulla superficie esterna e quelli sulla superficie interna, che raggiungono addirittura valori maggiori. Tuttavia, l'induzione nel ferro è contenuta rispetto al caso lineare, mentre il materiale 410 supera il valore di saturazione di circa $1.45T$.

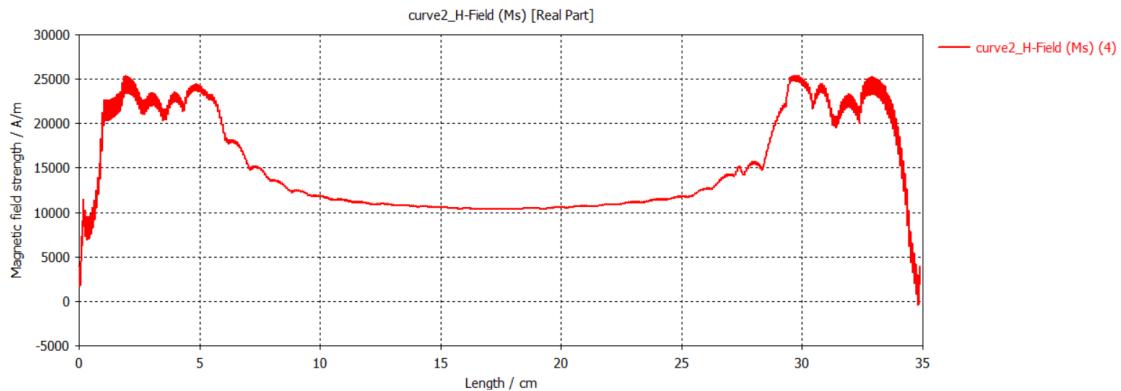


Figura 2.21: Andamento campo magnetico tangenziale H_{tan} arco esterno con materiale non lineare

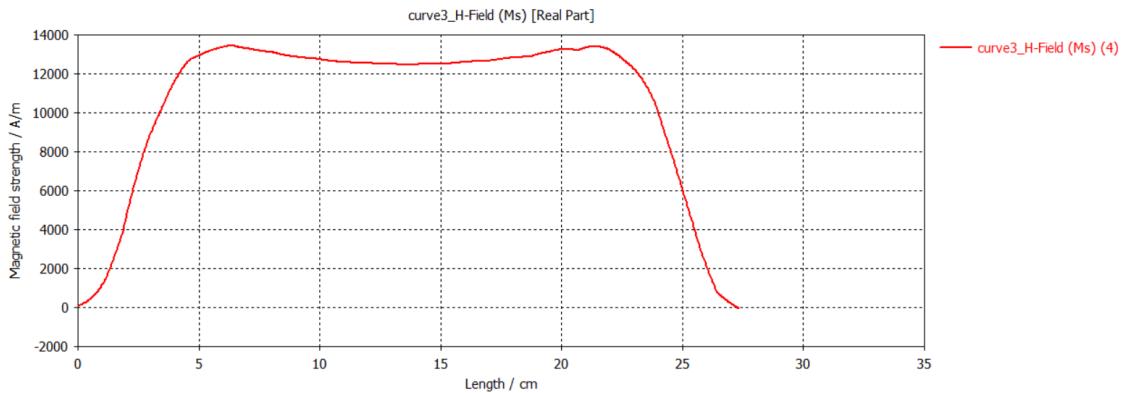


Figura 2.22: Andamento campo magnetico tangenziale H_{tan} arco interno con materiale non lineare

Dunque, è necessario abbassare il campo. Ciò viene ottenuto riducendo sia spessore del ferro, sia numero di Ampere-spire utilizzato.

2.5.2 Prova 2: NI=5500Asp, a=9cm

Con i nuovi valori assegnati, si ottiene un risultato decisamente più accettabile e che ricorda in maniera marcata quello raggiunto nel caso lineare; è da notare che in questo caso si andrebbe a risparmiare addirittura materiale in fase di progetto.

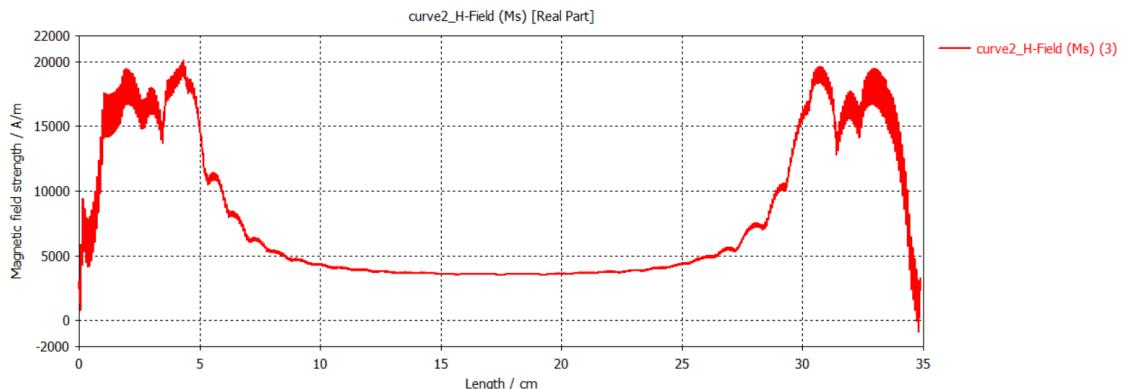


Figura 2.23: Andamento campo magnetico tangenziale H_{tan} arco esterno con materiale non lineare Prova 2

Per il calcolo sull'arco interno, a differenza del caso lineare, si notifica la presenza di due punti di massimo che superano i $5000 \frac{A}{m}$ posti in maniera simmetrica rispetto al centro.

Esercizio 2: Macchina per magnetoscopia

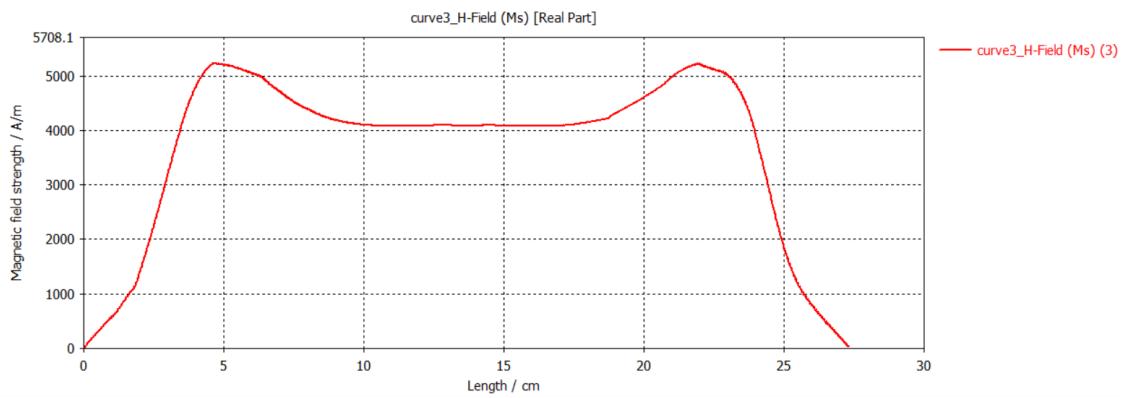


Figura 2.24: Andamento campo magnetico tangenziale H_{tan} arco interno con materiale non lineare Prova 2

Il campo magnetico, invece, come osservabile in figura, è decisamente basso rispetto a tutti i casi precedenti, nonostante i risultati finali siano del tutto congruenti. Il ferro è ancora lontano dalla saturazione, mentre il tubo presenta un'induzione vicina al valore di saturazione del suo materiale (circa $1.45T$).

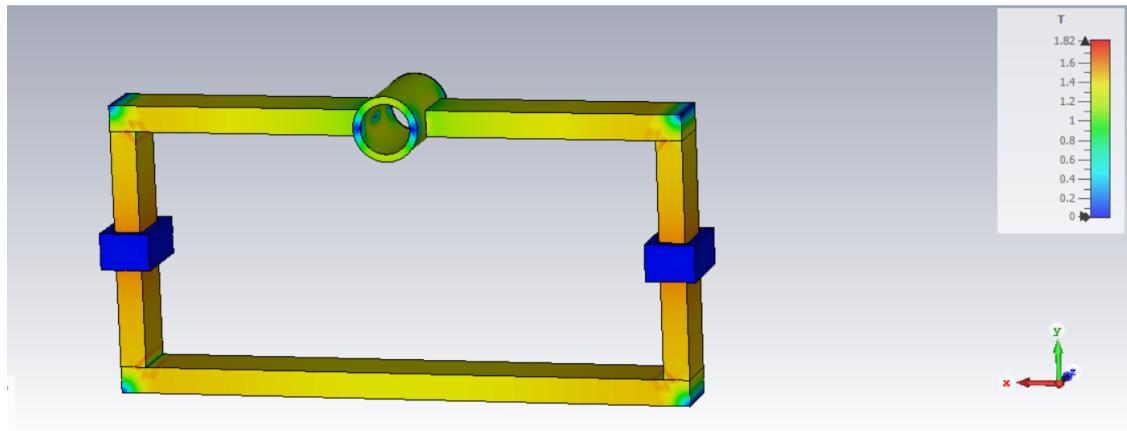


Figura 2.25: Mappa cromatica induzione magnetica B non lineare Prova 2

Capitolo 3

Esercizio 3: Elettromagnete a Spina

3.1 Dati:

- Altezza nucleo: $h_{\text{nucleo}} = 13.5\text{mm}$
- Larghezza nucleo: $y_{\text{nucleo}} = 15\text{mm}$
- Lunghezza nucleo: $x_{\text{nucleo}} = 29.4\text{mm}$
- Spessore nucleo: $w_{\text{nucleo}} = 1.3\text{mm}$
- Raggio interno bobina: $R_{\text{int}} = 3\text{mm}$
- Raggio esterno bobina: $R_{\text{est}} = 5.45\text{mm}$
- Spire bobina: $N = 400$
- Corrente: $I = 1A$
- Resistenza bobina: $R = 7.8\Omega$

E' stato inoltre definito un parametro che consente di modificare la posizione della spina, in modo da analizzare l'elettromagnete in varie condizioni.

3.2 Modello CST con materiale lineare

In seguito è riportato il modello in esame.

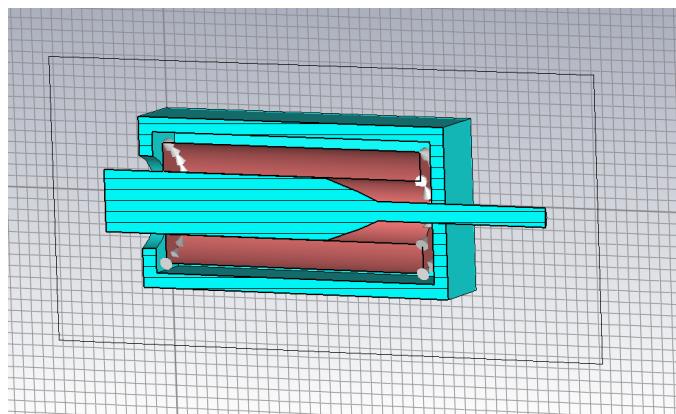


Figura 3.1: Modello elettromagnete a spina

Per realizzare il nucleo è stato utilizzato ferro lineare con permeabilità uguale a 1000. Le grandezze di mesh assegnate sono:

- Mesh ferro: 2
- Mesh coil: 2

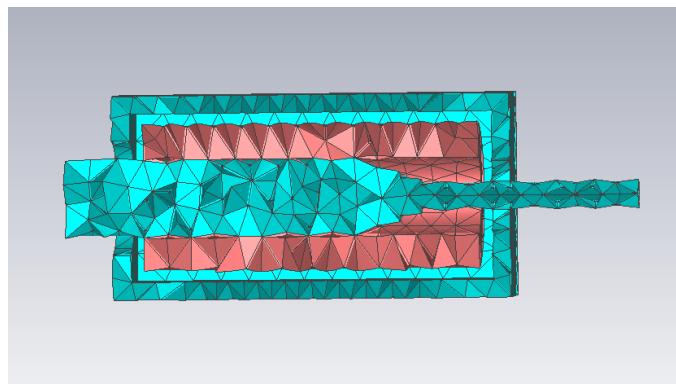


Figura 3.2: Mesh totale

3.2.1 Analisi CST

Mappa cromatica

Di seguito è mostrata la mappa cromatica ottenuta con la spina posizionata in modo tale che la molla risulti compressa.

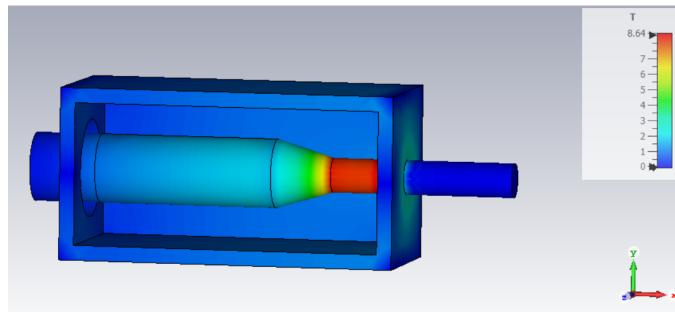


Figura 3.3: Mappa cromatica

Come si può notare si ottengono dei valori troppo elevati di induzione nel punto di restringimento della spina, dovuti al fatto che il materiale scelto per la realizzazione del nucleo non presenta alcun tipo di saturazione magnetica.

Forza sulla spina

In seguito è riportato il grafico che mostra l'andamento della forza agente sulla spina al variare della posizione della stessa, passando da una posizione di riposo ad una di compressione.

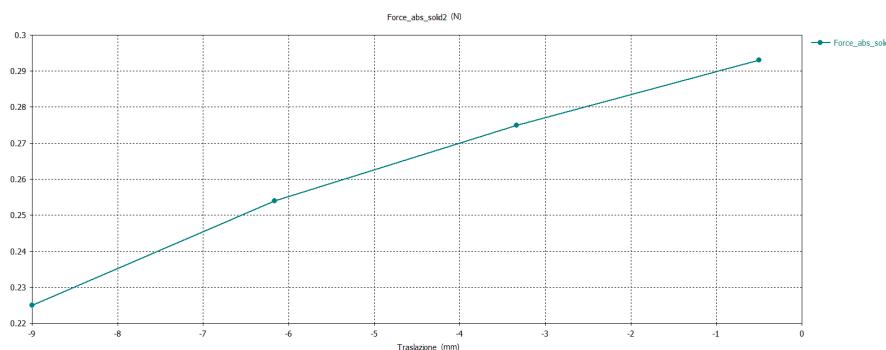


Figura 3.4: Andamento della forza agente sulla spina

3.3 Modello CST con materiale non lineare

Per questa analisi sono stati usati tutti i valori e le condizioni precedenti, l'unica differenza è nell'uso del materiale "Iron" fornito dalla libreria di CST.

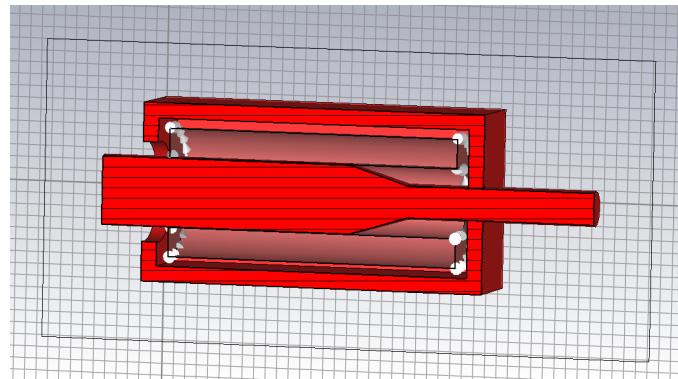


Figura 3.5: Modello elettromagnete a spina

3.3.1 Analisi CST

Mappa cromatica

In seguito è riportata la mappa cromatica.

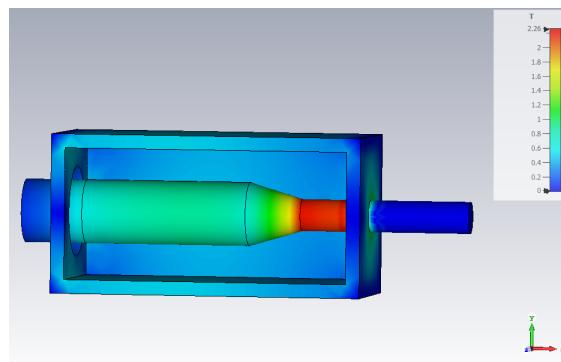


Figura 3.6: Mappa cromatica

E' possibile osservare in questo caso un valore decisamente più basso di induzione, conforme con i valori di saturazione del materiale scelto.

Forza sulla spina

Dall'osservazione dell'andamento della forza al variare della posizione della spina in questa condizione, rispetto al caso precedente, si nota, come previsto, una riduzione dei valori. Questa diminuzione è attribuibile alla significativa riduzione dell'induzione magnetica causata dal materiale.

Esercizio 3: Elettromagnete a Spina

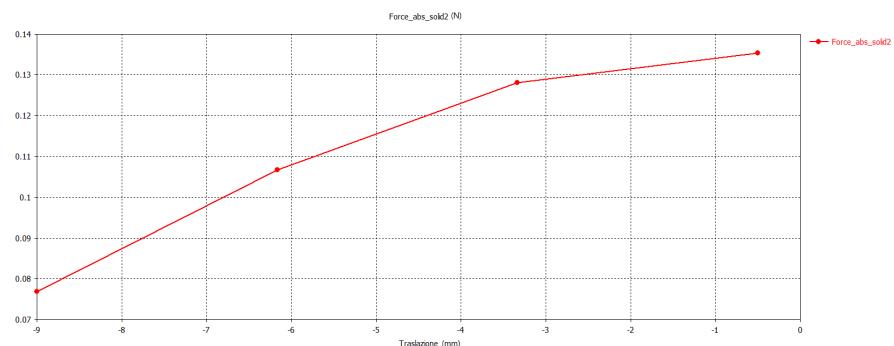


Figura 3.7: Andamento della forza agente sulla spina

Bibliografia

- [1] J.Iufer P.W.Droll. Magnetic properties of selected spacecraft materials. Technical report, NASA, 1967.