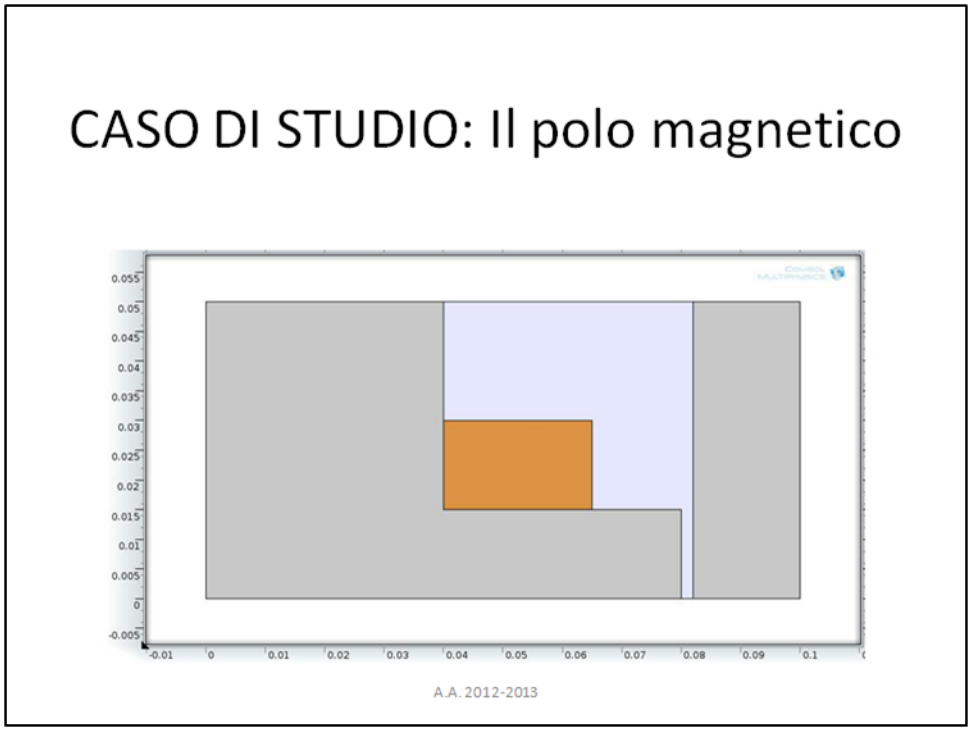
Corso di Elettrotecnica Industriale

Professore Paolo Di Barba

Il polo magnetico: simulazione nel tempo

Anno Accademico 2013/2014

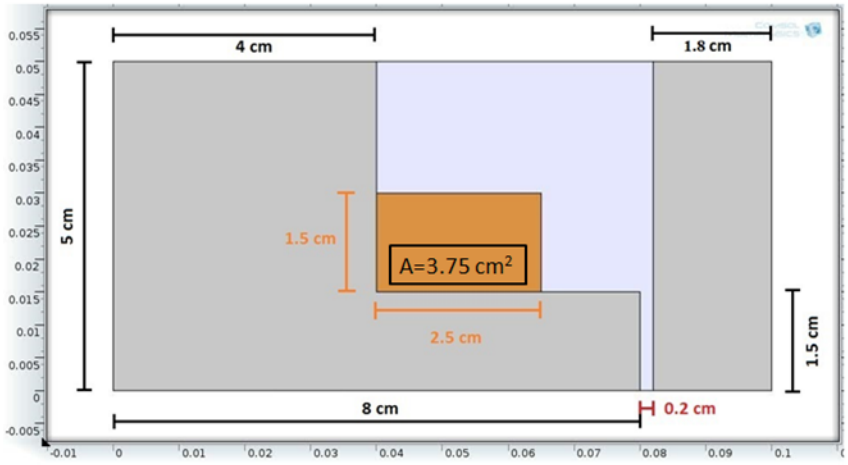


Lo scopo dell'esercizio è quello di valutare l'andamento del campo magnetico generato dal polo magnetico così configurato attraverso il programma COMSOL Multriphysics 4.3.

In un primo momento ci si è concentrati su cosa accade se si cambia il tipo di materiale ferromagnetico, mantenendo la permeabilità costante o utilizzando la curva di **prima magnetizzazione** fornita dal programma.

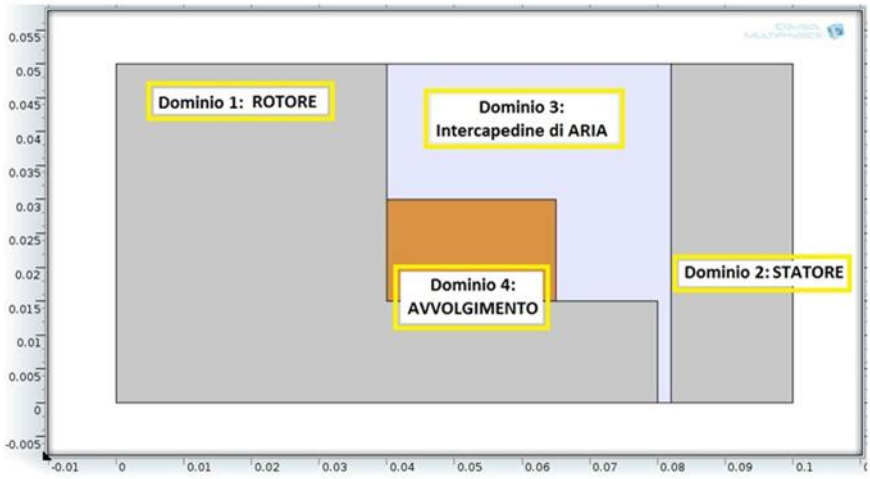
In un secondo momento si è svolta la simulazione della diffusione del campo magnetico all'interno del polo nel tempo, a fronte di uno scalino di corrente.

Dimensioni del polo



A.A. 2012-2013

Materiali



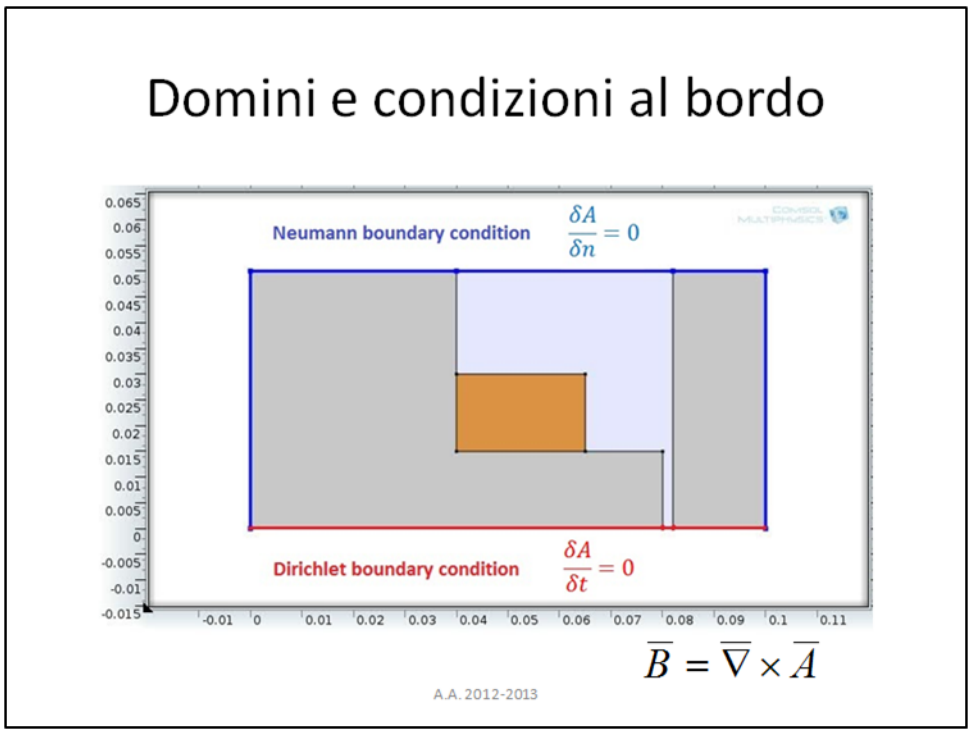
A.A. 2012-2013

Materiali

Domini	Materiale	Permettività relativa	Permeabilità relativa	Conducibilità [S/m]
1, 2	SOFT IRON	1	5000	$1{,}12*10^{7}$
3	AIR	1	1	$3*10^{-15}$
4	COPPER	1	1	$5{,}998*10^{7}$

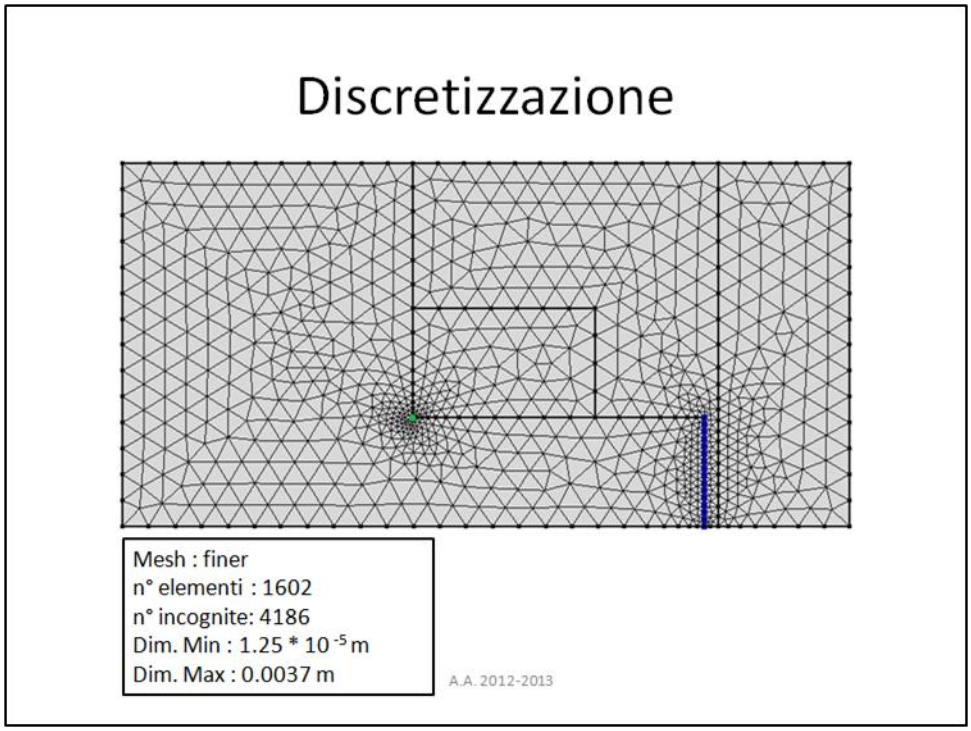
- Il materiale ferromagnetico non è laminato in alcuno dei due domini.
- L'avvolgimento di rame è stato considerato come un unico conduttore massiccio.
- Il rame non è considerato materiale diamagnetico.

A.A. 2012-2013



- Si è imposta una corrente impressa

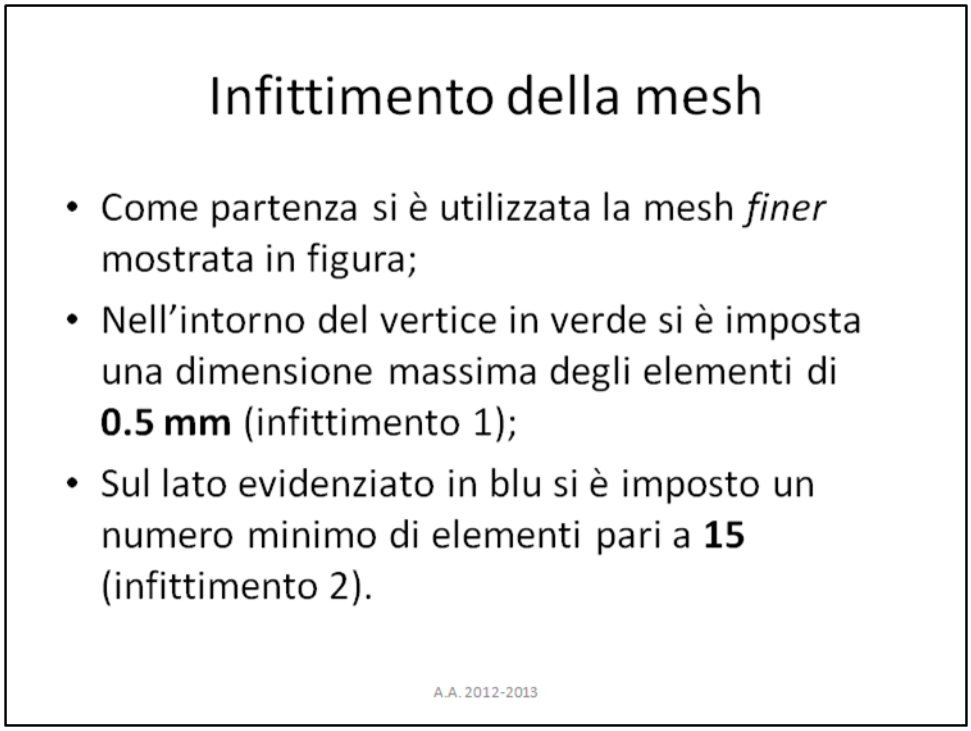
  $J_0 = 2 * 10^6$ A/m^2
- nell'avvolgimento, normale al piano, uniformemente distribuita sulla superficie;
- Si sono imposte le opportune condizioni di Neumann e Dirichlet ai bordi esterni;
- Si sono mantenute le leggi della magnetostatica proposte da Comsol nei domini.



Come partenza si è utilizzata la mesh *finer* mostrata in figura;

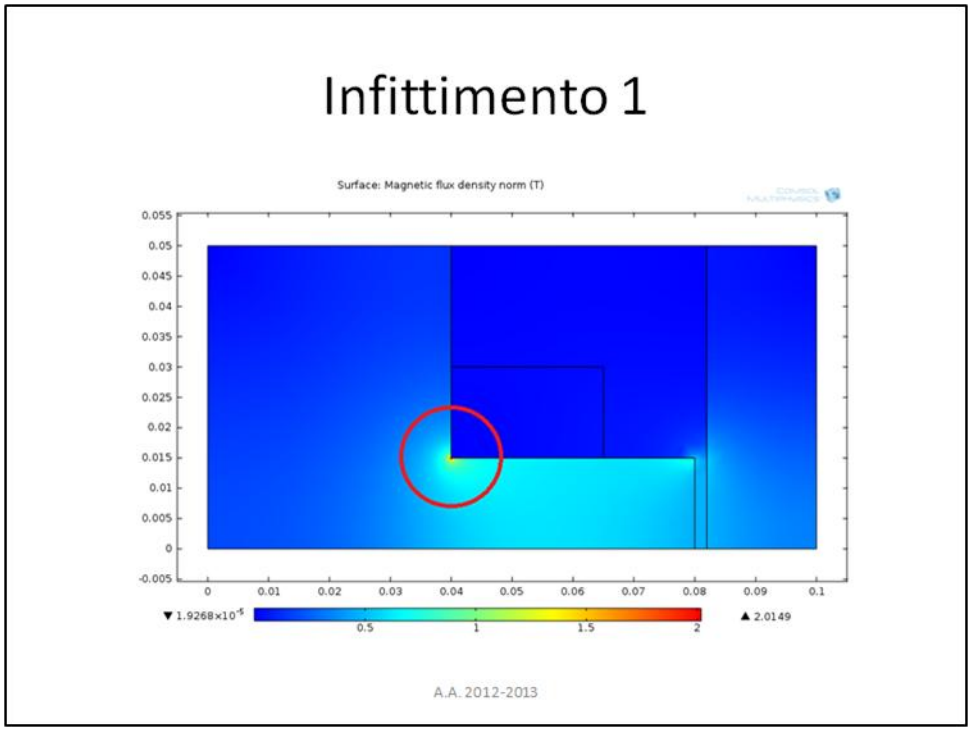
Nell'intorno del vertice in verde si è imposta una dimensione massima degli elementi di **0.5 mm** (infittimento 1);

Sul lato evidenziato in blu si è imposto un numero minimo di elementi pari a **15** (infittimento 2).



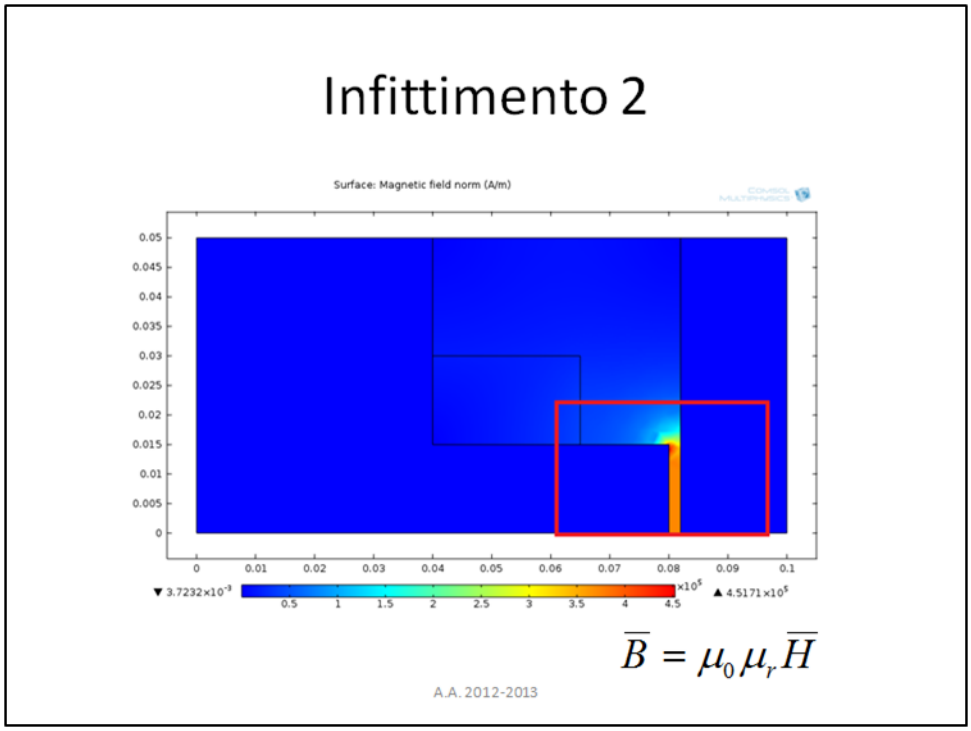
LATO BLU: infittimento scelto per una corretta analisi del campo al traferro; questo è importante in quanto:

- il campo al traferro è uno dei punti di partenza fondamentali per il dimensionamento delle macchine;
- il campo al traferro viene utilizzato anche come parametro per l'analisi del funzionamento della macchina: un campo al traferro troppo alto è indice di una possibile saturazione del materiale ferromagnetico (e quindi di un eventuale danneggiamento dello stesso) e indica la possibilità di dispersione delle linee di campo; un campo al traferro troppo basso, invece, indica che il materiale feromagnetico è sottosfruttato .



Nell'area evidenziata, si ha un'intensità molto elevata della densità di campo magnetico B, le cui linee di campo subiscono in prossimità del bordo attorno al vertice una brusca variazione di direzione.

L'aumento di intensità di B rende necessario un infittimento locale al vertice per evitare evidenti discontinuità tra triangoli adiacenti.



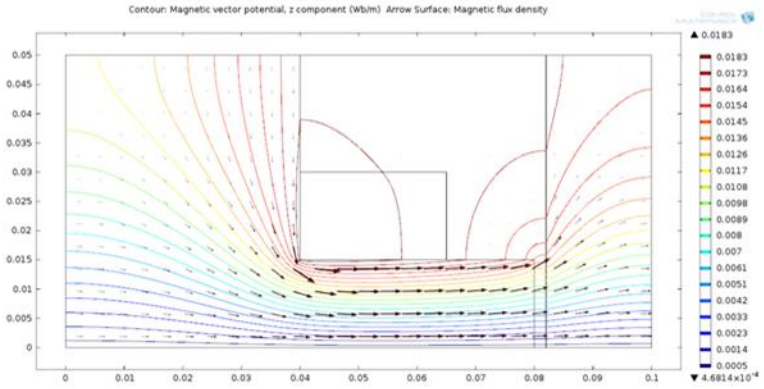
E’ rappresentata la norma del campo magnetico H; il punto di massima intensità è il traferro.

Il campo al traferro è uno dei punti di partenza fondamentali per il dimensionamento delle macchine e viene utilizzato come parametro per l’analisi del funzionamento della macchina:

- un campo al traferro troppo alto è indice di una possibile saturazione del materiale ferromagnetico;
- un campo al traferro troppo basso, invece, indica che il materiale ferromagnetico è sottosfruttato.

CASO LINEARE: Simulazione

- Linee di livello del potenziale vettore magnetico A
- Vettori di campo dell'induzione magnetica B



A.A. 2012-2013

Il materiale ferromagnetico è lineare con permeabilità magnetica μ_r = 5000.

Sono rispettate le condizioni di bordo di Neumann e Dirichlet:

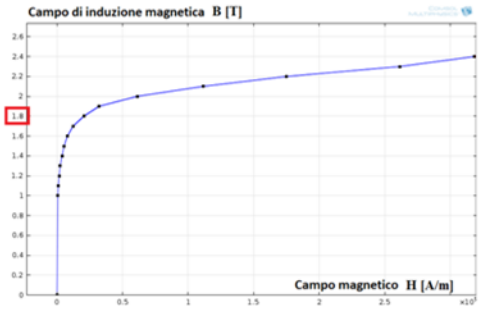
- il valore del potenziale vettore A è costante sul bordo inferiore del dominio (Dirichlet);
- le linee del potenziale vettore A sono ortogonali ai restanti bordi del dominio (Neumann).

Si ha uno sfrangiamento delle linee al traferro.

CASO NON LINEARE

In maniera più realistica, si è imposta la non-linearità del materiale ferromagnetico.
La caratteristica di prima magnetizzazione del materiale ferromagnetico utilizzata è la seguente:

Il ginocchio della caratteristica corrisponde a un valore di induzione magnetica B di circa 1,8 T.

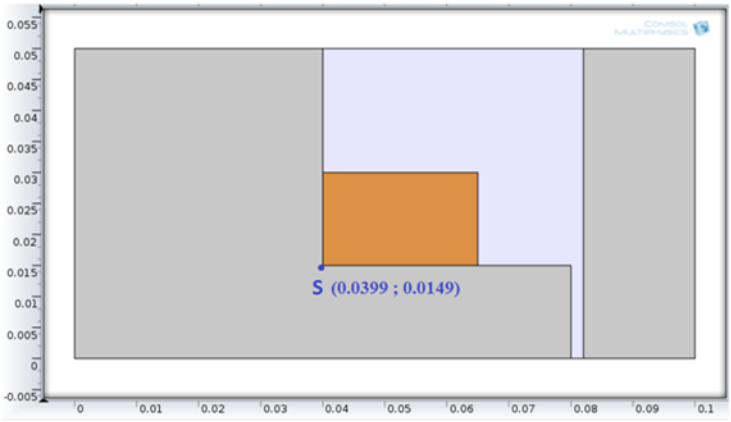


A.A. 2012-2013

Supponendo il materiale ferromagnetico lineare, il campo B raggiunge dei lavori non realistici.

Si è quindi introdotta la non linearità del materiale, descritta dalla caratteristica B-H qui riportata (interpolazione di valori forniti da Comsol).

Punto S di analisi per il confronto tra il caso lineare e il caso non lineare in vicinanza dello spigolo dell'avvolgimento

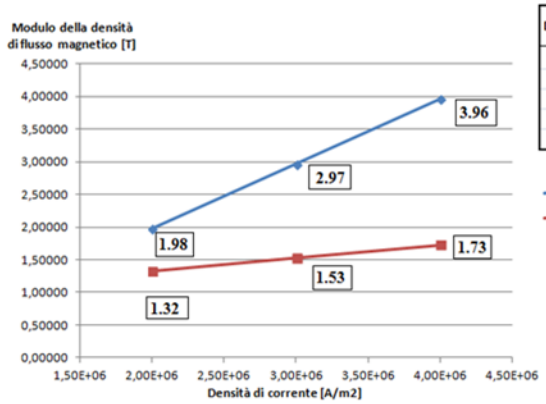


A.A. 2012-2013

Per evidenziare l'effetto della saturazione nel caso non lineare, si è scelto di analizzare l'andamento del valore dell'induzione magnetica in un punto, all'aumentare della densità di corrente nell'avvolgimento J_0, sfruttando la funzione di parametric sweep. Il punto è stato scelto nella zona di massimo addensamento delle linee di campo.

Il punto è posto al di sotto e a sinistra dello spigolo di 0.1 mm.

Confronto tra il caso lineare e il caso non lineare: valori di B [T] al punto S



Densità di corrente J0	B caso lineare	B caso non lineare
[A/m^2]	[T]	[T]
2,00E+06	1,981	1,323
3,00E+06	2,971	1,530
4,00E+06	3,962	1,727

Caso lineare
Caso non lineare

A.A. 2012-2013

Mentre nel caso lineare la crescita di B con J_0 è rappresentata da una retta con pendenza molto elevata, nel caso non lineare l'inclinazione della curva è inferiore e i valori massimi raggiunti sono realistici (al di sotto di 2T).

SIMULAZIONE NEL TEMPO: DIFFUSIONE DEL CAMPO MAGNETICO

- A fronte di una **variazione della forzante**, il campo di induzione magnetica diffonde secondo l'equazione di diffusione:

$$\overline{\nabla}^2 \overline{B} = \mu\sigma \frac{\delta \overline{B}}{\delta t}$$

- Il tempo di diffusione del campo di induzione magnetica è direttamente proporzionale alle caratteristiche del materiale: $\tau \propto \mu\sigma$

A.A. 2012-2013

Abbiamo effettuato un'analisi della diffusione del campo di induzione magnetica all'interno del polo magnetico.

Per diffusione magnetica si intende la propagazione del campo magnetico nella materia a fronte di una variazione della forzante, nel nostro caso la corrente impressa nell'avvolgimento.

Il tempo con cui il campo diffonde è direttamente proporzionale alle caratteristiche del materiale, in particolare alla conducibilità elettrica e alla permeabilità magnetica.

In particolare, l'espressione del tempo di diffusione del campo di induzione magnetica è:

$$\tau = L^2 \cdot \mu\sigma$$

Dove L è la dimensione caratteristica del dominio in analisi.

Materiale	Permeabilità relativa	Conduttività elettrica	Lunghezza caratteristica	Tempo di diffusione
		S/m	m	s
Soft Iron	5000	1.12 * 10^7	0.04	**112.5**
Copper	1	5.998*10^7	0.025	**0.047**

COMSOL 4.3 simula la diffusione magnetica anche nell'aria e richiede, quindi, una conducibilità dell'aria diversa da 0.

A.A. 2012-2013

Abbiamo scelto come lunghezza caratteristica la dimensione massima di ciascun dominio.

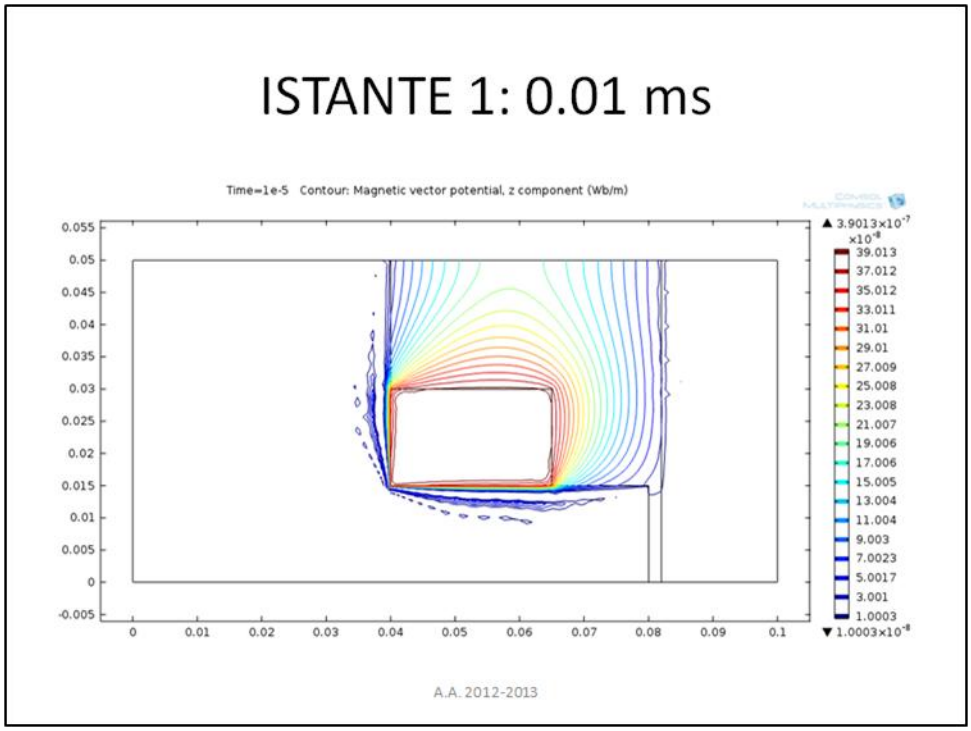
Analisi effettuate

- Gradino di corrente a t = 0 s con densità di corrente $J_0 = 2 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2}$
- Due differenti simulazioni:
  - ***Simulazione 1:*** 0 : 0.01 : 25 s
  - ***Simulazione 2:*** 0 : 10^{-5} : 0.01 s
- Il materiale ferromagnetico è considerato *non lineare*.

A.A. 2012-2013

Si è imposto uno scalino di corrente nell'avvolgimento all'istante t=0 e, attraverso la funzione di analisi time dependent, se ne sono valutati gli effetti in un certo intervallo di tempo; in particolare si è dapprima fatta un analisi generale su un tempo lungo (t=25 s) con un time step di 0.01s per analizzare come il campo si stabilizza nel materiale ferromagnetico, anche se dopo 25 s il transitorio non è ancora del tutto esaurito.

In seguito, per un'analisi più dettagliata degli istanti iniziali della diffusione, si è svolta una seconda simulazione su un intervallo di tempo più breve (0.01s) con un time step di 10^{-5} s.

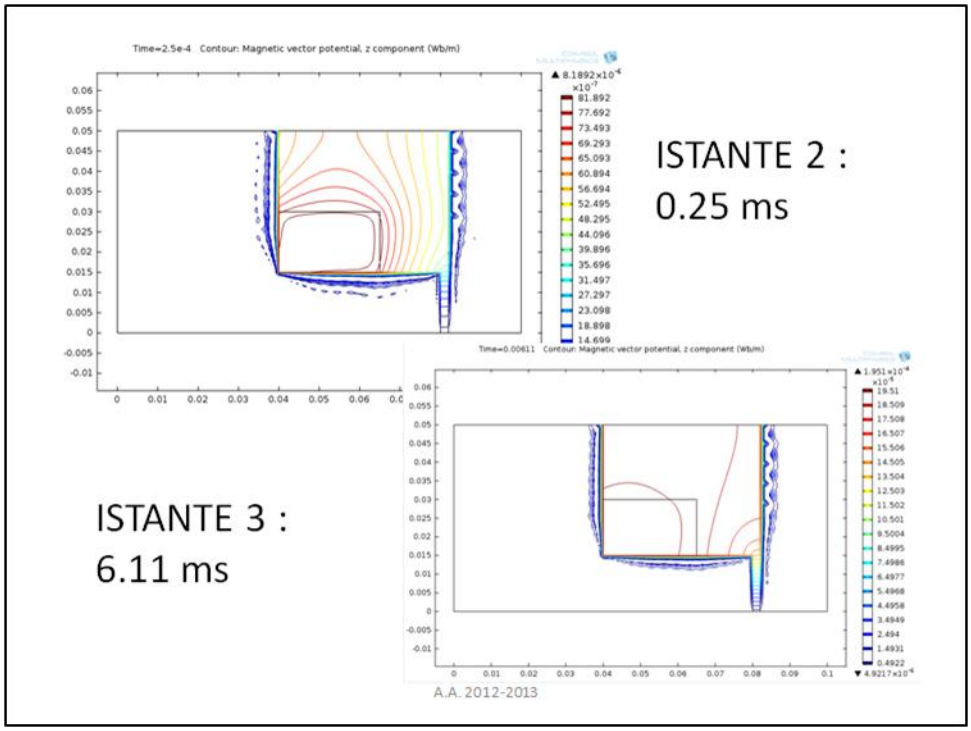


ISTANTE 1:

Il campo magnetico si stabilizza istantaneamente nell'aria, che ha un tempo di diffusione praticamente nullo, mentre non riesce ancora a penetrare negli altri materiali.

Le linee visibili nel materiale ferromagnetico (blu), che non si concatenano con l'avvolgimento, non hanno significato modellistico.

Il campo risulta più intenso nelle vicinanze dell'avvolgimento e il suo andamento rispetta la condizione di Neumann al bordo superiore.



ISTANTE 2:

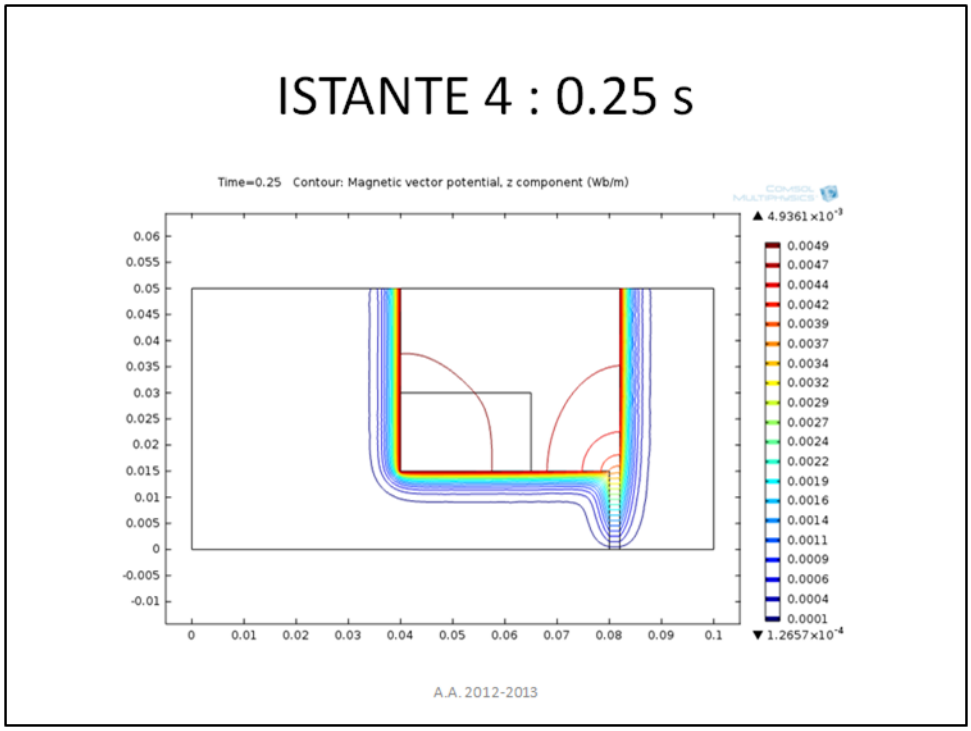
Dopo 0.25 ms, il campo magnetico trova meno resistenza nel diffondere nel materiale conduttore, come si vede dalle linee ad elevata intensità di colore rosso all'interno dell'avvolgimento in rame. Contemporaneamente esso diffonde nello strato di traferro, cominciando ad assumere una configurazione simile a quella definitiva.

ISTANTE 3:

A 6 ms, si vede come il campo al traferro abbia assunto la configurazione finale a linee orizzontali, ortogonali a entrambe le parti di materiale ferromagnetico. Al passare del tempo varierà soltanto l'intensità.

Nel rame si è raggiunta una configurazione **simile** alla finale.

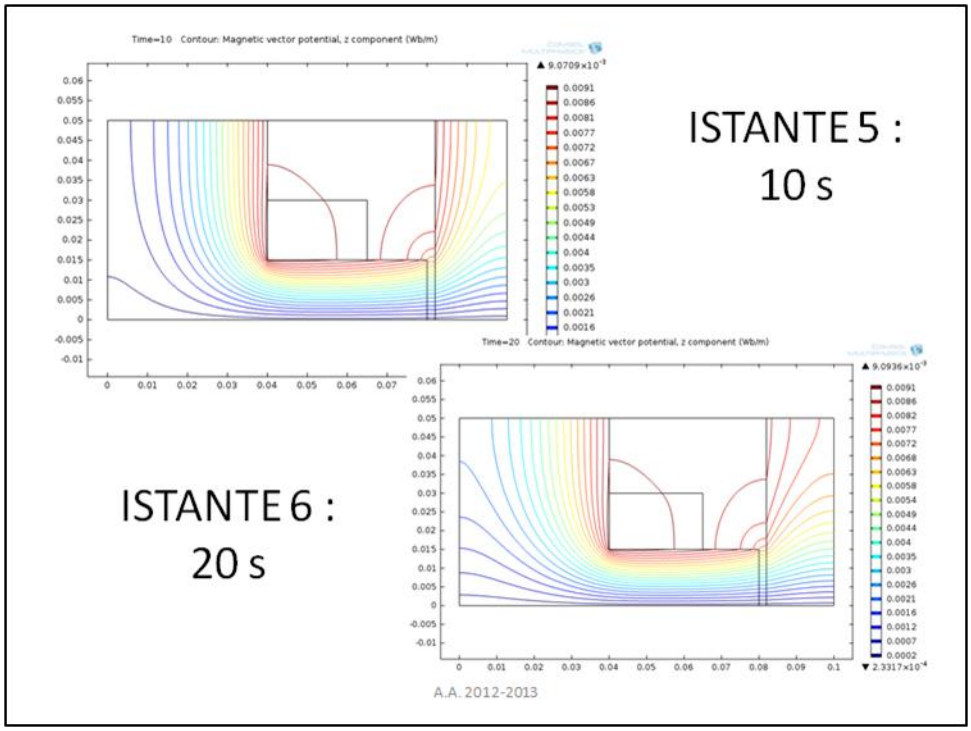
In entrambi questi instanti sono ancora presenti le linee nel materiale ferromagnetico prive di significato.



ISTANTE 4:

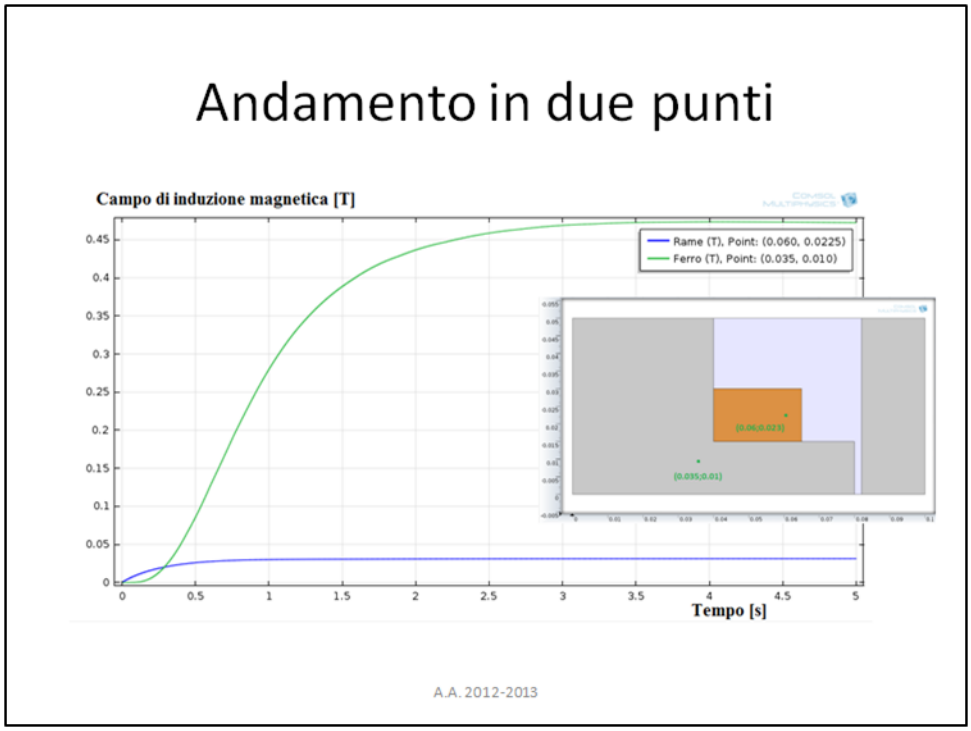
A questo punto della diffusione, il campo magnetico sta penetrando anche nel materiale ferromagnetico. Non ci sono più le linee senza significato modellistico.

Lo strato di materiale ferromagnetico interessato dal campo magnetico è ancora piuttosto sottile (meno di 1 cm), tranne in corrispondenza del traferro, dove la configurazione è dovuta all'effetto dell'intercapedine d'aria.



ISTANTI 5 e 6:

A riprova del fatto che il tempo di diffusione del campo magnetico nel materiale ferromagnetico è molto grande, si mostra come il campo non sia ancora arrivato a regime dopo 10 s dallo scalino. Si vede, infatti, come all'istante 6 (t=20s), posto a 10s di distanza dall'istante 5 (t=1s), la configurazione è cambiata nelle aree laterali di materiale ferromagnetico. Si è verificato che la configurazione continua a modificarsi anche oltre 50 s dallo scalino: infatti il tempo di diffusione stimato per il materiale ferromagnetico è di 112 s.



Abbiamo scelto due punti per valutare l'andamento del campo magnetico nel tempo, uno nel rame e uno nel ferro.

- Il punto nel rame è posto a una distanza di 5 mm dal bordo dell'avvolgimento;
- Il punto nel materiale ferromagnetico è posto a 7 mm in diagonale rispetto allo spigolo dell'avvolgimento.

Abbiamo scelto il punto nel ferro al di sotto dello spigolo per evitare di prendere in considerazione le linee prive di significato modellistico nei primi istanti, che avrebbero falsato la simulazione.

La dinamica del rame è più veloce di quella del ferro.

L'andamento del campo nel materiale ferromagnetico negli istanti iniziali presenta un ritardo, dovuto al fatto che il campo in quel punto non arriva istantaneamente.

Bibliografia:

- Di Barba P., Savini A. e Wiak S., *Field Models in Electricity and Magnetism*, Springer, 2008;
- *Comsol 4.3 User's guide: AC/DC Module*, 2012.