

Materiali ferromagnetici

Vediamo le proprietà magnetiche dei materiali.

Richiamiamo una legge già vista, la legge del legame dei materiali:

$$\underline{B} = \mu \underline{H} = \mu_0 \mu_r \underline{H}$$

↑ PERMEABILITÀ MAGNETICA NEL VUOTO
↓ PERMEABILITÀ RELATIVA

LEGGE DI LEGAME MATERIALI

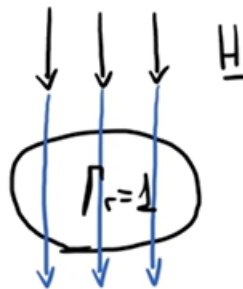
H è il campo magnetico, B è il vettore di induzione magnetica, μ è una costante, quindi l'unico modo per caratterizzare i materiali è in base a μ_r .

- Classificazione in base a μ_r

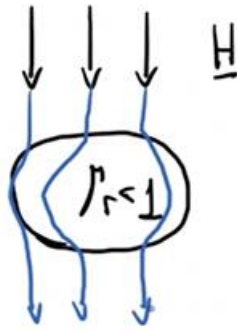
MATERIALI DIAMAGNETICI: $\mu_r < 1$

Vediamo cosa accade quando il materiale ha una permeabilità relativa minore di 1.

Il vuoto ha permeabilità uguale a 1, l'aria pure (circa).



Il materiale non cambia le linee di campo.



Il materiale devia le linee di campo verso l'esterno.

Un altro tipo di materiali sono i materiali paramagnetici.

MATERIALI PARAMAGNETICI: $\mu_r > 1$

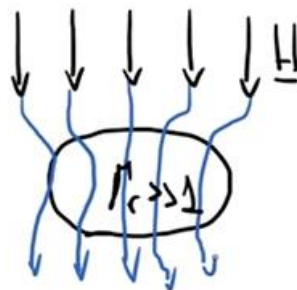
Ma non è tanto maggiore di 1 (2, 3...).

Poi abbiamo i materiali ferromagnetici.

MATERIALI FERROMAGNETICI: $\mu_r \gg 1$ ($10^3 \div 10^5$)

L'acqua è diamagnetica, l'aria è paramagnetica, il ferro è ferromagnetico.

Anche in questo caso il materiale devia le linee di campo, verso l'interno, le canalizza all'interno del materiale.



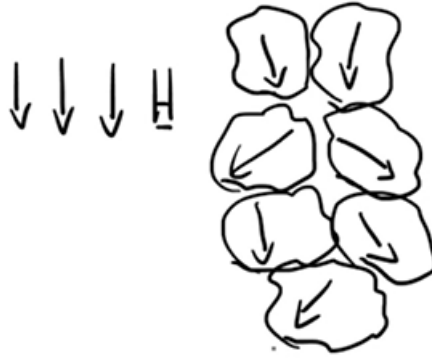
I materiali sono così costituiti.



DOMINI DI WEISS

I domini sono disposti nel materiale in maniera caotica, la magnetizzazione del materiale è nulla, se non si applicano campi magnetici.

Applichiamo il campo magnetico.



Tutti i domini cominciano ad orientarsi.

I DOMINI SI
ORIENTANO PER
EFFETTO DEL CAMPO \underline{H}

Definiamo cos'è una macchina elettrica. Sono due circuiti elettrici accoppiati magneticamente (ad esempio il trasformatore).

Abbiamo una tensione V_1 che va a generare una corrente I_1 . La corrente I_1 genera un campo magnetico H_1 per la legge della circuitazione magnetica.

$$V_1 \rightarrow I_1 \xrightarrow{\oint \underline{H} dl = I} \underline{H}_1$$

Sappiamo che c'è un legame tra H_1 e B , vettore a induzione magnetica.

$$V_1 \rightarrow I_1 \xrightarrow{\oint \underline{H} dl = I} \underline{H}_1 \xrightarrow{\underline{B} = \mu \underline{H}} \underline{B}$$

Se il campo magnetico varia nel tempo, accade che nel secondo circuito si andrà a generare una fem, farà sì di creare una corrente nel circuito secondario I_2 .

$$V_1 \rightarrow I_1 \xrightarrow{\oint \underline{H} dl = I} \underline{H}_1 \xrightarrow{\underline{B} = \mu \underline{H}} \underline{B} \xrightarrow{\frac{\partial \underline{B}}{\partial t} \neq 0} \oint \underline{E} \cdot d\vec{l} \xrightarrow{V_2} I_2$$

Questo è l'accoppiamento magnetico dei circuiti.

Se volessimo massimizzare la fem, quindi la corrente del circuito secondario? Dovremmo o aumentare I_1 (servirebbe più potenza al primo circuito), oppure aumentare B tramite H (stessa cosa di prima), oppure possiamo aumentare μ .

$$\underline{B} = \mu \underline{H} = \mu_0 \mu_r \underline{H}$$

L'unica cosa che possiamo aumentare al fine di aumentare la corrente al secondario senza aumentarla al primario è selezionare il materiale.

$$\underline{B} = \underline{\mu} \underline{H} = \underline{\mu}_0 \underline{\mu_r} \underline{H}$$

↑↑

Per aumentare l'accoppiamento dovremmo avere μ_r molto elevato, quindi nelle macchine elettriche useremo dei materiali ferromagnetici.

$$\underline{B} = \underline{\mu} \underline{H} = \underline{\mu}_0 \underline{\mu_r} \underline{H}$$

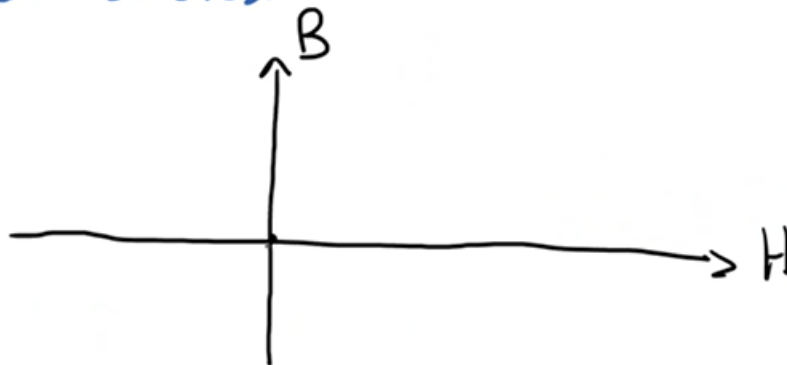
↑↑ \Rightarrow MATERIALI FERROMAGNETICI

μ_r è molto importante, dobbiamo concentrarci sui materiali ferromagnetici.

Da questa relazione sembra che B sia uguale a μ per H , sembra una relazione lineare. Tuttavia nella realtà non è così. Il primo motivo è che con un campo magnetico i domini si orientano, ma quando sono orientati non si può fare molto di più. Nei materiali ferromagnetici abbiamo anche il cosiddetto ciclo di isteresi, la relazione non è lineare.

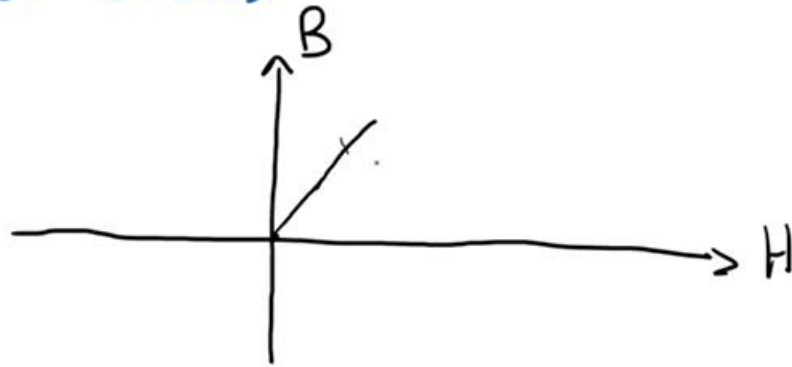
Prendiamo un materiale ferromagnetico vergine, cioè non sottoposto a induzione magnetica.

CICLO DI ISTERESI



Cominciamo ad avere un campo magnetico incidente sul materiale. I domini di Weiss cominciano ad allinearsi.

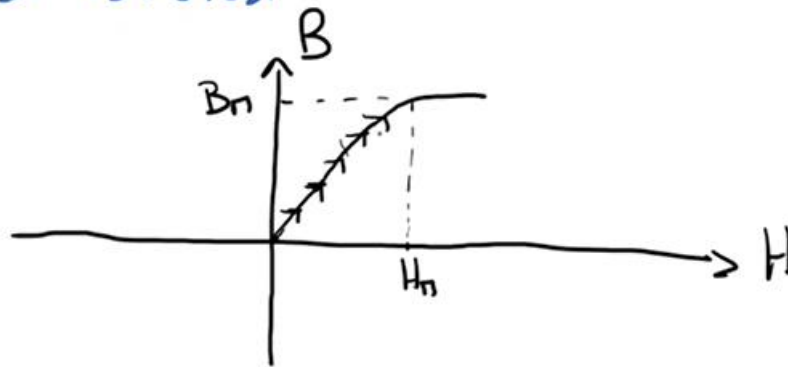
CICLO DI ISTERESI



Saliranno in base alla μ . Quando satura, cioè i domini di Weiss sono tutti orientati, abbiamo questo:

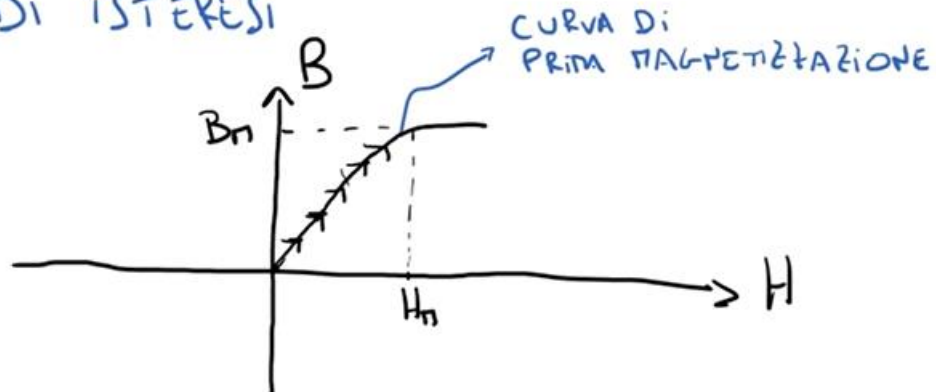
CICLO DI ISTERESI

In



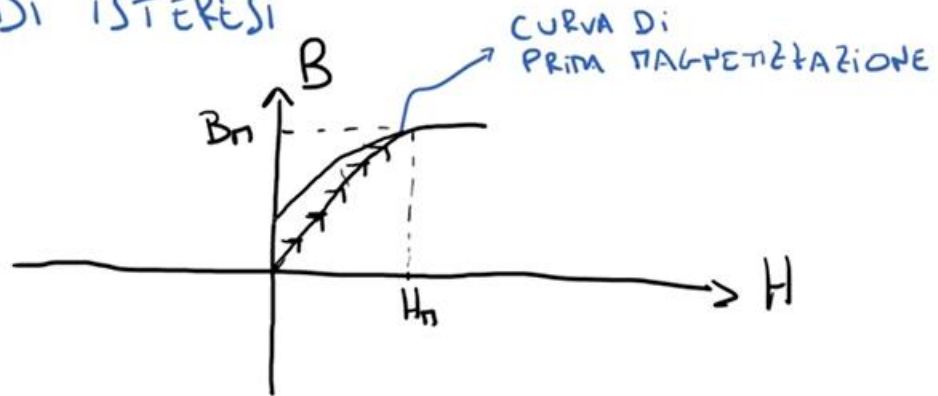
corrispondenza di BM avremo un HM. La curva è detta di prima magnetizzazione.

CICLO DI ISTERESI



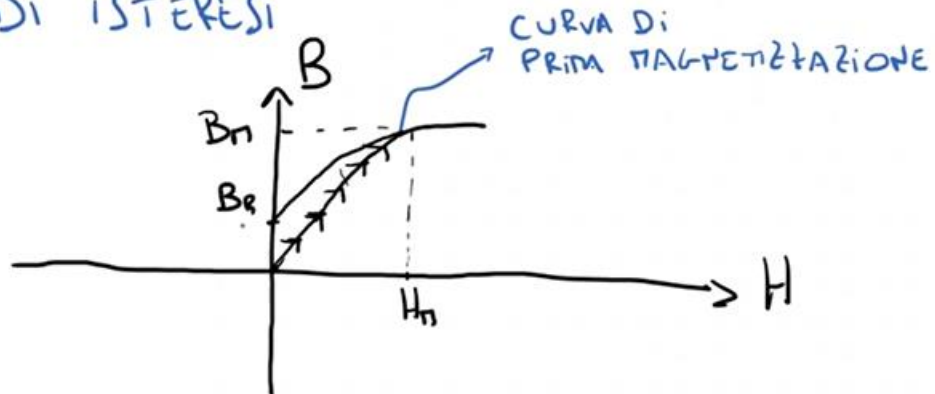
Supponiamo di avere un campo magnetico variabile nel tempo. I domini di Weiss inizieranno a disorientarsi, ma non immediatamente, non riescono a seguire H in maniera decisa.

CICLO DI ISTERESI



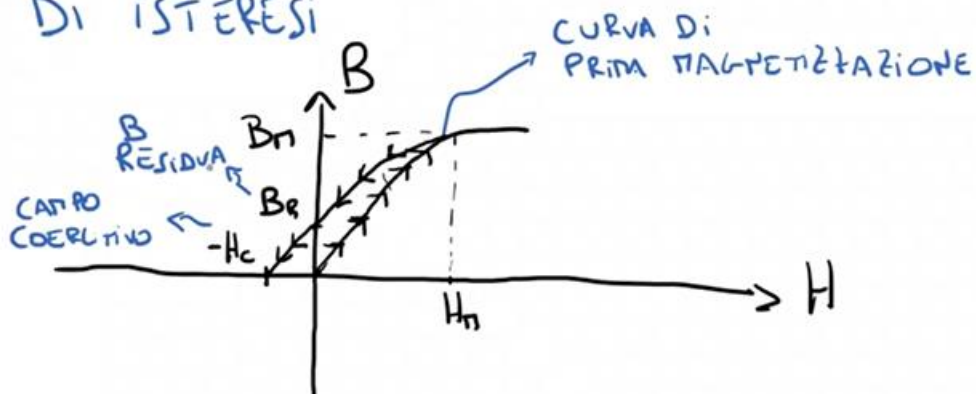
Accade che quando abbassiamo H , ancora c'è dell'induzione magnetica, l'induzione magnetica residua B_R .

CICLO DI ISTERESI



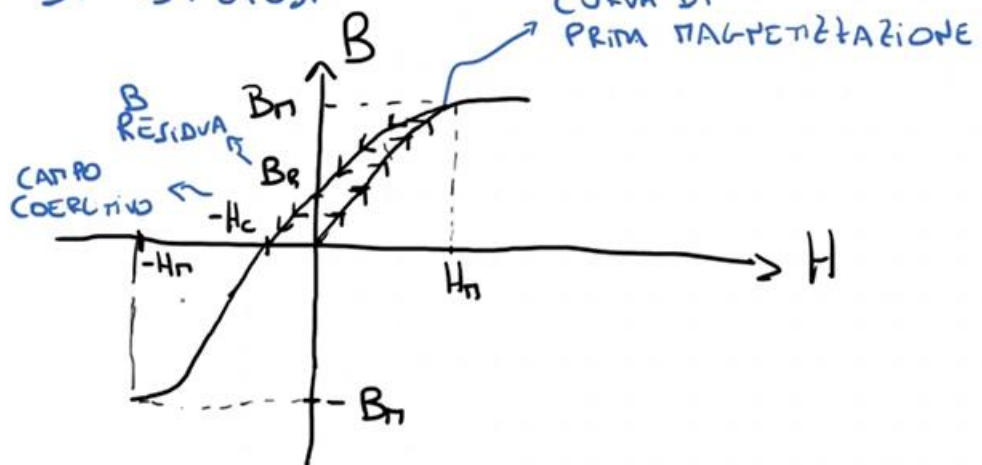
Mettiamo caso che volessimo annullare B_R , dovremmo applicare un campo magnetico negativo.

CICLO DI ISTERESI



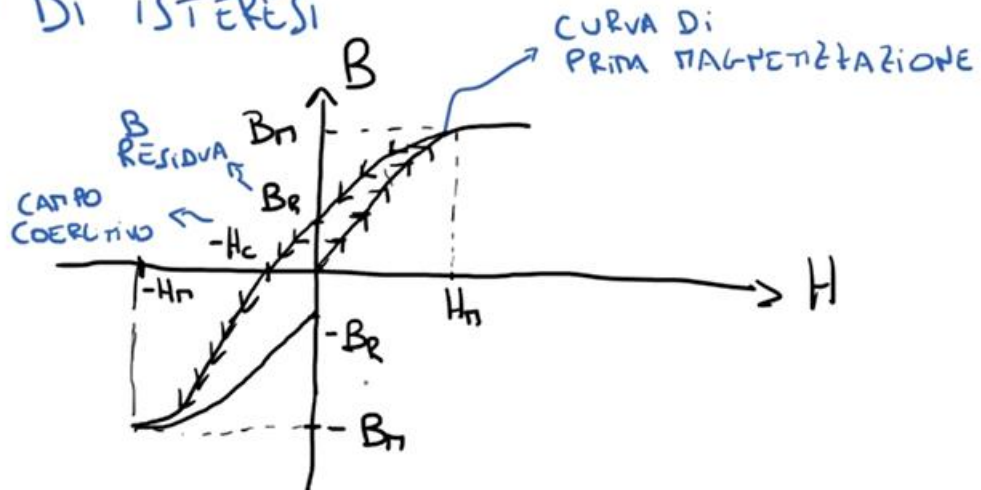
Il campo coercitivo è il campo magnetico da applicare per annullare l'induzione magnetica. Poi continuiamo a diminuire H fino a una saturazione negativa.

CICLO DI ISTERESI



Aumentiamo di nuovo H .

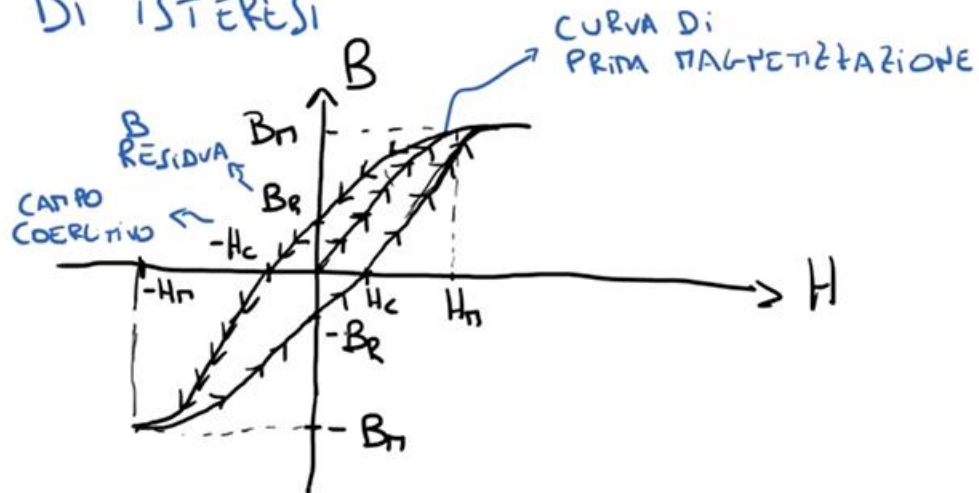
CICLO DI ISTERESI



Avremo di nuovo una induzione residuale.

Se continuiamo ad aumentare, torneremo alla saturazione.

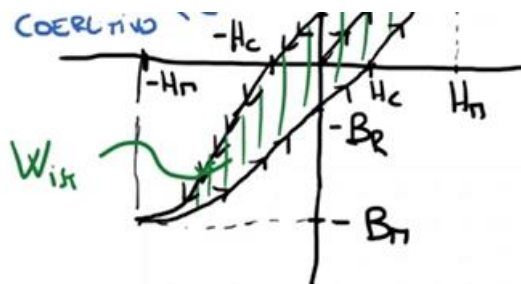
CICLO DI ISTERESI



Questo è un ciclo di isteresi.

PRIMA DELLA SATURAZIONE: $\Gamma_r \gg 1$

IN SATURAZIONE: $\Gamma_r = 1$



W_{ist} : area del ciclo di isteresi

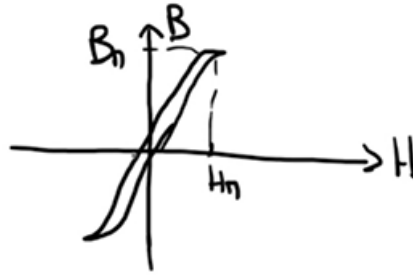
W_{ist} rappresenta l'energia dissipata in un ciclo di isteresi per effetto Joule. Significa che quando compiamo un intero ciclo di isteresi, i domini di Weiss si orientano, orientandosi vanno a contatto l'uno con l'altro e creano calore, energia dissipata.

$P_{ist} = \oint W_{ist}$: potenza specifica dissipata per
effetto Joule $[W/m^3]$

Possiamo fare un'altra classificazione dei materiali, in base al ciclo di isteresi.

Abbiamo diversi parametri che caratterizzano il ciclo di isteresi. Possiamo avere materiali ferromagnetici dolci o forti.

Materiali dolci:



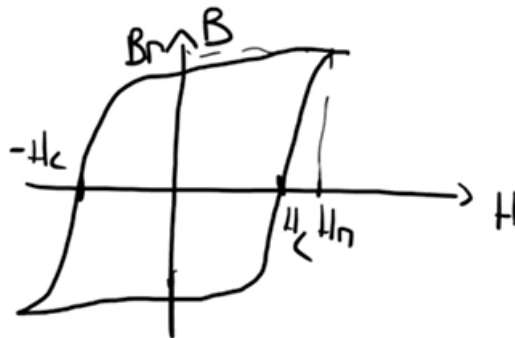
$W_{ir} \downarrow \downarrow$

$\Gamma_r \uparrow \uparrow$

$B_m \uparrow$

$H_c \downarrow \downarrow$

Materiali forti:



$W_{ir} \uparrow \uparrow$

$B_e \uparrow \uparrow$

$H_c \uparrow \uparrow$

Vediamo dove si possono usare questi 2 materiali. Per i materiali dolci, la mur è molto alta, una caratteristica che cercavamo per le macchine piccole. Poi l'area di isteresi è piccola, quindi abbiamo perdite di potenza piccola e le macchine elettriche fanno tanti cicli di isteresi.

Si usano per le
macchine elettriche

Vediamo che i materiali forti hanno H_m e H_c alte. Una volta che ho magnetizzato il materiale, il materiale conserva la magnetizzazione. Questi materiali vengono usati per i magneti permanenti.

Si usano per i
magneti permanenti

Avere H_c alto significa che il magnete permanente non si smagnetizza.

Circuiti magnetici

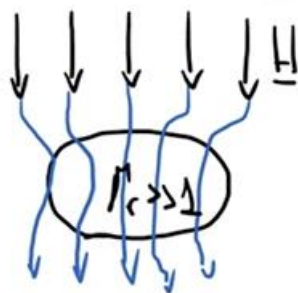
Supponiamo di avere una spira di corrente.



Sappiamo che la corrente che attraversa il conduttore genera un campo magnetico. Il vettore B è solenoidale.



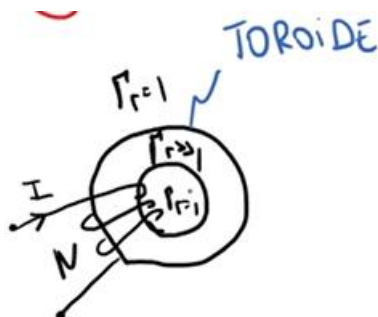
Pensiamo invece a cosa accade se mettiamo un materiale ferromagnetico. Il materiale convoglierà le linee di campo all'interno del materiale.



Quindi:

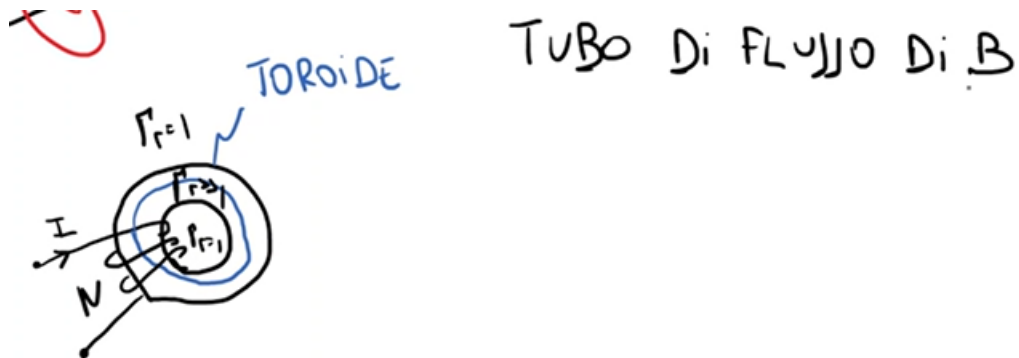


Il toroide è un anello di materiale ferromagnetico.
Introduciamo delle spire.

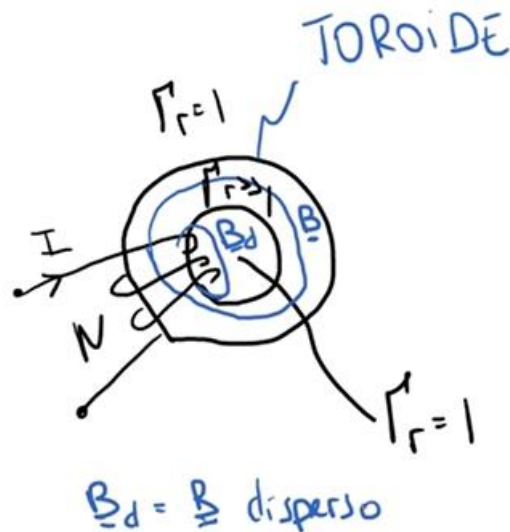


Accadrà che il materiale andrà a convogliare le linee di campo generate dal materiale nel materiale.

In realtà possiamo introdurre un concetto, il tubo di flusso, che rimane confinato nel materiale.



Le linee di campo vengono confinate nel materiale B.



Quali sono i problemi di questo circuito magnetico? In realtà possiamo creare il campo magnetico B in maniera diversa da come stiamo facendo.

Il materiale tende a saturare.

Sappiamo che:

$$l_c = I \cdot N \rightarrow \text{NUMERO DI SPIRE}$$

PROBLEMA: il materiale
satura

Inoltre:

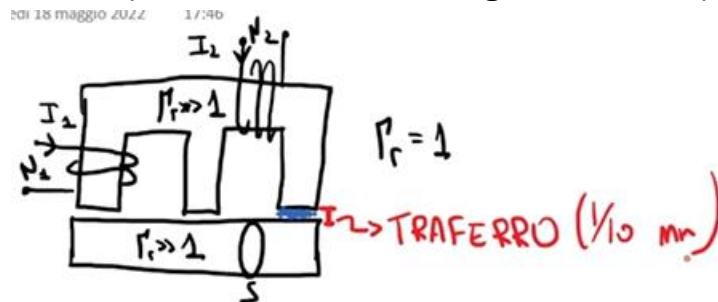
$$N_c \text{ circuiti elettrici: } \frac{\sigma_{\text{CONDUTTORE}}}{\sigma_{\text{ISOLANTE}}} = 10^{20}$$

$$N_c \text{ circuiti magnetici: } \frac{\mu_{r, \text{FERRO.}}}{\mu_{r, \text{Aria}}} = 10^3 \div 10^5$$

Per questo motivo dobbiamo considerare una B dispersa, mentre invece nei circuiti elettrici potevamo considerare che tutta la corrente scorresse nel circuito, abbiamo 15 ordini di grandezza in meno.



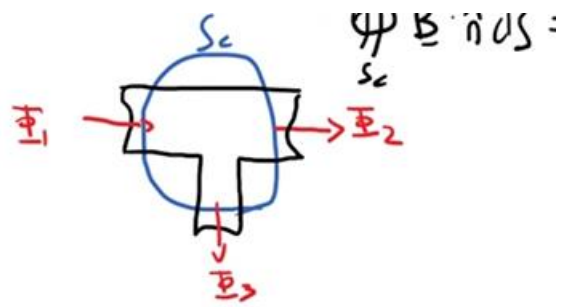
Potremmo avere, attorno a questo materiale ferromagnetico, delle spire.



Il traferro è molto piccolo (decimi di millimetri).

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = 0 \rightarrow \mathbf{H} \text{ è conservativo}$$

MAGNETICA



$$R_3' = R_3 - \text{evvolgimenti}$$

ANALOGIA

$$\underline{H} = -\nabla \Psi_m \quad \longleftrightarrow \quad (\underline{E} = -\nabla V)$$

POTENTIALS
MAGNETICO

$$\boxed{\sum_{k=1}^n \Psi_k = 0} \quad \text{LKT MAGNETICA}$$

Possiamo ancora usare le LKC e le LKT.

Circuiti magnetici a parametri concentrati



$$\oint \underline{H} \cdot d\underline{\ell} = I_c = NI$$

$$\iint_S \underline{B} \cdot d\underline{S} = \Phi = \underline{B} \iint_S d\underline{S} = \underline{B} S \rightarrow \underline{B} = \frac{\Phi}{S}$$

$$\underline{B} = \mu \underline{H} \rightarrow \underline{H} = \frac{\underline{B}}{\mu} \rightarrow \oint \frac{\underline{B}}{\mu} d\underline{\ell} = NI \rightarrow$$

$$\rightarrow \oint \frac{\Phi}{\mu S} d\underline{\ell} = NI \rightarrow \frac{\Phi}{\mu S} \oint d\underline{\ell} = NI$$

$$\rightarrow \frac{\Phi}{\mu S} L = NI \rightarrow \frac{L}{\mu S} \Phi = NI$$

Soffermiamoci su questo.

$$\rightarrow \frac{\Phi}{\mu S} L = NI \rightarrow \underbrace{\frac{L}{\mu S}}_R \Phi = NI$$

$$R = \frac{L}{\mu S} [\text{H}^{-1}] \quad \text{RILUTANZA}$$

C'è una certa analogia con la resistenza.

$$R = \frac{L}{\mu S} [\Omega] \quad \text{RESISTENZA}$$

$$NI = [\text{Amperes} \cdot \text{n}^\circ \text{spire}] = \overset{\text{AMPERESPIRE}}{[A_{sp}]} \quad \begin{array}{l} \text{FORZA MAGNETICA} \\ \text{POTRICE} \\ (\text{mm}) \end{array}$$

Nel caso elettrico avevamo la forza elettromotrice, nel caso magnetico abbiamo la forza magnetomotrice.

Si può riscrivere quello che abbiamo detto come:

$$\boxed{NI = R \Phi} \quad \text{LEGGE DI OHM MAGNETICA (HOPKINSON)}$$

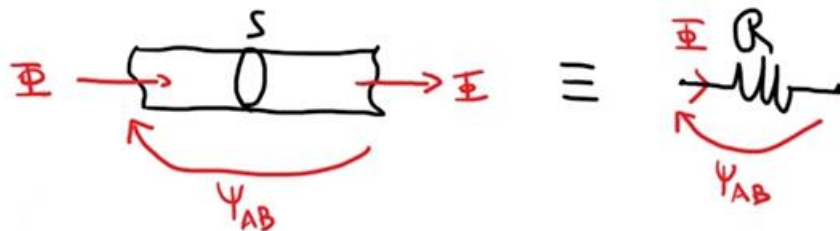
PARAMETRI CONCENTRATI

TRATTO DI MATERIALE FERROMAGNETICO



Per ora non consideriamo il flusso disperso.

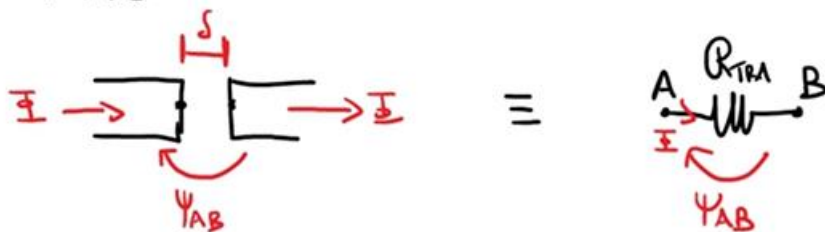
TRATTO DI MATERIALE FERROMAGNETICO



$$R_k = \frac{L}{\mu_0 \mu_r S} \quad [H^{-1}]$$

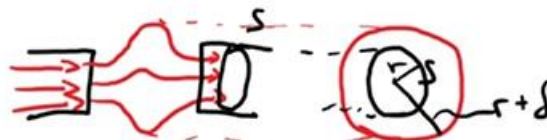
Vediamo come possiamo rappresentare il traferro.

TRAFERRO

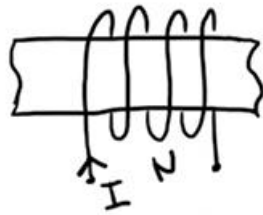


$$R_{TRA} = \frac{d}{\mu_0 \cdot S} \quad [H^{-1}]$$

Tuttavia, questo non è del tutto vero, è un'approssimazione.

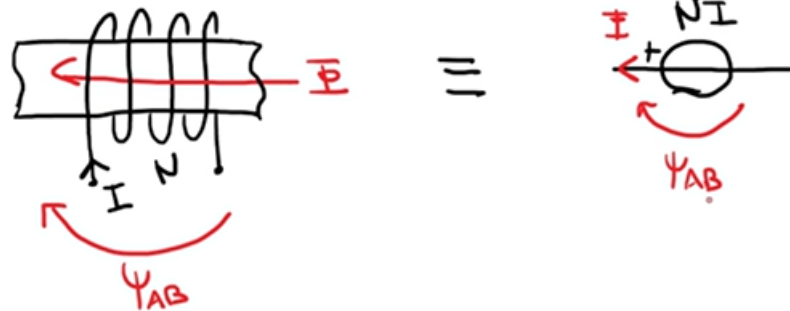


ANVOLLIPETO



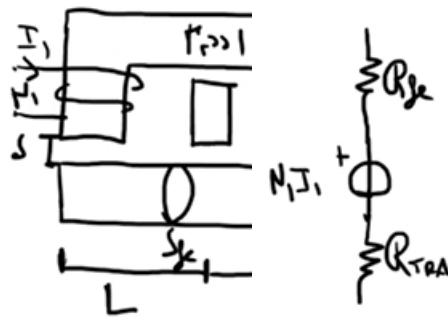
Per capire la direzione del flusso, dobbiamo seguire la regola della mano destra.

ANVOLLIPETO



Dato un circuito magnetico, riusciamo tramite i parametri concentrati, a riscriverlo come se fosse un circuito elettrico.

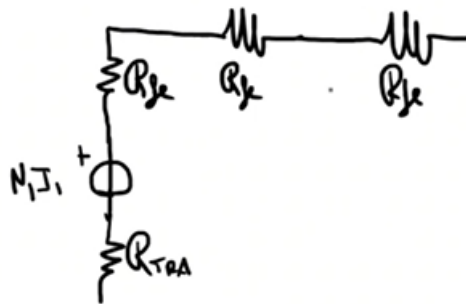
Esempio



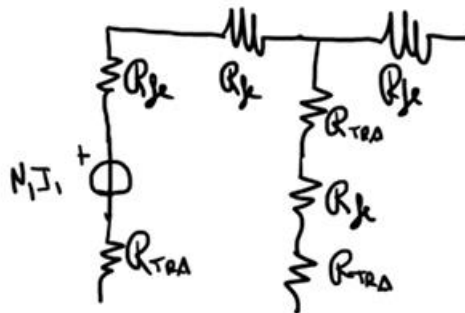
Calcolare i flussi nelle
colonne verticali.

$$\begin{aligned} L &= 10 \text{ cm} \\ \delta &= 1 \text{ mm} \\ \mu_{\text{ferro}} &= 3000 \\ S_k &= 300 \text{ cm}^2 \\ N_1 &= 100 \\ I_1 &= 2 \text{ A} \\ N_2 &= 200 \\ I_2 &= 3 \text{ A} \end{aligned}$$

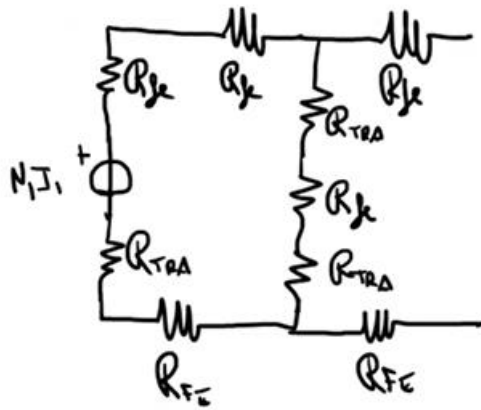
Poi avremmo due pezzi di lunghezza L .



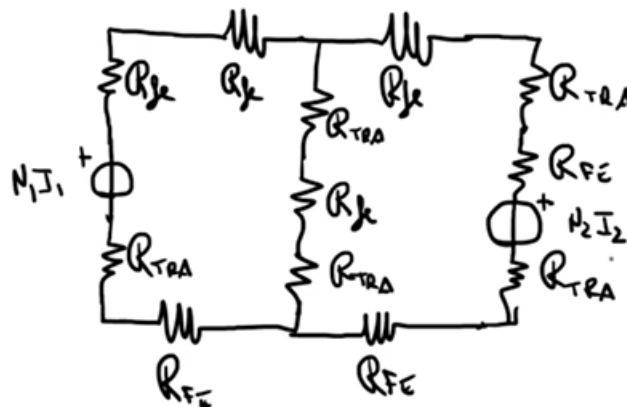
Nella colonna centrale avremo due traferri e una riluttanza.



Nella colonna orizzontale avremo due riluttanze.



Nell'ultima colonna, avremo il generatore.



Adesso bisogna calcolare le grandezze.

$$R_{Fe} = \frac{L}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} = \frac{\overbrace{0.1}^L}{\underbrace{1,256 \cdot 10^{-6}}_{\mu_0} \cdot \underbrace{3000}_{\mu_r} \cdot \underbrace{300 \cdot 10^{-4}}_S} = 885 \text{ H}^{-1}$$

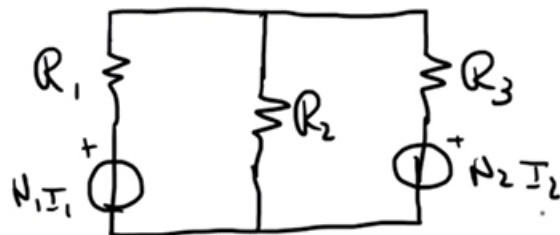
Calcoliamo la riluttanza al traferro.

$$R_{TRA} = \frac{S}{\mu_0 \cdot l \cdot S} = \frac{10^{-3}}{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 300 \cdot 10^{-4}} = 26539 \text{ H}^{-1}$$

$$I_{mm 1} = N_1 I_1 = 200 \text{ A}_{sp}$$

$$I_{mm 2} = N_2 I_2 = 600 \text{ A}_{sp}$$

Possiamo semplificare le riluttanze.

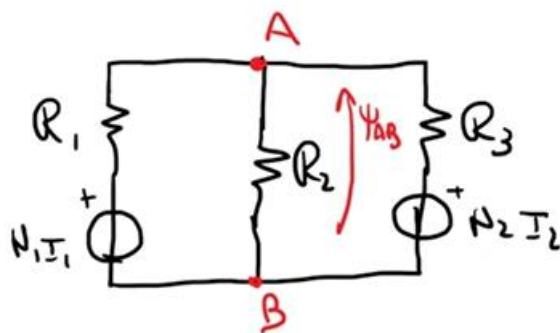


$$R_1 = 29194 \text{ H}^{-1}$$

$$R_2 = 53963 \text{ H}^{-1}$$

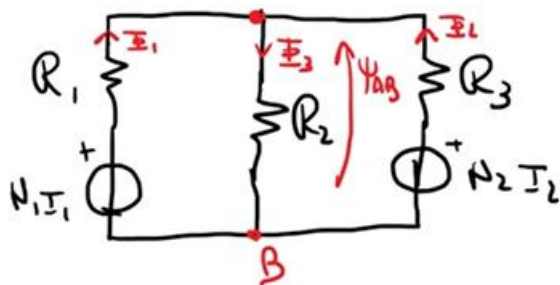
$$R_3 = 55733 \text{ H}^{-1}$$

Possiamo calcolarci ψ_{AB} con Millman.



$$\psi_{AB} = \frac{N_1 I_1 / R_1 + N_2 I_2 / R_3}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3}$$

Da qui, si può vedere come calcolare i flussi.



$$\Phi_1 = \frac{N_1 I_1 - \psi_{AB}}{R_1}$$

$$\Phi_2 = \frac{N_2 I_2 - \psi_{AB}}{R_2}$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\Psi_{AB}}{\mathcal{R}_1}$$

Possiamo verificare che tutto torni con la LKC.

$$LKC: \quad \underline{\Phi}_1 + \underline{\Phi}_2 = \underline{\Phi}_3$$

Perché la LKT e la LKC continuano a valere.

Se abbiamo un circuito magnetico, possiamo ricavare i parametri concentrati del circuito magneti e risolverlo con gli strumenti che abbiamo già studiato, flussi e potenziali magnetici al proprio interno.