

# IL MAGNETISMO - Prima Parte

Magneti naturali, Campo magnetico, Isteresi magnetica e Circuiti magnetici

**Lezione 1**

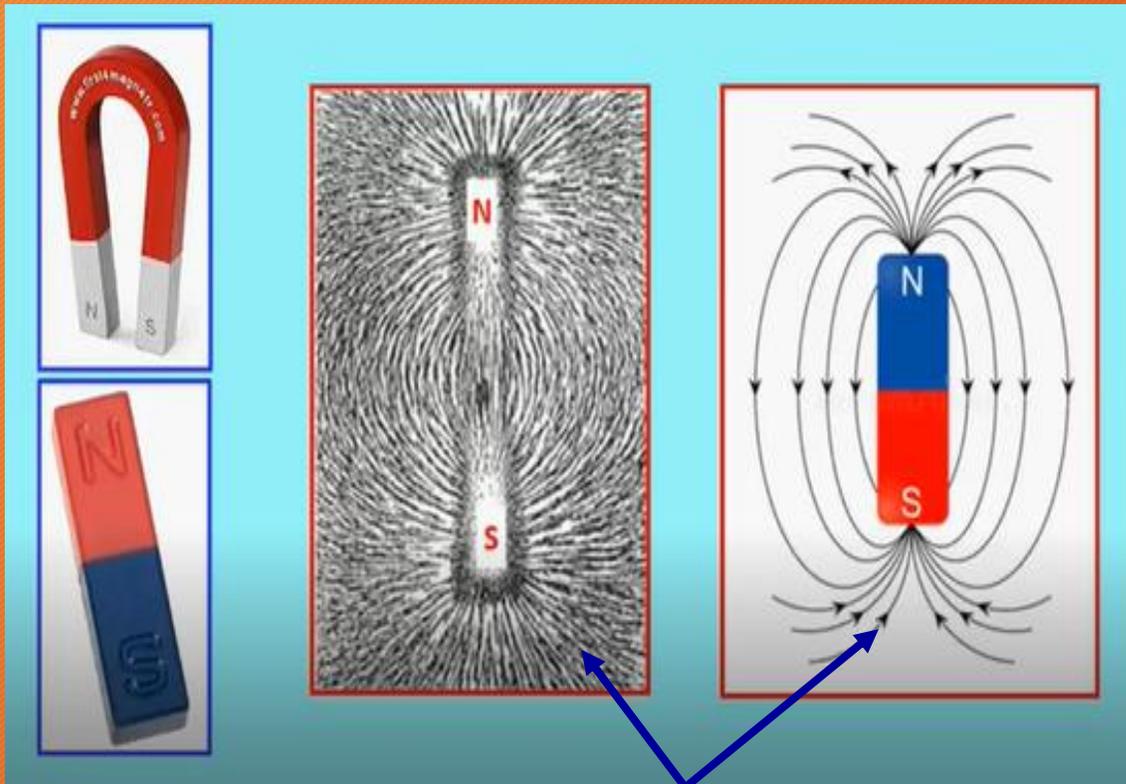
**Lezione 2**

**Lezione 3**

**Lezione 4**

# Magneti naturali (calamite)

2

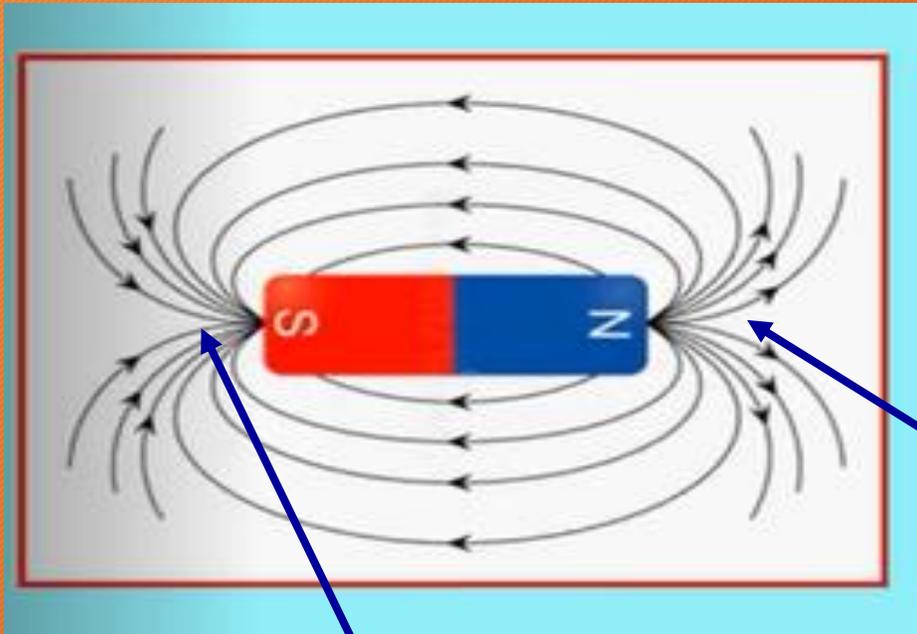


LINEE DI FORZA

- Esiste in natura un minerale del ferro detto **MAGNETITE** che ha la proprietà di attirare i materiali ferrosi.
- Questo minerale è chiamato comunemente **CALAMITA**.
- Intorno alla magnetite si ha quindi una regione di spazio detto **CAMPO MAGNETICO** in cui i materiali ferrosi sono attratti e questa attrazione avviene lungo delle «strade» dette **LINEE DI FORZA** che possono essere viste spargendo della limatura di ferro intorno alla magnetite.

# Magneti naturali (calamite)

3



- Le estremità della calamita vengono dette POLO NORD (**N**) e POLO SUD (**S**).

Perché questa denominazione ? →

- Le LINEE DI FORZA «escono» dal POLO NORD e «rientrano» dal POLO SUD.

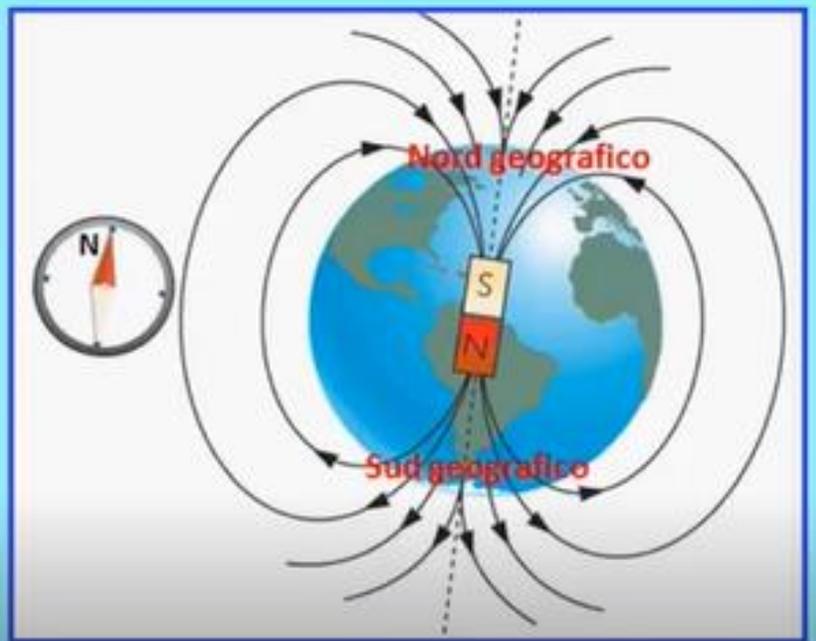
LINEE DI FORZA «escono» dal POLO NORD

LINEE DI FORZA «rientrano» dal POLO SUD

# Magneti naturali (calamite)

4

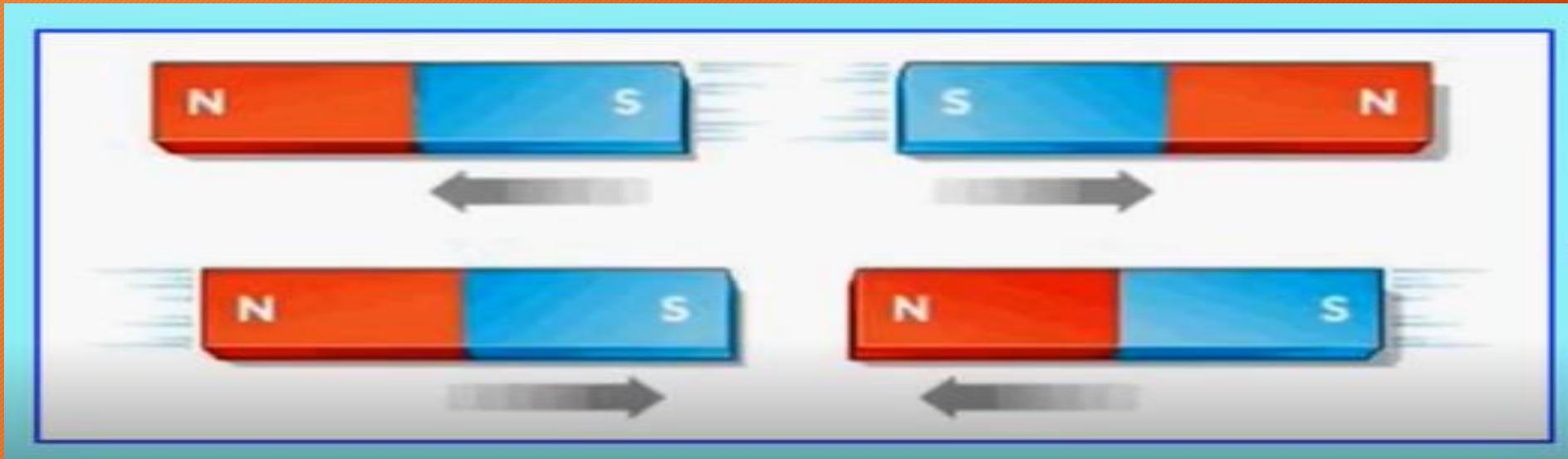
Perché questa denominazione ? →



- Se sospendiamo una calamita ad un filo la calamità si dispone in modo da orientarsi con il suo polo N verso il Sud geografico e con il suo polo S verso il Nord geografico.
- La terra quindi si comporta come un grosso magnete con i suoi due poli.

# Magneti naturali (calamite)

5



- Poli magnetici dello stesso segno si respingono.
- Poli magnetici di segno opposto si attraggono.

# Magneti naturali (calamite)

6

PER "MAGNETE DI PROVA" SI INTENDE UN AGO MAGNETICO (COME QUELLO DELLA BUSSOLA), OSSIA UNA PICCOLA CALAMITA, DI FORMA STRETTA E ALLUNGATA, CHE PUÒ RUOTARE INTORNO A UN PERNO CENTRALE; ESSO È PROVVISORIO, COME TUTTI I MAGNETI, DI DUE POLI MAGNETICI NORD(N) E SUD(S).



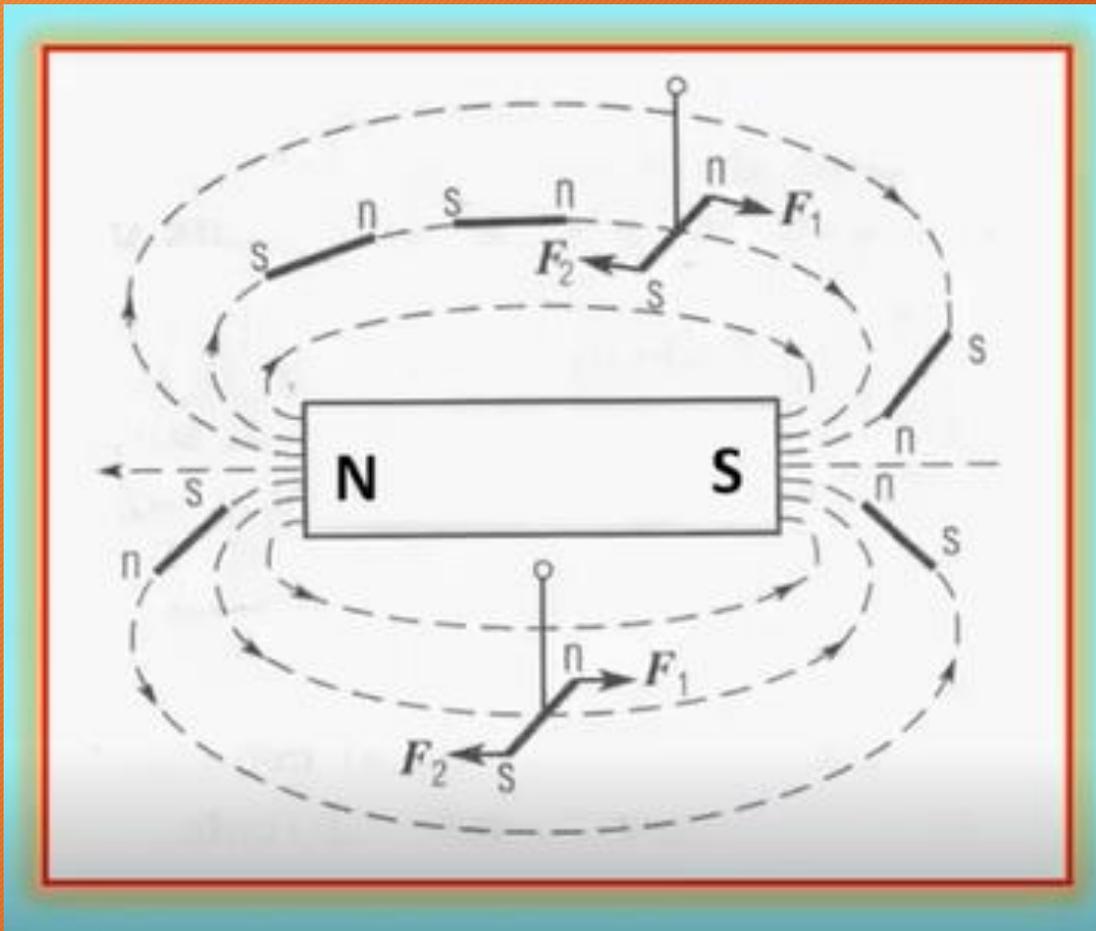
## MAGNETI DI PROVA

Sono utilizzati per verificare la presenza di un CAMPO MAGNETICO

Infatti se il magnete di prova è soggetto a forze del campo esso ruoterà disponendosi in modo tangente alle linee di forza

# Magneti naturali (calamite)

7

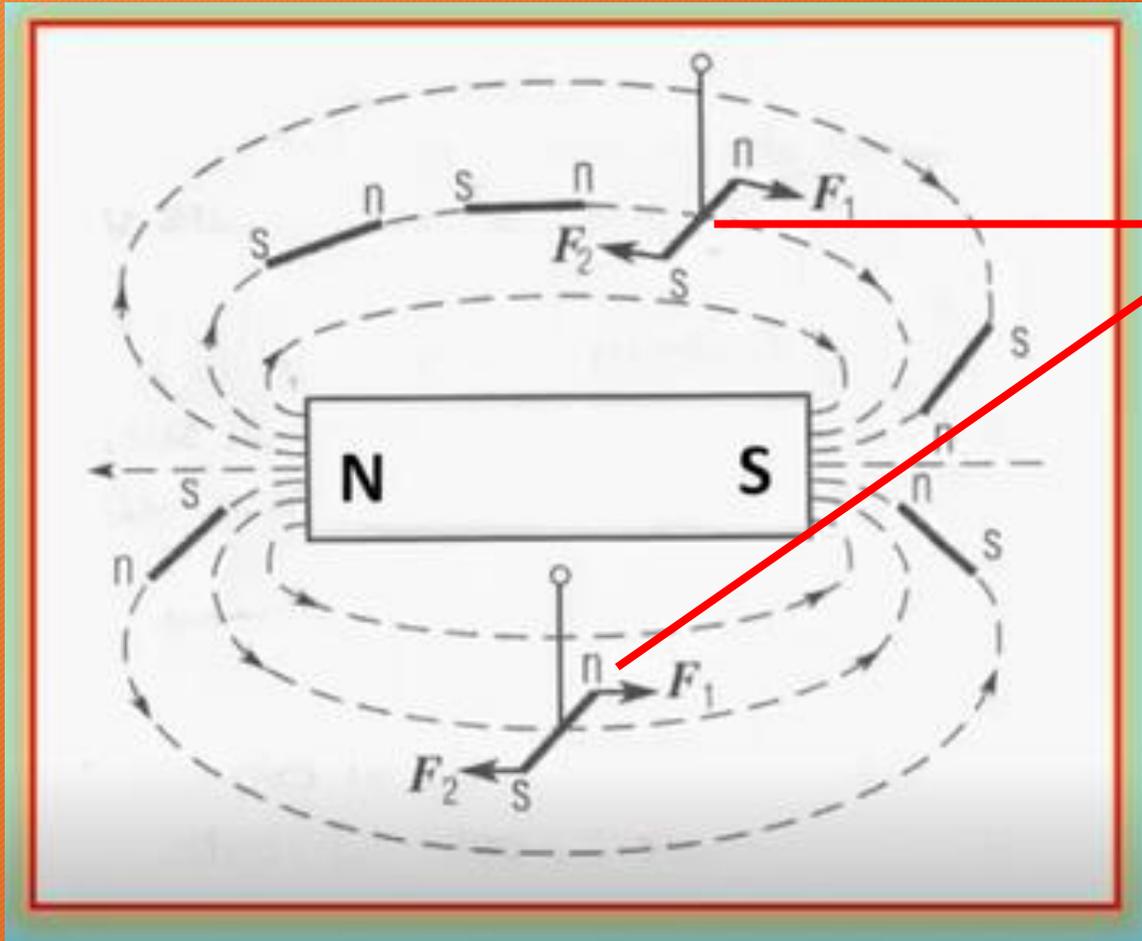


Nella figura le linee in grassetto sono dei MAGNETI DI PROVA liberi quindi di ruotare.

La calamita, che genera il CAMPO MAGNETICO, farà ruotare i magneti di prova orientandoli lungo le linee di forza in modo che i loro poli **s** siano diretto verso il polo **N** della calamità e viceversa i loro poli **n** siano orientati verso il polo **S** della calamita.

# Magneti naturali (calamite)

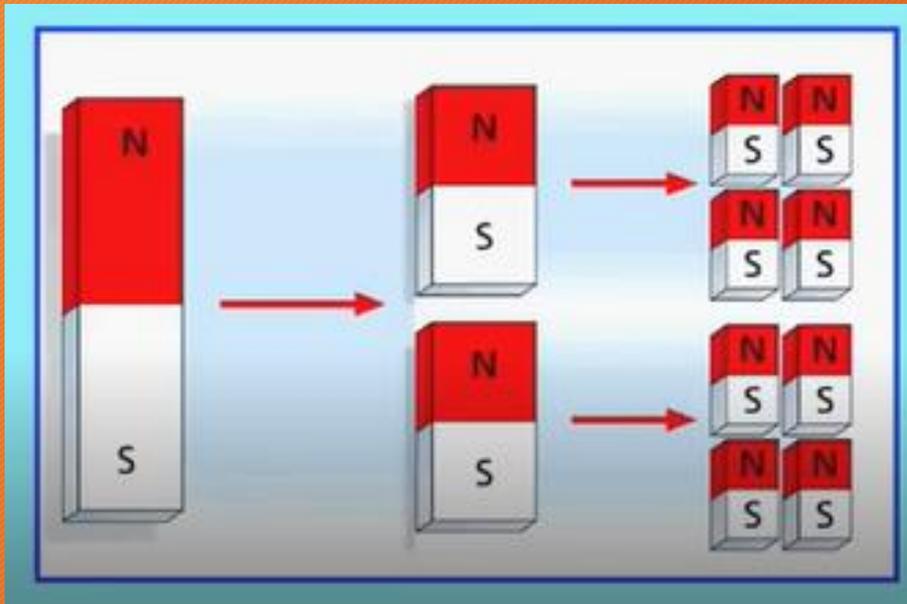
8



Ogni magnetino di prova è soggetto, come si vede in figura, a due forze ( $F_1$  e  $F_2$ ) che lo fanno ruotare in modo da disporlo in modo tangente alle linee di forza (dette anche LINEE DI CAMPO).

# Magneti naturali (calamite)

9



UNA CARATTERISTICA FONDAMENTALE DEL  
MAGNETISMO:

**Non è possibile avere un magnete con una sola polarità.**

Infatti se tagliassimo tante volte una calamita ciascuna parte ottenuta sarà sempre costituita da un polo Nord e un polo SUD cioè otterremo sempre calamite benché di dimensioni via via più piccole.

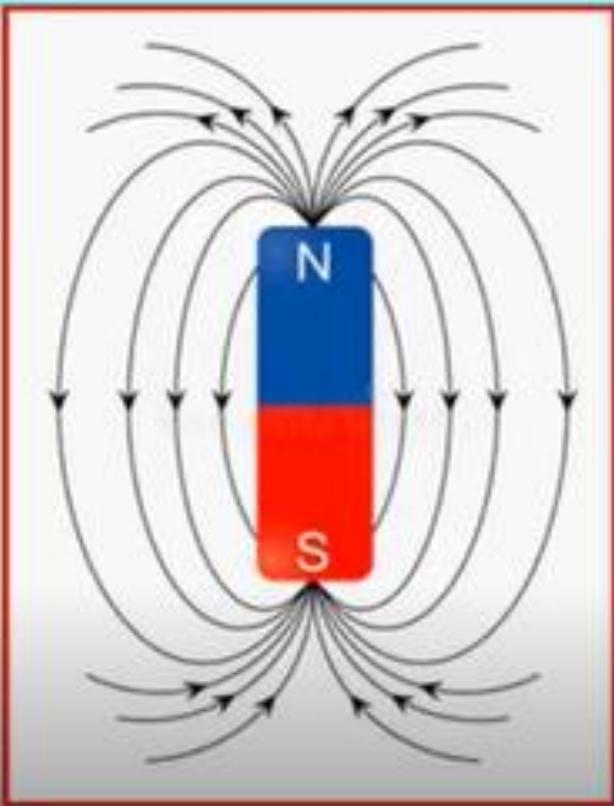
# Magneti naturali (calamite)

10

Poiché non è possibile avere un magnete con una sola polarità allora:

Le linee di forza del CAMPO MAGNETICO sono SEMPRE LINEE CHIUSE che possono andare dal polo Nord al polo Sud.

*Notiamo che questa è una differenza rispetto al CAMPO ELETTRICO dove è possibile separare le cariche positive da quelle negative e quindi le linee di forza del campo elettrico possono non essere chiuse.*



# LA FORZA MAGNETOMOTRICE **H**

11

La somma delle forze magnetiche nel campo è detta **INTENSITA' DEL CAMPO MAGNETICO (H)** e rappresenta la **FORZA MAGNETOMOTRICE di un circuito magnetico per metro di lunghezza.**

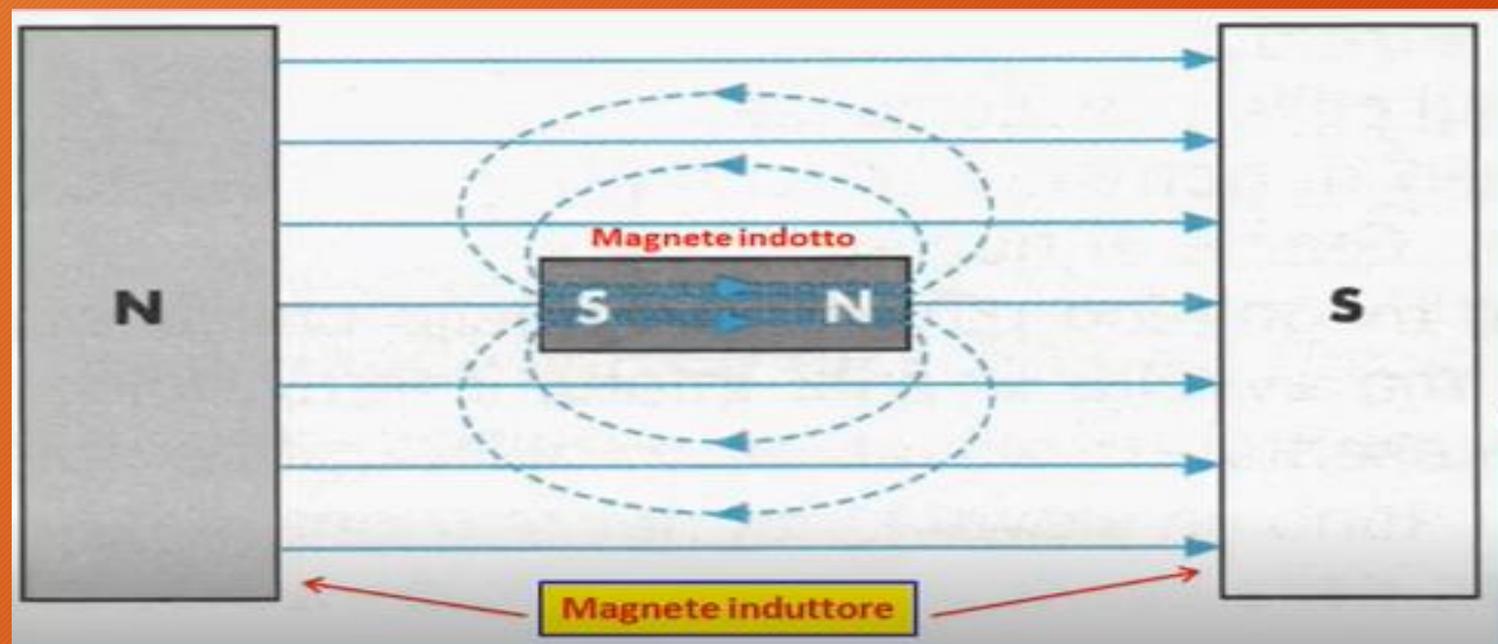
$$F = H \cdot l = [A/m][m] = [A]$$

Si indica con la lettera **H** è anziché esprimerla in Newton (N) viene espressa in **[A/m]** oppure in **[Asp/m]** (Ampere-spira al metro per ricordare che per determinare H si può moltiplicare la corrente che circola in una spira per il numero di spire e dividere poi per la lunghezza della spira o bobina; *come vedremo più avanti*).

# L'INDUZIONE MAGNETICA **B**

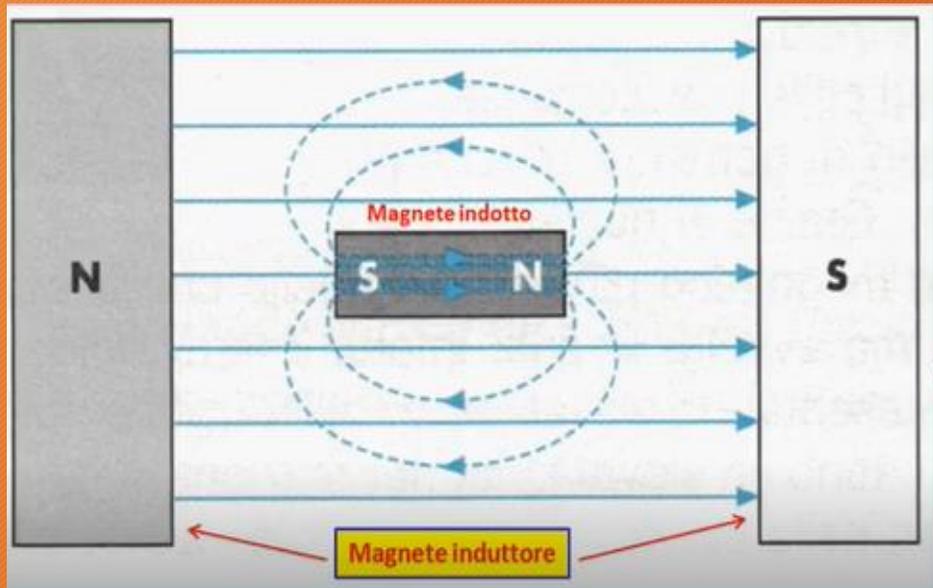
12

Se mettiamo un pezzo di materiale ferroso in un campo magnetico si vede che il pezzo di ferro si **MAGNETIZZA** cioè «diventa una calamità temporanea» e quindi in esso si formano i due poli (polo Nord e polo Sud) orientati in senso opposto al campo magnetico esterno che l'ha magnetizzato (detto **CAMPO MAGNETIZZANTE**).



# L'INDUZIONE MAGNETICA **B**

13



Analogamente alla permittività elettrica  $\epsilon$  (vista nello studio dei condensatori) anche la **PERMEABILITA' MAGNETICA** è data dal prodotto della permeabilità magnetica del vuoto (detta anche permeabilità assoluta  $\mu_0$ ) per la permeabilità relativa ( $\mu_r$ ) del materiale:

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

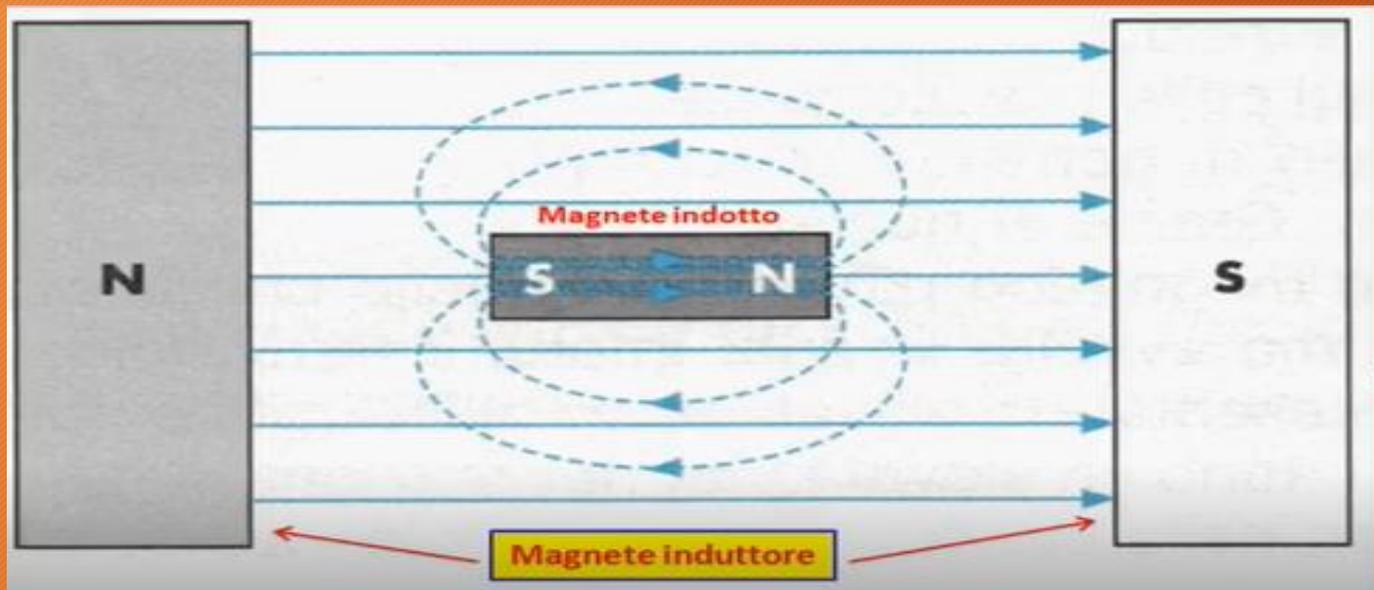
*I valori orientativi materiali ferrosi più utilizzati:*

|               |                |
|---------------|----------------|
| Ferro dolce   | $\mu_r = 1000$ |
| Ferro-Silicio | $\mu_r = 2000$ |
| Ferro-Nichel  | $\mu_r = 9000$ |

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ [H/m]}$$

# L'INDUZIONE MAGNETICA **B**

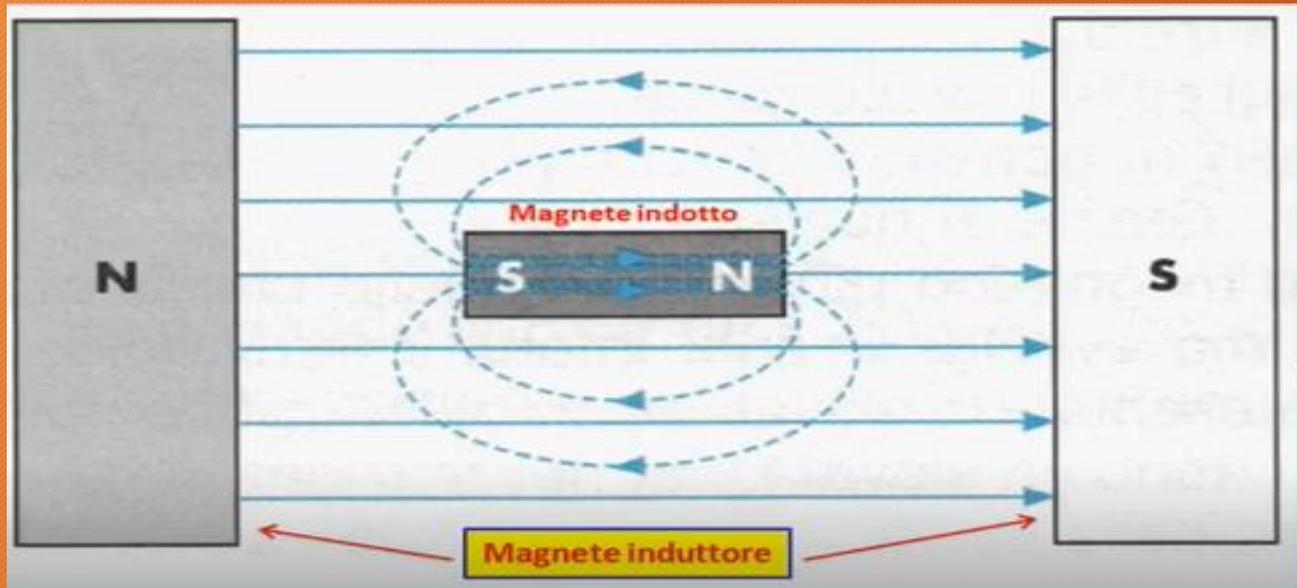
14



Poiché le linee di forza escono dal polo Nord ed entrano dal polo Sud si vede che **all'interno del pezzo di ferro il campo magnetico risulta «rinforzato»** (le linee di forza hanno infatti lo stesso verso) perché oltre a quello del campo esterno (cioè del magnete induttore) si ha anche il campo del magnete temporaneo (cioè del magnete indotto). All'esterno del pezzo di ferro il campo risulta in opposizione a quello magnetizzante e quindi di intensità inferiore a quello del campo magnetizzante.

# L'INDUZIONE MAGNETICA **B**

15



Il nuovo CAMPO MAGNETICO che si forma è detto **INDUZIONE MAGNETICA (B)**. Si indica con la lettera **B** e si misura in Tesla **[T]**.

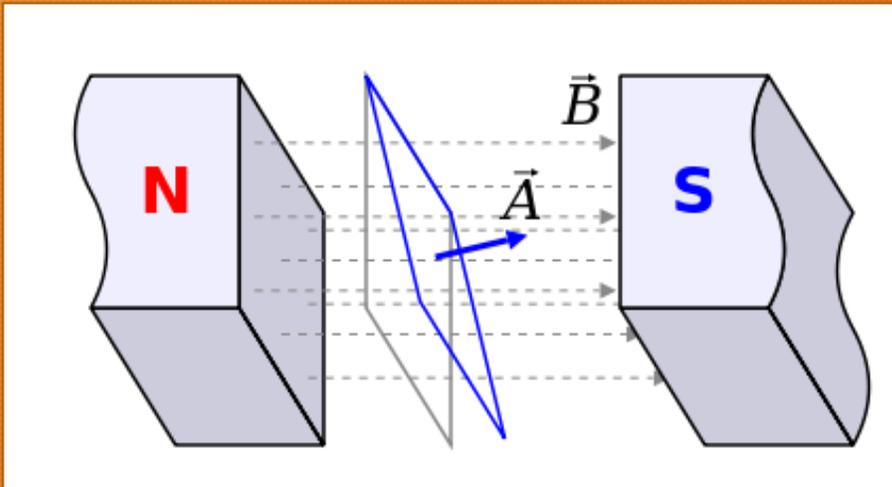
Si dimostra che:

La grandezza  $\mu$  esprime le proprietà magnetiche delle varie sostanze ed è detta **PERMEABILITA' MAGNETICA** (più è grande maggiore è la capacità della sostanza di magnetizzarsi).

$$B = \mu \cdot H$$

# IL FLUSSO MAGNETICO $\Phi$

16



*Nella figura sovrastante il corpo inserito nel campo magnetizzante è una spira cioè un anello di materiale conduttore di superficie esposta  $A$ .*

Se moltiplicando l'induzione magnetica  $B$  per la superficie  $S$  del corpo che viene attraversata dalle linee di forza si ricava il FLUSSO MAGNETICO cioè l'insieme di tutte le linee di forza che attraversano la superficie:

$$\Phi = B \cdot S$$

Il flusso magnetico si misura in Weber [Wb] che altro non è che  $[T \cdot m^2]$ .

Torneremo su questo aspetto più dettagliatamente nella seconda parte

# LA PERMEABILITA' MAGNETICA RELATIVA $\mu_r$

17

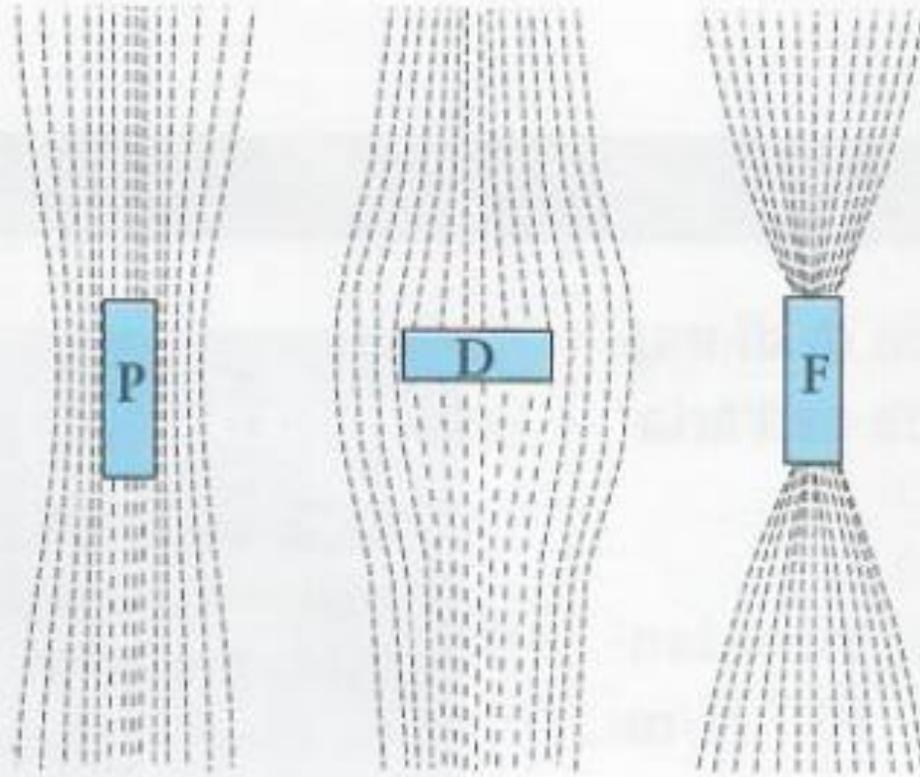
In relazione al valore della permeabilità magnetica relativa ( $\mu_r$ ) i materiali vengono suddivisi in tre tipologie:

1. **Materiali diamagnetici:** con  $\mu_r < 1$
2. **Materiali paramagnetici:** con  $\mu_r \geq 1$
3. **Materiali ferromagnetici:** con  $\mu_r \gg 1$  (*fino 100000*)

# LA PERMEABILITA' MAGNETICA RELATIVA $\mu_r$

18

FIG. 18  
Comportamento  
delle sostanze para-  
magnetiche (P),  
diamagnetiche (D),  
ferromagnetiche (F).



Quanto maggiore è la permeabilità magnetica tanto più il materiale attira verso di sé le linee di forza facendosi attraversare dalle linee stesse.

# LA PERMEABILITA' MAGNETICA RELATIVA $\mu_r$

19

| Sostanze              | Permeabilità magnetica relativa $\mu_r$ | Sostanze                | Permeabilità magnetica relativa $\mu_r$ |
|-----------------------|---|-------------------------|---|
| <b>Diamagnetiche:</b> |   | <b>Paramagnetiche:</b>  |   |
| Bismuto               | 0,999834                                | Aria                    | 1,0000004                               |
| Oro                   | 0,999964                                | Ossigeno                | 1,0000021                               |
| Mercurio              | 0,999968                                | Magnesio                | 1,000012                                |
| Argento               | 0,999974                                | Alluminio               | 1,000023                                |
| Diamante              | 0,999978                                | Tungsteno               | 1,000068                                |
| Piombo                | 0,999983                                | Titanio                 | 1,000071                                |
| Rame                  | 0,9999902                               | Platino                 | 1,000360                                |
| Acqua                 | 0,9999912                               | Uranio                  | 1,000400                                |
| Sodio                 | 0,9999976                               | <b>Ferromagnetiche:</b> |   |
| Idrogeno              | 0,9999999901                            | Ferro                   | 5.500                                   |
| Azoto                 | 0,9999999950                            | Permalloy               | 25.000                                  |
| Anidride carbonica    | 0,9999999977                            | Mumetal                 | 100.000                                 |
| <b>Vuoto:</b>         | 1                                       |                         |   |

*Permalloy :è una lega metallica di ferro-nichel*

*Mumetal: è una lega metallica di nichel-ferro-molibdeno-silicio ecc.*

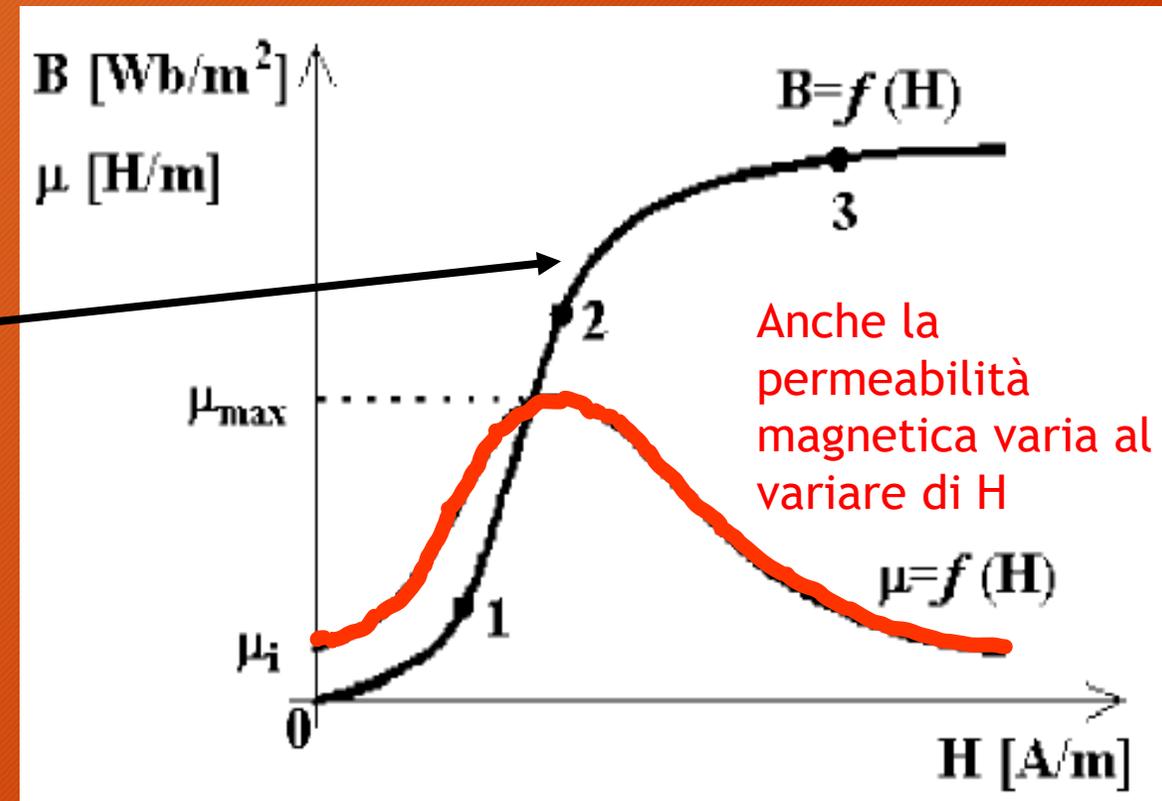
# L'ISTERESI MAGNETICA

20

Se poniamo in un campo magnetico  $H$  un materiale ferromagnetico abbiamo visto che si genera una induzione magnetica  $B$ .

Aumentando  $H$  aumenta ovviamente  $B$ .

Per **curva di prima magnetizzazione** si intende il diagramma che rappresenta l'induzione magnetica in funzione del campo magnetico per un materiale ferromagnetico vergine (cioè mai precedentemente immerso in un campo magnetico).



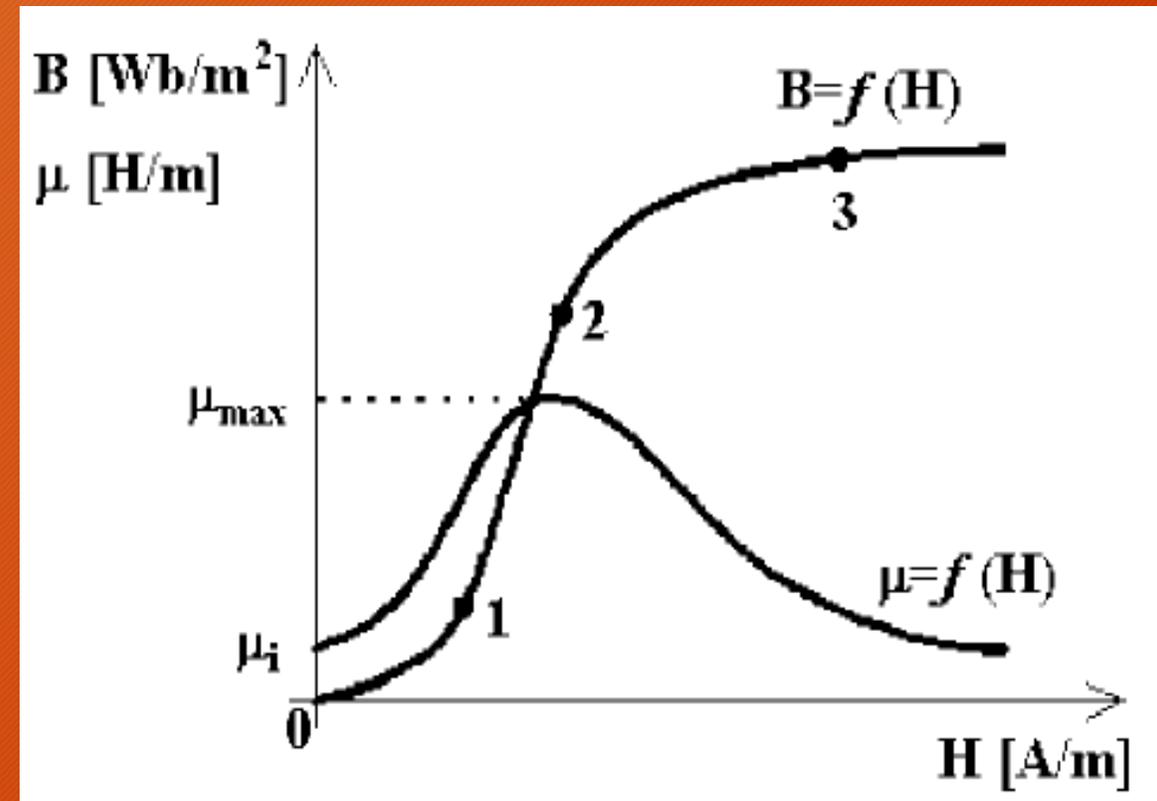
# L'ISTERESI MAGNETICA

21

La curva di prima magnetizzazione è formata da **quattro tratti** a caratteristiche diverse.

**Tratto 0-1** tipico delle intensità di magnetizzazione piccole, per il quale la permeabilità aumenta partendo da un valore iniziale

**Tratto 1-2** caratterizzato da una pendenza che può essere anche molto elevata, nel quale la permeabilità raggiunge il valore massimo  $\mu_{\max}$ . In tale tratto l'andamento della caratteristica è pressoché rettilineo e, per tale motivo, è detto tratto lineare;



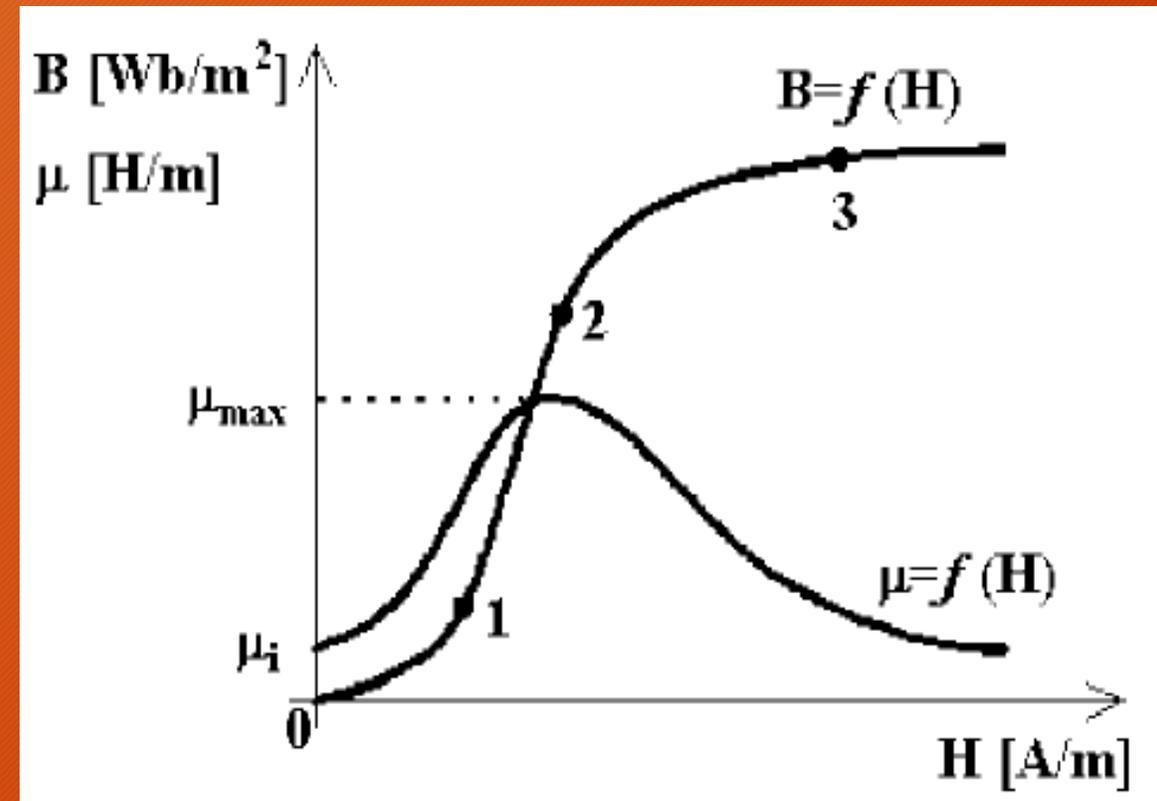
# L'ISTERESI MAGNETICA

22

La curva di prima magnetizzazione è formata da **quattro tratti** a caratteristiche diverse.

**Tratto 2-3** tipico delle intensità di magnetizzazione elevate, nel quale l'andamento non è più rettilineo e la permeabilità prende a diminuire. Per la sua forma, si parla di ginocchio della caratteristica.

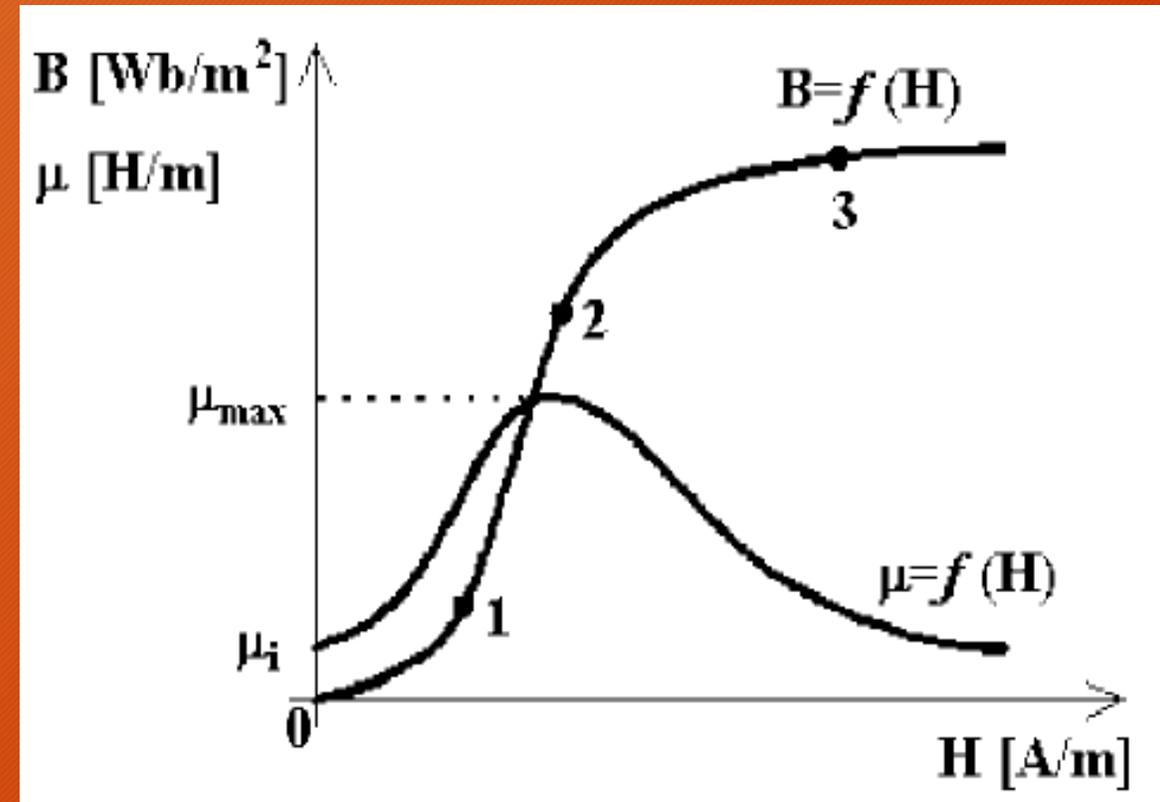
Il tratto a destra del punto 3 dove, pur aumentando moltissimo il campo, l'induzione si incrementa di pochissimo essendo l'andamento pressoché orizzontale. Si parla di tratto di saturazione e la permeabilità ha un valore costante pari alla permeabilità nel vuoto.



# L'ISTERESI MAGNETICA

23

Tale curva di magnetizzazione si riferisce al fenomeno della **magnetizzazione iniziale** che si ha quando un materiale è sottoposto ad un campo magnetico crescente gradualmente fino ad un valore massimo; se il campo magnetico è variabile alternativamente la curva percorre un ciclo detto **ciclo di isteresi**.

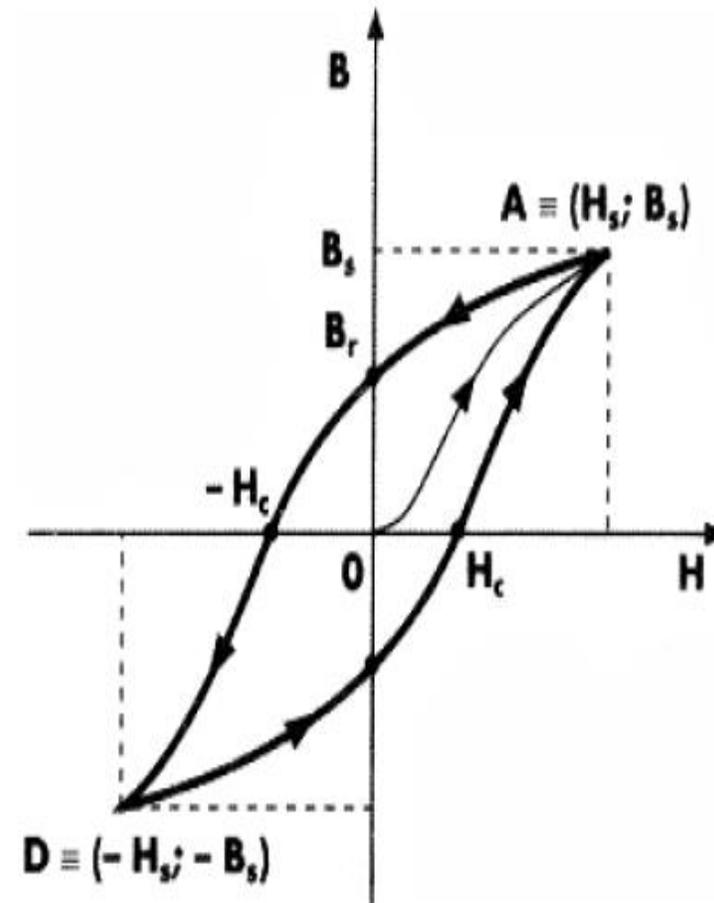


# L'ISTERESI MAGNETICA

24

Aumentando gradualmente il valore del campo  $H$  sulla curva di prima magnetizzazione si raggiunge il punto  $A$  (vedi figura), a cui corrisponde l'induzione di saturazione  $B_s$ .

A questo punto invertiamo il segno del campo magnetico e aumentandolo negativamente (producendo così un campo di segno opposto ai precedente e via via crescente in valore assoluto) vediamo che non si ripercorre a ritroso la curva di prima magnetizzazione, ma una curva che rispetto alla precedente, in corrispondenza degli stessi valori di  $H$ , presenta valori di induzione magnetica più elevati.



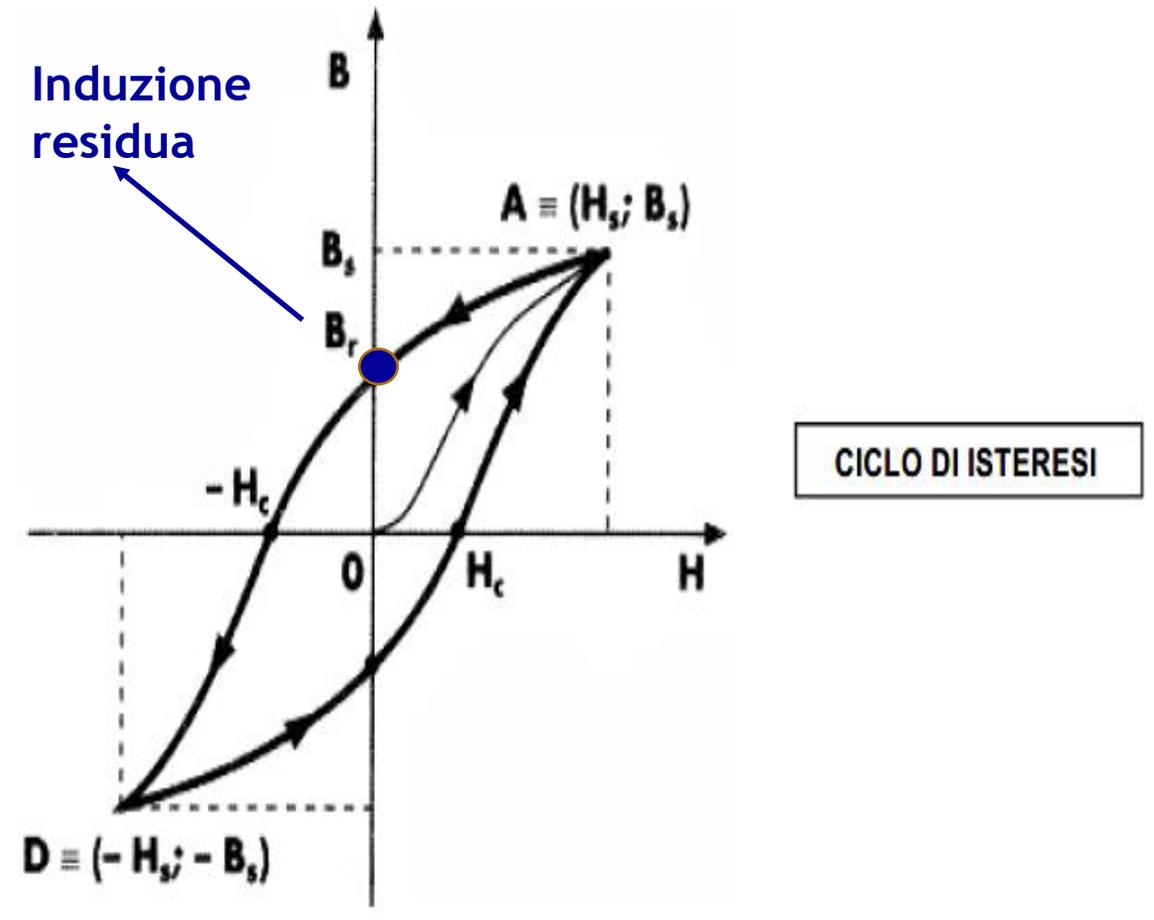
CICLO DI ISTERESI

# L'ISTERESI MAGNETICA

25

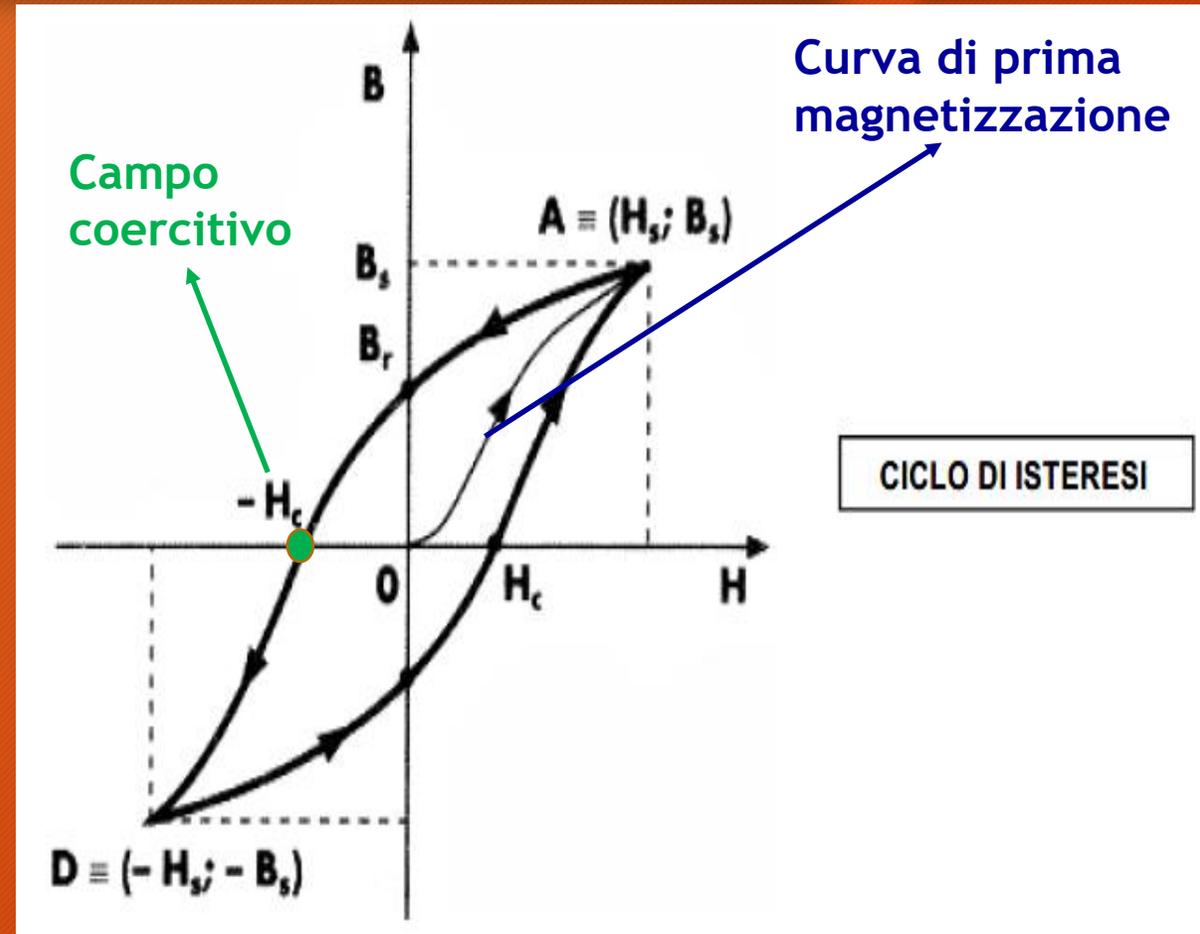
In particolare, quando  $H$  torna al valore zero, si ha per l'induzione un valore  $B_r$ , induzione residua, che è indice del magnetismo residuo.

A questo punto continuando ad ridurre  $H$  negativamente si osserva che la curva interseca l'asse delle ascisse in corrispondenza del valore  $-H_c$  e poi raggiunge, in corrispondenza del valore  $-H_s$ , il punto  $D$  simmetrico di  $A$  rispetto all'origine.



Il valore  **$-H_c$**  non è altro che il valore del campo necessario a far scomparire il magnetismo residuo, ed è detto **campo coercitivo**.

Giunti in D, ripetendo le stesse operazioni fatte per descrivere la curva che ci ha portato da A a D, si ritorna in A secondo una curva che è perfettamente simmetrica, rispetto all'origine, alla precedente.

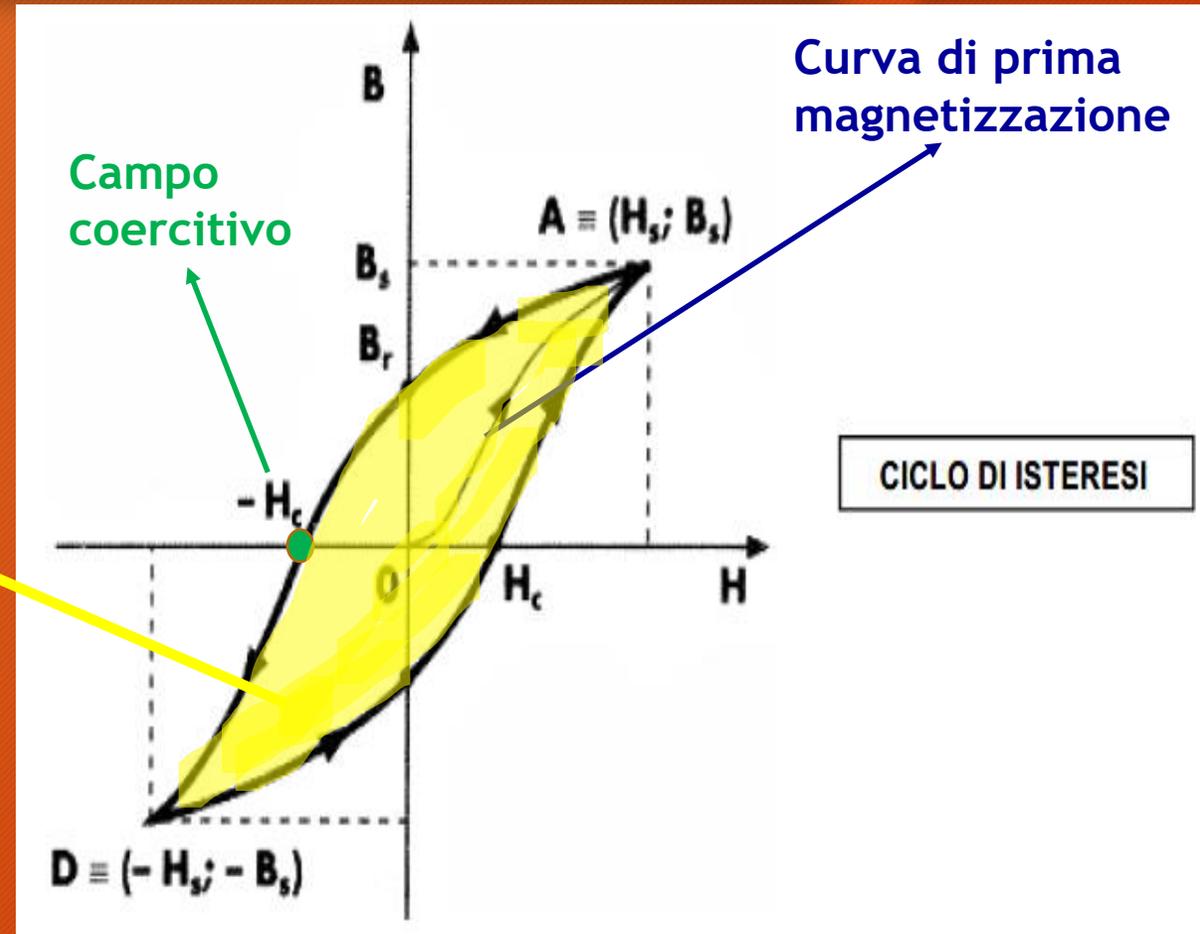


# L'ISTERESI MAGNETICA

27

Durante il ciclo di isteresi i materiali determinano una perdita di energia che si trasforma in calore.

L'area interna al ciclo di isteresi rappresenta l'energia persa per magnetizzare e smagnetizzare il materiale.



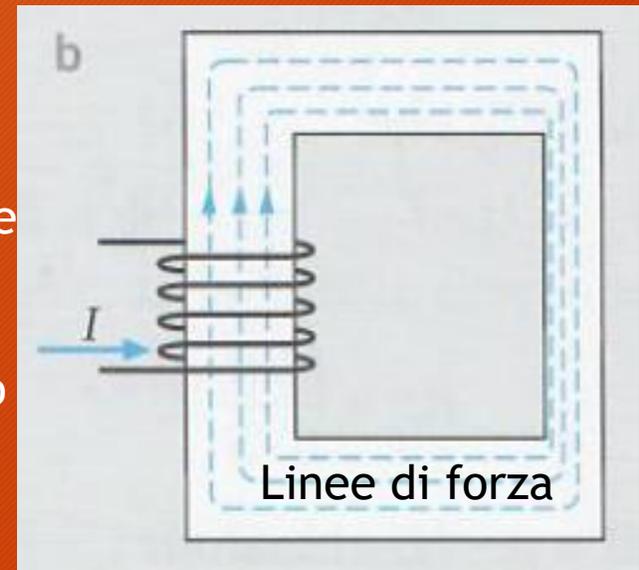
Un circuito magnetico è uno spazio occupato dal **circuito** chiuso **delle linee di forza** del campo magnetico indipendentemente da chi ha generato il campo magnetico.

Calamita



Circuito magnetico generato da una calamita

Corrente elettrica in una bobina che genera un campo magnetico analogo alla calamita

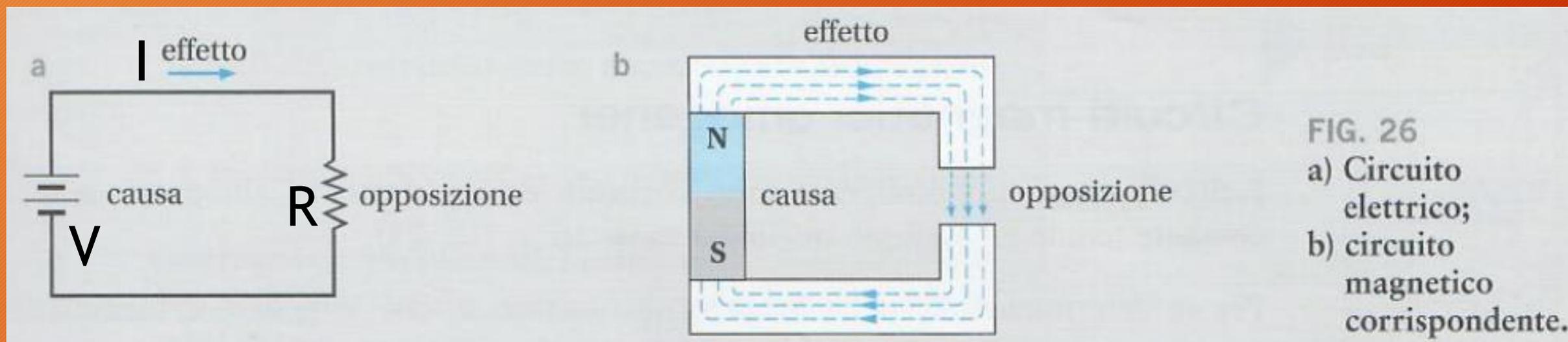


Circuito magnetico generato da una corrente elettrica

# Legge di Hopkinson

29

La Legge di Hopkinson per i circuiti magnetici è per analogia come la Legge di Ohm per i circuiti elettrici:



Legge di Ohm

$$V = R \cdot I$$

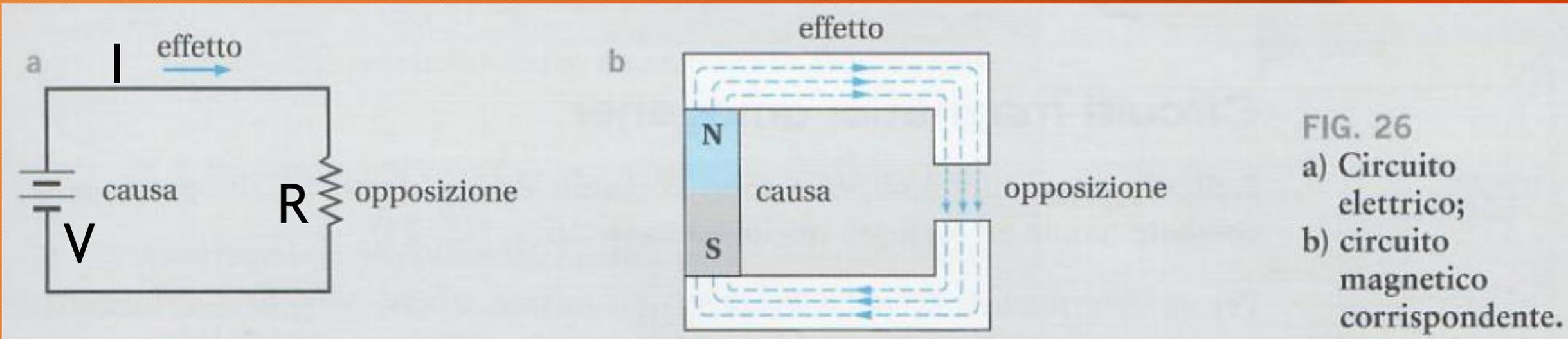
Legge di Hopkinson

$$F_m = R_m \cdot \Phi$$

$\Phi$  = Flusso magnetico [Wb]  
 $R_m$  = Riluttanza magnetica [ $H^{-1}$ ]  
 $F_m$  = Forza magnetomotrice [A]

# Legge di Hopkinson

30



Legge di Ohm

$$V = R \cdot I$$

Legge di Hopkinson

$$F_m = R_m \cdot \Phi$$

La Riluttanza magnetica  $R_m$  rappresenta l'attitudine del materiale ad opporsi al passaggio delle linee di forza e quindi del flusso magnetico e si misura in Henry alla meno uno [ $H^{-1}$ ]

# La Riluttanza magnetica

31

Dalla Legge di Hopkinson si ha:  $R_m = \frac{F_m}{\Phi}$

ricordando che:  $F_m = H \cdot l$  e che:  $\Phi = B \cdot S$

si ha:  $R_m = \frac{H \cdot l}{B \cdot S}$  ed essendo:  $B = \mu \cdot H$

sostituendo:  $R_m = \frac{H \cdot l}{\mu \cdot H \cdot S}$

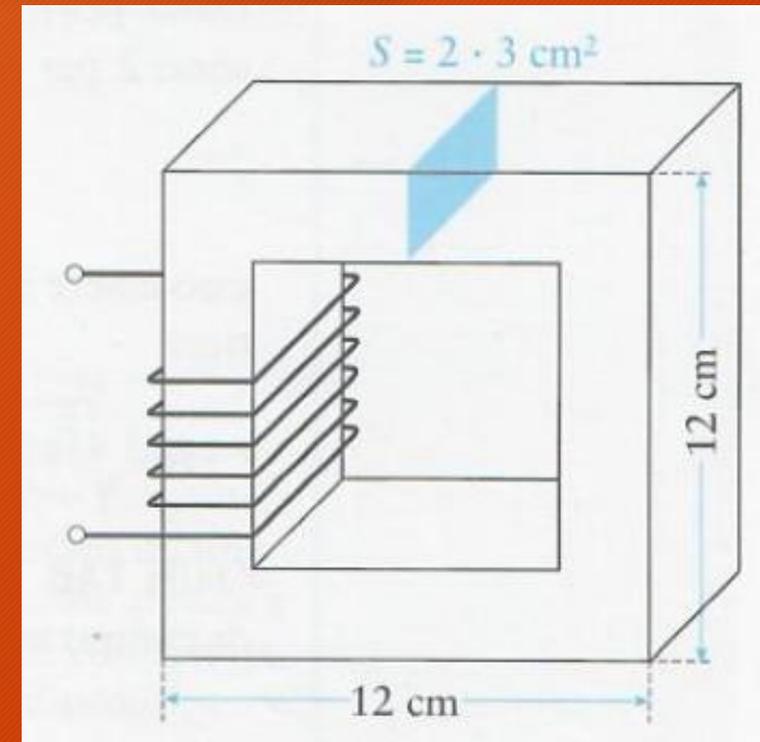
**quindi:**

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

Dato il circuito magnetico in ferro ( $\mu_r=5500$ ) rappresentato in figura avente flusso magnetico  $\Phi = 3 \cdot 10^{-4}$  Wb e lunghezza media dell'intero circuito pari a  $l = (12-2) \cdot 4 = 40$  cm e sezione  $S$  pari a  $S = 2 \cdot 3 = 6$  cm<sup>2</sup>

**Determinare:**

- 1) Il valore dell'induzione magnetica  $B$
- 2) L'intensità del campo magnetico  $H$
- 3) La riluttanza magnetica  $R_m$
- 4) La forza magnetomotrice  $F_m$



## Soluzione esercizio

$$l = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$$

$$S = 6 \text{ cm}^2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 10^{-4}} = \underline{0,5 \text{ [T]}}$$

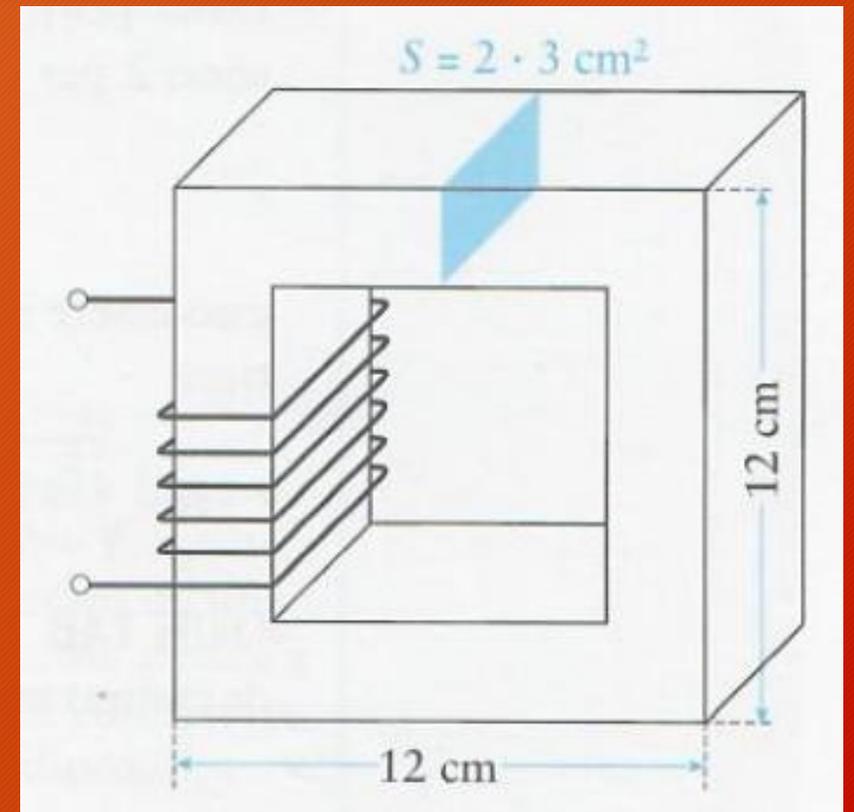
$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$$

$$\mu_r = 5500 \Rightarrow \mu = 6,908 \cdot 10^{-3} \text{ [H/m]}$$

$$B = \mu H \Rightarrow H = \frac{B}{\mu} = \frac{0,5}{6,908 \cdot 10^{-3}} = \underline{72,38 \text{ [A/m]}}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} = \frac{0,4}{6,908 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-4}} = \underline{96506,47 \text{ [H}^{-1}\text{]}}$$

$$F_m = \phi \cdot R_m = \underline{28,95 \text{ A}}$$



Breve formulario per la risoluzione dei circuiti magnetici:

$H$  [A/m] oppure [Asp/m]

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad \text{con} \quad \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \quad [\text{H/m}]$$

$$B = \mu \cdot H \quad [\text{T}]$$

$$F_m = H \cdot L \quad [\text{A}]$$

$$F_m = N_{\text{spire}} \cdot I \quad [\text{A}]$$

$$\Phi = B \cdot S \quad [\text{Tm}^2] = [\text{Wb}]$$

$$F_m = R_m \cdot \Phi \quad [\text{A}]$$

$$R_m = L / (\mu S) \quad [\text{A/Wb}] = [\text{H}^{-1}]$$



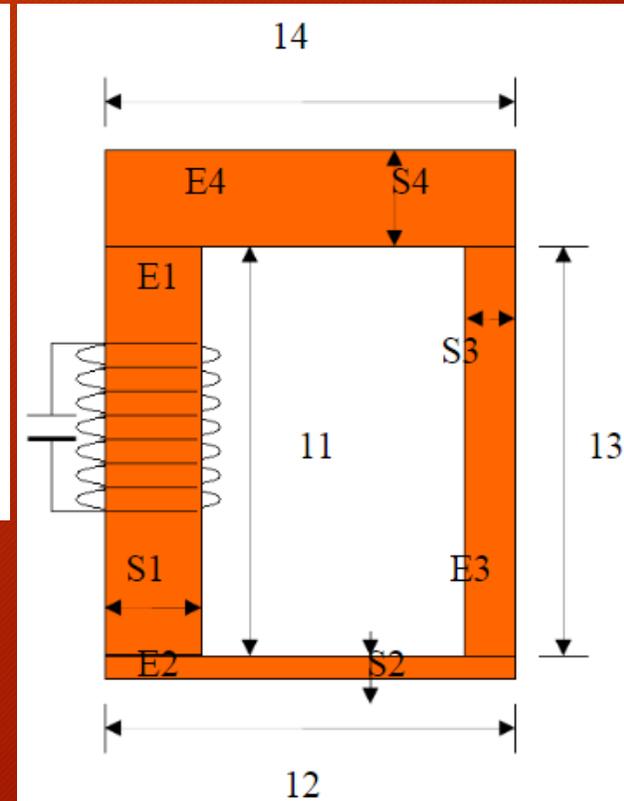
**Nota:** Riluttanze in serie si sommano e in parallelo si calcolano come le resistenze elettriche

# Esercizi sulla Legge di Hopkinson

35

## Esercizio 1

Il circuito magnetico con elementi in serie mostrato in figura è costituito da elementi  $E_i$  di isoperm ( $\mu_r = 60$ ); sia  $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 1$  m;  $S_1 = S_4 = 1$  dm<sup>2</sup>;  $S_2 = 0.25$  dm<sup>2</sup>;  $S_3 = 0.5$  dm<sup>2</sup>. Se l'avvolgimento è costituito da 150 spire, ciascuna percorsa da una corrente di 100 A, determinare il valore di  $B$  internamente all'elemento  $E_2$ .



# Esercizi sulla Legge di Hopkinson

36

## Soluzione

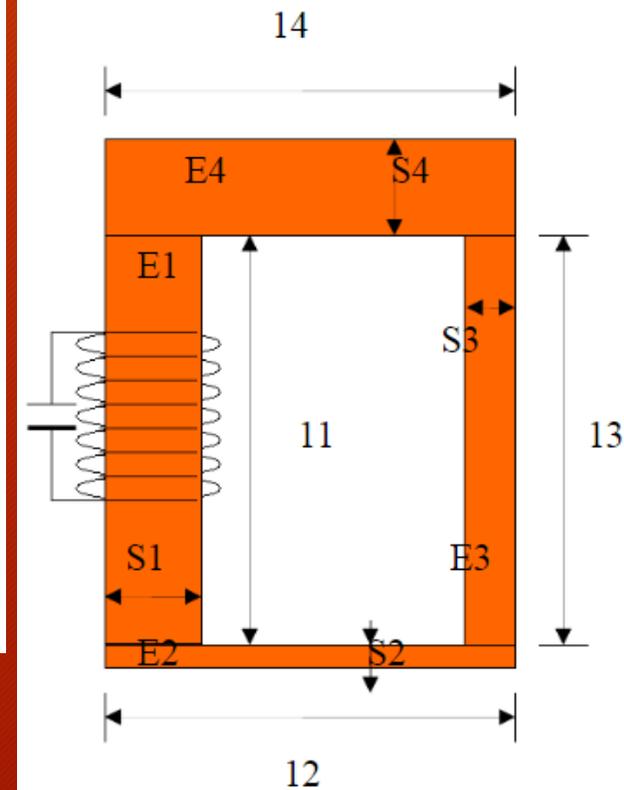
Applichiamo la legge di Hopkinson al circuito magnetico considerato:

$$\mathfrak{F} = \mathcal{R} \Phi$$

dove  $F$  indica la forza magnetomotrice,  $R$  la riluttanza del circuito e  $\Phi$  il flusso del campo magnetico.

Nel nostro caso la forza magnetomotrice vale:

$$\mathfrak{F} = NI = 150 \text{ spire} \cdot 100 \text{ A} = 1,5 \cdot 10^4 \text{ As}$$



# Esercizi sulla Legge di Hopkinson

37

Poiché gli elementi  $E_i$  sono disposti in serie, la riluttanza totale  $R_s$  è data da:

$$\mathcal{R}_s = \sum_{i=1}^4 \mathcal{R}_i = \sum_{i=1}^4 \frac{l_i}{\mu_i S_i} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \sum_{i=1}^4 \frac{l_i}{S_i}$$

Sostituendo i valori numerici si ottiene:

$$\mathcal{R}_s = \frac{1}{\mu_0 60} \left( \frac{1 \text{ m}}{10^{-2} \text{ m}^2} + \frac{1 \text{ m}}{0.25 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2} + \frac{1 \text{ m}}{0.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2} + \frac{1 \text{ m}}{10^{-2} \text{ m}^2} \right)$$

$$\mathcal{R}_s = \frac{1}{12.56 \cdot 10^{-7} (\text{Wb/m}^2) \cdot ( \text{m/As} ) \cdot 60 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2} (1+4+2+1) = 1,06 \cdot 10^7 \frac{\text{As}}{\text{Wb}}$$

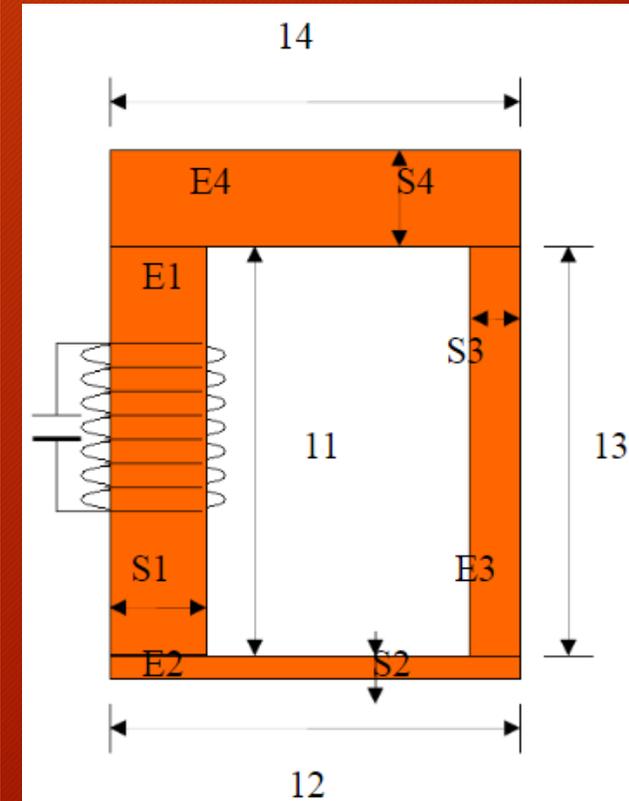
Dalla legge di Hopkinson possiamo ricavare, quindi, il flusso del campo B:

$$\Phi = \frac{\mathfrak{F}}{\mathcal{R}_s} = \frac{1.5 \cdot 10^4 \text{ As}}{1.06 \cdot 10^7 \text{ As/Wb}} = 1.42 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Il flusso del campo è lo stesso per tutti gli elementi del circuito, poiché questi sono in serie.

Di conseguenza il campo di induzione magnetica nell'elemento  $E_2$  vale:

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{1.42 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{0.25 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2} = 0.57 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 0.57 \text{ Tesla}$$

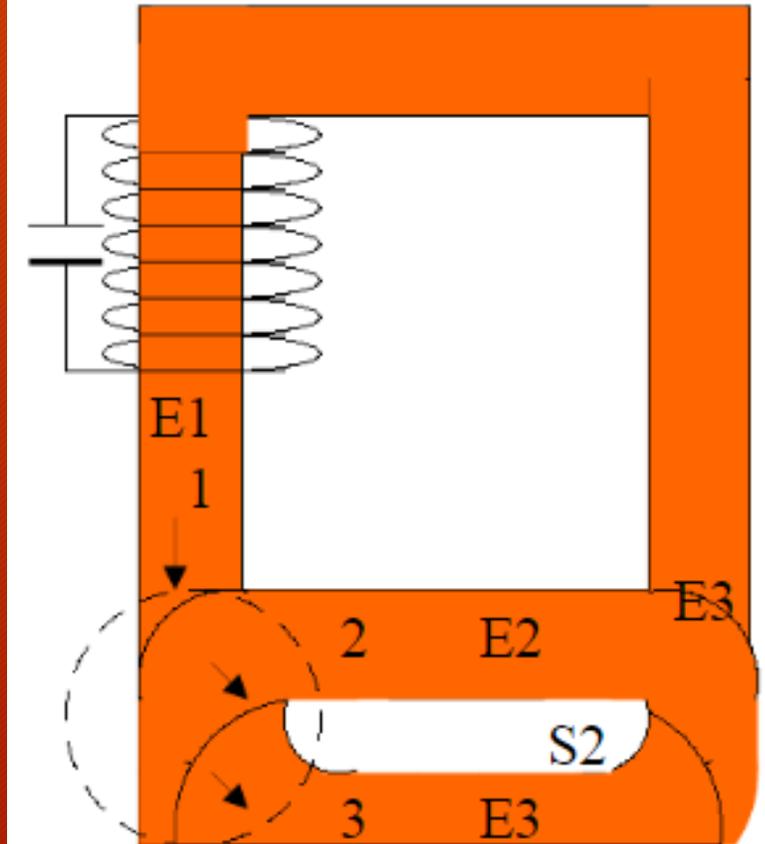


# Esercizi sulla Legge di Hopkinson

38

## Esercizio 2

Il circuito magnetico con elementi in parallelo mostrato in figura è costituito da tre elementi di isoperm ( $\mu_r = 60$ ). Sia  $l_1 = 2$  m;  $l_2 = l_3 = 1$  m;  $S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = 1$  dm<sup>2</sup>. Se il circuito di eccitazione è costituito da 100 spire, ciascuna percorsa da una corrente di 100 A, determinare il valore di  $B$  internamente ai tre elementi  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ .



# Esercizi sulla Legge di Hopkinson

39

## Soluzione

La forza magnetomotrice del circuito vale:

$$\mathfrak{F} = NI = 100 \text{ spire} \cdot 100 \text{ A} = 10^4 \text{ As}$$

Per il calcolo della riluttanza osserviamo che il circuito è dato da due elementi  $E_2$  e  $E_3$  fra di loro in parallelo:

$$\mathfrak{R}_p = \frac{\mathfrak{R}_2 \cdot \mathfrak{R}_3}{\mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3}$$

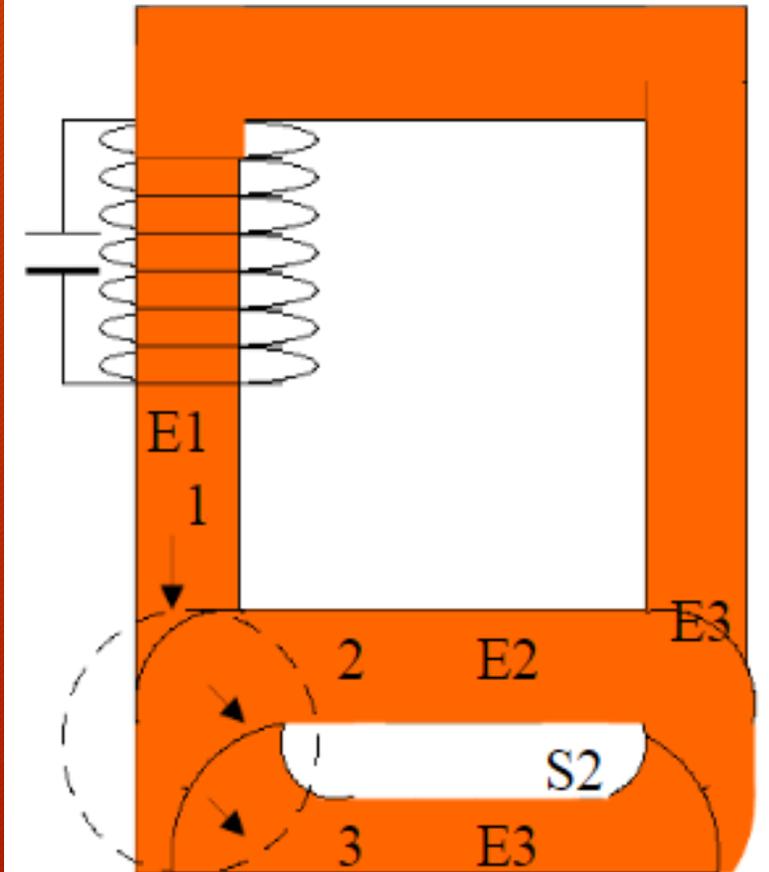
e in serie ad essi l'elemento  $E_1$ . La riluttanza totale  $R$  è dunque:

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_p = \mathfrak{R}_1 + \frac{\mathfrak{R}_2 \cdot \mathfrak{R}_3}{\mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3} = \mathfrak{R}_1 + \frac{\mathfrak{R}_2}{2}$$

avendo tenuto conto del fatto che nel caso in esame è  $R_3 = N_2$ .

Numericamente si ha:

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left( \frac{l_1}{S_1} + \frac{l_2}{2S_2} \right) = 33 \cdot 10^5 \frac{\text{As}}{\text{Wb}}$$



# Esercizi sulla Legge di Hopkinson

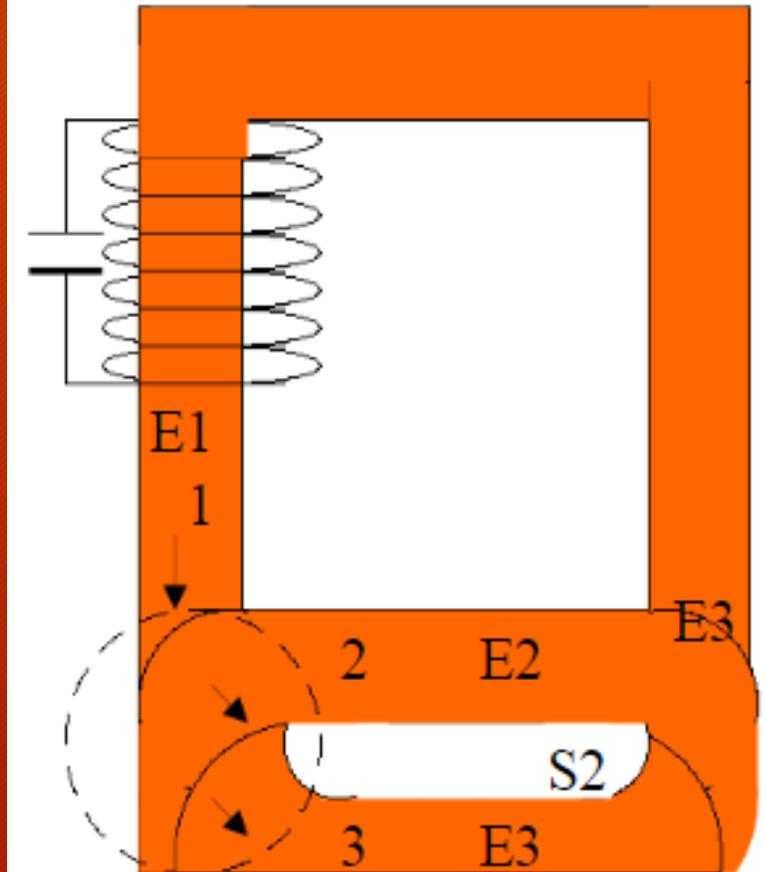
40

Si ha dunque

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{10^4 \text{ As}}{33 \cdot 10^5 \text{ As/Wb}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Va ora tenuto conto del fatto che nell'elemento  $E_1$  il flusso  $\Phi_1$  è pari a  $\Phi$ ; ma negli elementi  $E_2$  e  $E_3$  in parallelo il flusso si suddivide in parti inversamente proporzionali alle riluttanze. Nel caso in esame, essendo  $R_3 = N_2$ , si ha:

$$\Phi_1 = \Phi \quad \Phi_2 = \frac{\Phi}{2} \quad \Phi_3 = \frac{\Phi}{2}$$



# Esercizi sulla Legge di Hopkinson

41

## Esercizio 3

Nel circuito magnetico analizzato nell'esercizio 1 viene realizzato un traferro di spessore  $d = 5$  cm a metà dell'elemento  $E_4$ . Calcolare il valore di  $B_0$  nel traferro stesso.

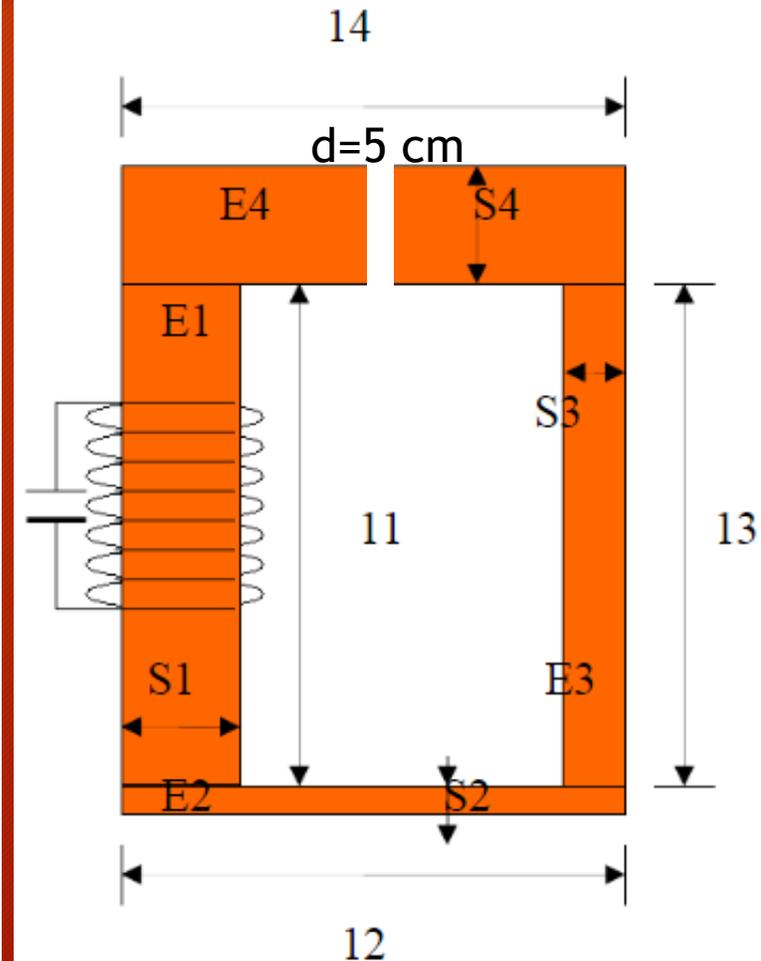
## Soluzione

La lunghezza del circuito di isoperm diminuisce di 5 cm rispetto alla configurazione calcolata nell'esercizio 1; ciò tuttavia modifica in misura trascurabile la sua riluttanza, che possiamo assumere valere ancora  $R_S = 1,06 \cdot 10^7$  As/Wb. A questa va tuttavia aggiunta ora la riluttanza  $R_c$  del traferro, che vale:

$$\mathcal{R}_0 = \frac{d}{\mu_0 S} = \frac{5 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{12,56 \cdot 10^{-7} (\text{Wb/As}) \cdot (0,1 \text{ m})^2} \approx 0,4 \cdot 10^7 \frac{\text{As}}{\text{Wb}}$$

La riluttanza totale  $R_T$  dell'elettromagnete vale dunque

$$R_T = R_S + R_0 = (1,06 + 0,4) \cdot 10^7 = 1,46 \cdot 10^7 \frac{\text{As}}{\text{Wb}}$$



# Esercizi sulla Legge di Hopkinson

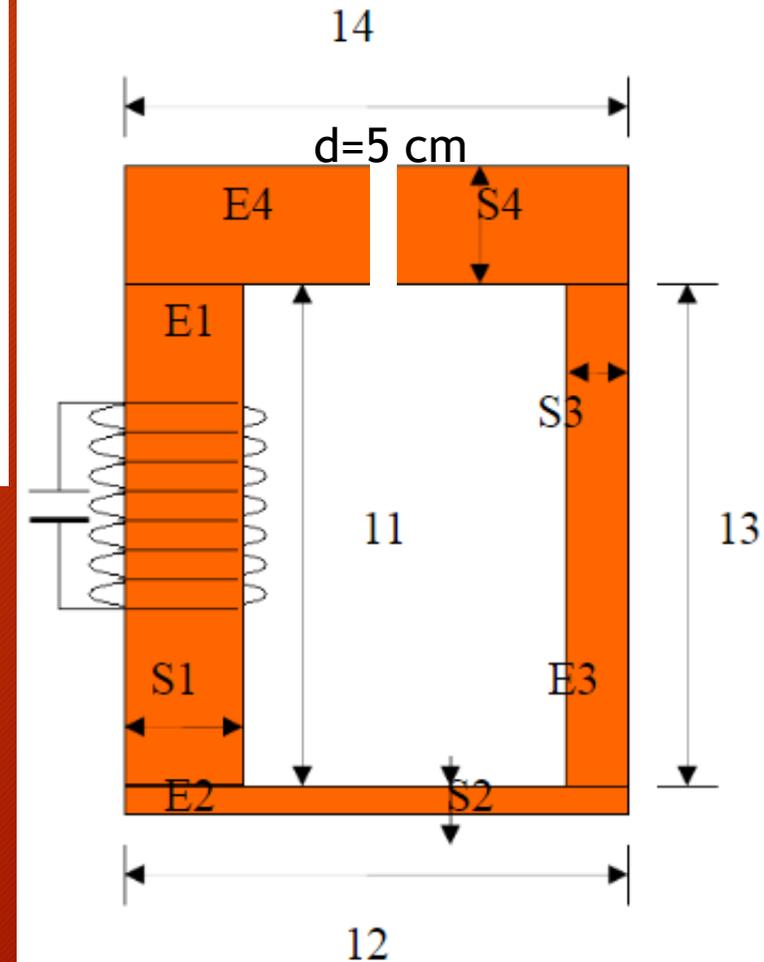
42

Si ha pertanto un flusso  $\Phi$  pari a

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_T} = \frac{1.5 \cdot 10^4 \text{ As}}{1.46 \cdot 10^7 \text{ As/Wb}} = 1.03 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Ricordando che il valore di  $B$  nel ferro è uguale a quello nel traferro, il campo di induzione magnetica  $B_0$  nel traferro vale quindi

$$B_0 = \frac{\Phi}{S_0} = \frac{1.03 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{10^{-2} \text{ m}^2} \approx 0.10 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$



## **Bibliografia**

- *Tecnologie elettrico-elettroniche e applicazioni - Vol.1 - M. Coppelli B- Stortoni - Ed. Mondadori*

## **Sitografia:**

- [https://it.wikipedia.org/wiki/Wikipedia\\_in\\_italiano](https://it.wikipedia.org/wiki/Wikipedia_in_italiano)
- [https://www.youtube.com/watch?v=qzSYJ3\\_ocBg](https://www.youtube.com/watch?v=qzSYJ3_ocBg)
- <https://www.youtube.com/watch?v=SQLHChu86Dg>
- <http://www.edutecnica.it/>
- <https://www.studocu.com/it/document/universita-degli-studi-di-trento/fisica-2/altro/esercizi-sui-circuiti-magnetici/932740/view>