

## IL CAMPO MAGNETICO.

I fenomeni magnetici vengono rappresentati in pratica dalle ben note proprietà delle calamite e dei magneti: essi hanno la capacità di attrarre a se piccole quantità di ferro, ghisa e in misura minore altri metalli come il cobalto, il nichel, ecc. : avvicinando questi metalli, diventano anche loro dei magneti capaci di attrarre altri metalli simili. Poi, alcuni di essi come l'acciaio temprato, restano magnetizzati permanentemente o per lungo tempo costituendo così i magneti permanenti. Altri materiali come il ferro dolce, rimangono magnetizzati finché sottoposti all'influenza di una calamita e quindi costituiscono i magneti temporanei.

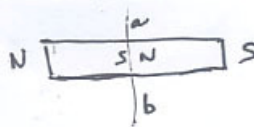
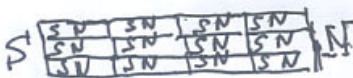
Le azioni magnetiche sono quindi molto spiccate in alcuni corpi e trascurabili in altri.

Alcuni corpi, come il bismuto, presentano delle proprietà magnetiche debolissime , però vengono respinte dalle calamite: questi corpi vengono detti diamagnetici mentre tutti gli altri

paramagnetici. Per corpi magnetici si intendono tutti quelli in cui le azioni magnetiche sono molte intense come i materiali ferromagnetici.

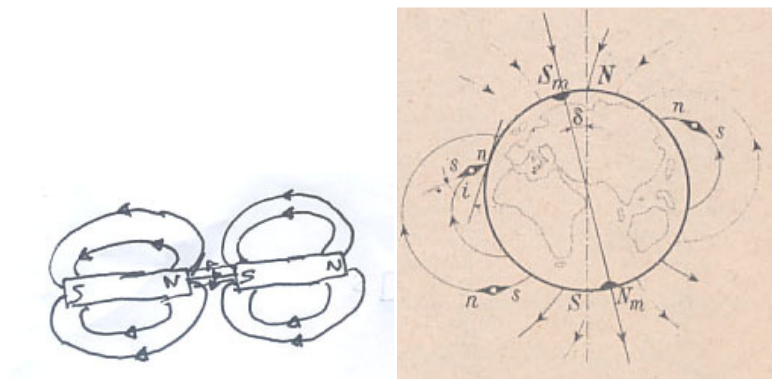
Le azioni magnetiche di una calamita sono particolarmente intense alle estremità che costituiscono i due poli: è noto che una calamita allungata e liberamente sospesa oriente sempre la stessa estremità e solo la stessa verso il nord geografico e l'altra verso il sud: di conseguenza i due poli di una calamita non sono equivalenti ma perfettamente distinguibili e vengono quindi indicati con i nomi di polo nord e polo sud. Le attrazioni magnetiche si verificano quindi sempre tra i poli contrari mentre i nomi di egual nome si respingono.

Ogni calamita è costituita da tanti magnetini "perfettamente" orientati – figura sotto a sinistra.



Una calamita come detto presenta due poli esterni, detti polo Nord e Sud: tagliandola da a - b si ottengono due calamite, sopra fig.a destra.

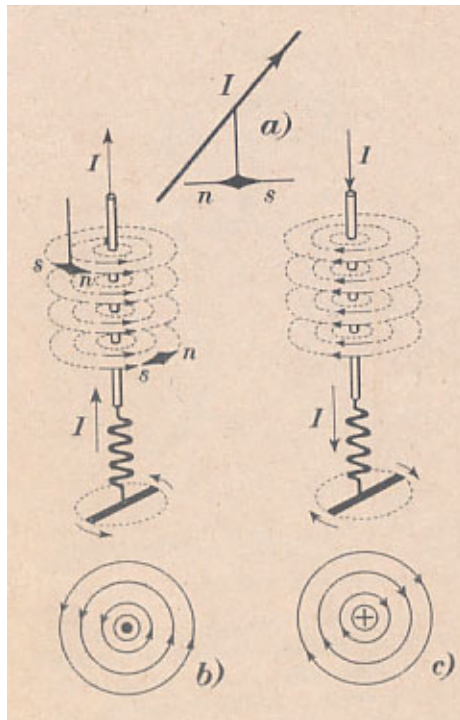
Sotto a sinistra si nota come le linee di forza di un campo magnetico sono di tipo chiuse ed uscenti dal polo nord ed entranti nel sud esternamente, e, internamente entranti dal sud al nord, . a differenza di quelle del campo elettrico che sono aperte e radiali – Il campo magnetico è uniforme tra i due poli N e S in cui le linee di forza sono parallele mentre ai bordi le linee di forza si incurvano e quindi il campo non è più uniforme.



Il campo magnetico terrestre, figura a destra pagina precedente: essa presenta un polo Sud magnetico in corrispondenza del nord geografico e viceversa I poli magnetici della Terra però sono spostati rispetto ai poli geografici risultando così un angolo d'errore  $\Delta$  che prende il nome di declinazione geografica. L'ago magnetico sospeso è diretto verso il sud magnetico

**I campi magnetici prodotti dalle correnti.** Vediamo la relazione danese Oersted, osservò che un ago magnetico sospeso, si disponeva normalmente al piano passante per il conduttore. Inoltre il polo nord dell'ago si rivolge a sinistra dell'osservatore che guardi l'ago magnetico, ponendosi disteso lungo il filo con la testa nel verso della corrente (Regola di Ampere). Di conseguenza un conduttore percorso da corrente genera nello spazio un campo magnetico in cui le linee di forza sono circolari e concentriche al

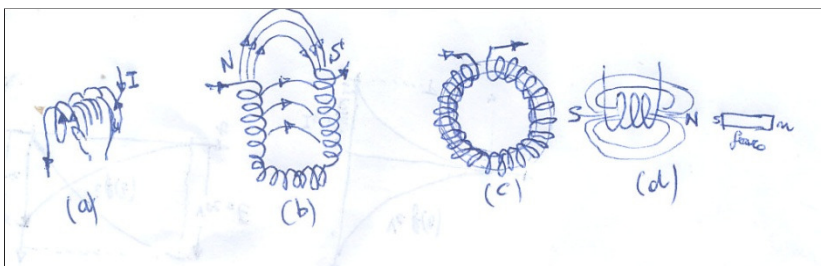
conduttore. Il verso delle linee di forza ci viene indicato dal nord dell'ago magnetico liberamente orientato: esso



coincide con il verso in cui deve essere fatta girare una vite destrorsa coassiale al conduttore per farla avanzare o re-trocedere nel verso della corrente come indicato in figura – **regola del cavaturaccioli di Maxell.**

Il campo magnetico può essere generato da un conduttore. può essere rivelato da uno spettro magnetico ottenuto da limatura di ferro cosparso su un foglio di carta.: si osserverà che la limatura si disporrà in filetti circolari concentrici al conduttore .

Analogie tra il solenoide e il magnete.- Consideriamo il solenoide percorso da una corrente  $I$ , se appoggiamo su esso il palmo della mano destra con le dita nel verso della corrente, fig.a in basso) il polo Nord sarà indicato dall'indice della mano destra. Le stesse regole si applicano per una sola spira per individuare la faccia nord e quella sud.



Nella fig.b, sopra, nel solenoide a forma di cavallo, si notano le linee di flusso disperse mentre disponendo il solenoide a formare

un toroide – solenoide toroidale nella fig.c di sopra - non si avranno linee di flusso disperse. Nella figura d, si ha il potere succhiante dei solenoidi: al solenoide percorso da corrente I si pone una barretta di ferro dolce, essa si magnetizza e viene poi attratta all'interno.

### COME SI MISURA L'INTENSITA' DEI CAMPI MAGNETICI.

Consideriamo un solenoide di lunghezza l costituito da N spire e percorso dalla corrente I, l'intensità del campo magnetico H sarà definito dalla seguente relazione:

$$H = \frac{\text{numero delle spire } N \times \text{intensità di corrente } I}{\text{lunghezza del solenoide } l} \quad \text{cioè} \quad H = (N I)/l$$

*In cui l'intensità del campo H si misura in Aspire/m o Aspire/cm a seconda che la lunghezza del solenoide venga misurata in metri o cm.*

*La tensione magnetica F dei circuiti magnetici sarà definita dalla seguente relazione:*

$$F = \sum H \Delta l = H_1 \times \Delta l_1 + H_2 \times \Delta l_2 + H_3 \times \Delta l_3 \dots + H_n \times \Delta l_n$$

### **L'energia dei campi magnetici e il vettore induzione.**

L'energia specifica dei campi magnetici e cioè l'energia per unità di volume del campo, viene espressa dalla seguente relazione:

$w = \frac{1}{2} B H$  dove B è l'induzione magnetica e H è l'intensità del campo magnetico.

Quindi l'induzione B del campo magnetico sarà espressa dalla seguente relazione:  **$B = 2 (w/h)$**

Misurando l'energia specifica w del campo in joule/m<sup>3</sup> e l'intensità del campo magnetico H in amperspire/m l'induzione magnetica B sarà definita:

$$(joule/ m^3) / ( amperspire/metro) = joule/(amperspire m^2)$$

E poiché 1 joule= watt x sec = volt x ampere x sec

e quindi il tutto si riduce  $(\text{volt} \times \text{sec}) / (\text{spire} \times \text{m}^2)$

Per cui si conclude che l'induzione magnetica  $B$  esprime il prodotto di una tensione elettrica per un tempo  $(\text{volt} \times \text{sec})$ , con riferimento a una spira che involge un metro quadrato di superficie normale alle linee di forza del campo.

La relazione che lega l'induzione magnetica  $B$  all'intensità del campo magnetico  $H$  è la seguente:  $B = \mu H$  dove  $\mu$  è la permeabilità magnetica assoluta che dipende dalla natura del materiale. Quindi avremo:  $\mu = B/H$  e, andando a sostituire

$$[\text{volt} \times \text{sec} / (\text{spire} \times \text{m}^2)] = (\text{volt} \times \text{sec}) / (\text{amp} \times \text{spire}^2 \times \text{m})$$

ma  $(\text{volt}/\text{amp}) = \text{ohm}$ ; per cui avremo  $(\text{ohm} \times \text{sec}) / (\text{spire}^2 \times \text{m})$

Diremo brevemente che la permeabilità assoluta  $\mu$  viene misurata in ohm sec per metro ( $\Omega \text{ sec}/\text{m}$ ); poiché il prodotto  $\Omega \text{ sec}$  ci dà l'henry avremo che la permeabilità assoluta  $\mu$  sarà misurata in henry per metro henry/m.

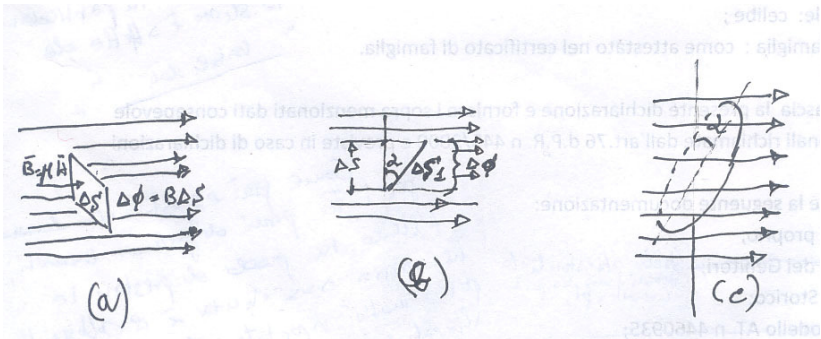
Per lo spazio vuoto la permeabilità magnetica assoluta assume il valore  $1,256 \times 10^{-6}$  henry/m

In pratica la permeabilità magnetica assoluta  $\mu$  ci dice in che modo un corpo si lascia attraversare dalle linee di forza di un campo magnetico:  $\mu$  assume valori diversi a seconda la natura del corpo. Esistono però solo un limitato numero di corpi che hanno una  $\mu$  elevata e formano la categoria dei materiali ferro-magnetici (ferro, nichel, cobalto e certe leghe).

**Definizione del flusso d'induzione.** Si consideri un elemento di superficie  $\Delta S$  disposto normalmente alle linee di forza di un campo magnetico di intensità  $H$ , avremo:

si dà il nome di flusso di spostamento o flusso d'induzione o semplicemente di flusso magnetico attraverso l'elemento di superficie  $S$  definito dalla seguente relazione:

$\Delta \Phi = B \times \Delta S$  dove  $B = \mu \times H$  - vedi fig.a sotto.



Nella fig.b di sopra, abbiamo un elemento inclinato  $\Delta S_1$  di un certo angolo  $\alpha$  rispetto alla normale del campo per cui avremo  $\Delta S = \Delta S_1 \times \cos \alpha$  e quindi  $\Delta \Phi = B \times \Delta S = B \times \Delta S_1 \times \cos \alpha$ . Il flusso  $\Phi$  si misura in volt secondi che equivalgono al weber (Wb). Nella fig.c della pagina precedente si va a definire l'entità del flusso concatenato con una spira a circuito chiuso: questo flusso che viene abbracciato dal circuito nel campo in cui è immerso viene designato come flusso magnetico concatenato col circuito stesso.

**Induzione elettromagnetica**, Il fenomeno dell'induzione elettromagnetica ci permette di generare f.e.m. o tensioni elettriche

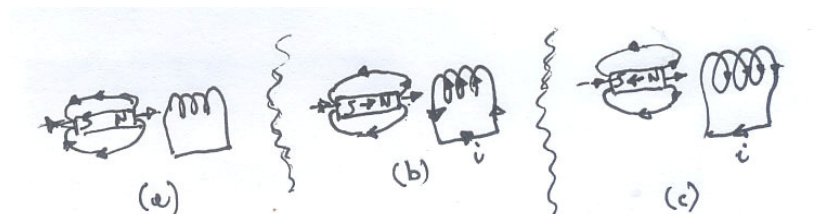
dai campi magnetici che vengono designate come f.e.m. o tensioni indotte. Questa generazione di tensioni indotte si ottiene facendo variare il numero o l'intensità le linee di flusso concatenate con il circuito immerso in un campo magnetico e si dice semplicemente facendo variare il flusso d'induzione che si concatena col circuito. Il campo magnetico, in cui è immerso il circuito, viene detto campo induttore: variando quindi la posizione del circuito o il campo si fa variare il flusso d'induzione che il circuito abbraccia nel campo.

Se prendiamo una sbarra magnetizzata e le si pone di fronte una bobina acui avremo applicato un voltmetro o un galvanometro, osserveremo: ogni qualvolta avvicineremo e viceversa la bobina alla sbarra magnetica , osserveremo degli impulsi di tensione che dureranno finché si avrà movimento fra essi. Se allontaniamo la bobina dalla sbarra, si avrà un impulso di segno opposto che si estinguerà alla fine del movimento. Se il circuito della bobina è aperto, avremo un f.e.m indotta ad ogni movimento tra la sbarra

magnetizzata e la bobina: chiudendo quest'ultima la f.e.m. indotta farà circolare una corrente (corrente indotta).

Possiamo terminare col dire che in tutti i fenomeni di induzione che si producono muovendo fra loro un campo magnetico e un circuito elettrico, l'impulso della tensione indotta nel circuito è proporzionale al flusso d'induzione che viene tagliato dal circuito durante lo spostamento.

**La legge di Lenz.** Il fenomeno dell'induzione elettromagnetica consente di generare corrente elettrica in modo molto semplice



e cioè spostando un circuito indotto in un campo induttore e quindi il processo di produzione di energia elettrica avviene con la spesa di un lavoro equivalente. Quanto detto ci porta a concludere che tutte le f.e.m. hanno verso tale da determinare una reazione che

contrasta e tende a rallentare il processo di induzione che le genera: si deve spendere un certo lavoro, per vincere la reazione che le genera, equivalente all'energia elettrica prodotta nel circuito indotto. La legge di Lenz lega quindi il principio di conservazione di energia applicato ai fenomeni della induzione elettromagnetica. E quindi considerando la fig.a , di sopra, in cui la bobina e la sbarra magnetizzata sono ferme e quindi nella bobina non c'è alcuna variazione di flusso e quindi non si genera alcuna tensione; se si avvicina la sbarra magnetizzata alla bobina, in essa aumenta il flusso abbracciato, per cui nasce una f.e.m. indotta, che se il circuito è chiuso, farà circolare una corrente indotta, di tal verso, da generare un campo indotto che tenderà a contrastare (repulsione) il campo magnetico che lo ha prodotto; nella fig.c, invece allontanando la sbarra magnetizzata , si avrà una riduzione del flusso abbracciato dalla bobina e quindi si genererà un f.e.m. indotta nella bobina, che presentando un circuito chiuso, farà circolare una corrente indotta di verso opposto al precedente e

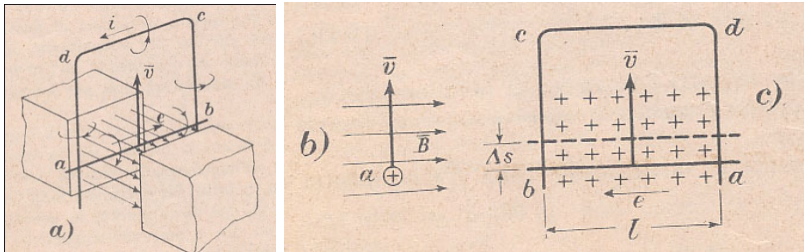
quindi si genererà un campo indotto, che si oppone all'azione, con l'attrazione, del campo induttore che lo ha prodotto. Per rappresentare quanto detto, diremo che le f.e.m indotte avranno verso positivo quando il verso del campo indotto è concorde col campo induttore e negativo se invece verso opposto: diremo che un aumento di flusso determina una tensione negativa mentre una diminuzione di flusso produce una tensione indotta positiva. Per quanto detto il valore medio della tensione indotta sarà definito dalla seguente relazione:

$$E_m = ( \Delta\Phi/\Delta t)$$

Da cui si deduce che la f.e.m. indotta, in un qualunque circuito, è uguale in valore ma di segno opposto alla variazione di flusso concatenato nell'unità di tempo e questo si identifica in valore con la velocità di variazione del flusso nel tempo.

**F.e.m. indotta in un conduttore rettilineo che si muove in un campo uniforme.** Un caso importante di induzione elettro-

magnetica è rappresentato da un conduttore rettilineo, di lunghezza  $l$ , che si muove in un campo uniforme. Se consideriamo il

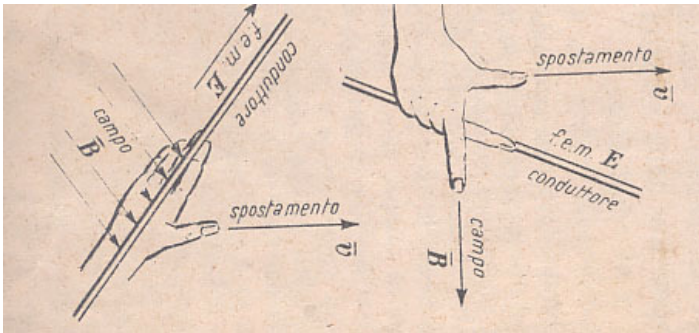


conduttore di lunghezza  $l$  che si muove con velocità  $v$  in senso normale al campo, vedi fig.a sopra. Se il conduttore  $l$ , posto tra i punti  $ab$ , si muove con una velocità  $v$ , percorrerà in un certo

tempo  $\Delta t$  uno spazio  $\Delta s$  così definito:  $\Delta s = v \times \Delta t$  e, in questo modo taglierà le linee di forza che attraversano l'area  $\Delta S = l \times \Delta s$ .

Quindi nel tempo  $\Delta t$  il conduttore di lunghezza  $l$  taglia il flusso d'induzione  $\Delta \Phi = B \times \Delta S = B \times l \times \Delta s$ ;

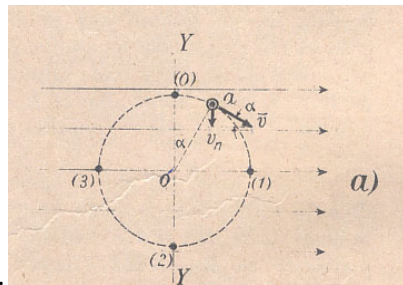
Di conseguenza nel conduttore si genera una f.e.m. indotta determinata in valore (mettendo da parte il segno) dalla seguente relazione:  $e = (\Delta\Phi/\Delta t) = (B \times l \times \Delta s) / \Delta t = B \times l \times v$ :



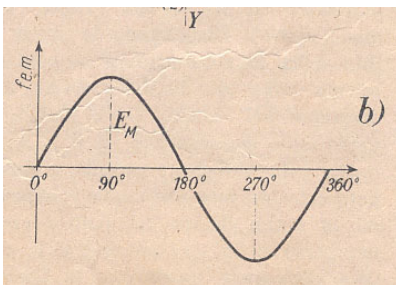
Per determinare il verso della f.e.m. indotta, si fa riferimento a Regole della mano destra come sopra riportato: si dispongono le prime tre dita della mano destra a 90 gradi fra loro, con l'indice rivolto nella direzione del campo, il pollice nel verso dello spostamento, e il medio che indica il verso della f.e.m.; disponendo la mano destra col pollice allargato nel verso dello spostamento, le altre dita disposte in modo che le linee di forza del campo entrino

per il palmo, vedi fig. sopra, la f.e.m. indotta è diretta nel verso delle dita distese lungo il conduttore.

Ora consideriamo il caso di un conduttore di sezione  $a$  che viene fatto girare attorno al suo asse parallelo e perpendicolare al campo



che si proietta in O, figura sotto.

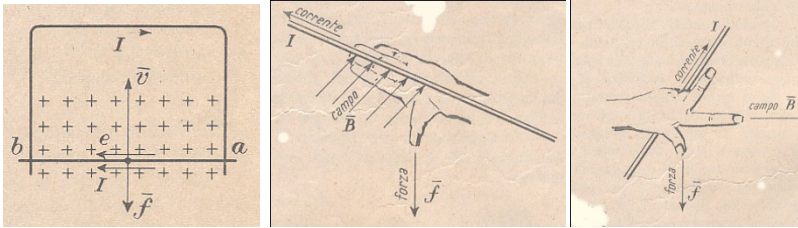


La componente della velocità normale al campo  $v_n = v \sin \alpha$  varia continuamente a causa della variabilità dell'angolo  $\alpha$  tra  $0^\circ$  e  $360^\circ$ .

Di conseguenza la f.e.m. indotta in un conduttore varierà come le

ordinate di una sinusoidale. La f.e.m. sarà quindi nulla nella posizione 0 ( $\alpha=0$ ), per poi crescere fino a raggiungere il valore massimo  $E_m=Blv$  che si verifica nella posizione 1 ( $\alpha=90^\circ$ ), per poi diminuire e annullarsi nella posizione 2 ( $\alpha=180^\circ$ ). In tutto il mezzo giro (0,1,2) il conduttore si muove verso il basso e applicando la regola della mano destra, la f.e.m. è rappresentata nel verso uscente (rappresentata con un punto al centro del conduttore). Nel mezzo giro successivo (2,3,0) avvengono le stesse vicende però essendosi invertito il verso del moto rispetto al campo, perché il conduttore si sposta dal basso verso l'alto, anche la f.e.m. risulta invertita: avendo rappresentata la f.e.m. del mezzo giro precedente con ordinate positive, essa sarà poi rappresentata nel mezzo giro successivo con ordinate negative.

**Le forze elettromagnetiche.** Consideriamo un conduttore rettilineo di lunghezza  $l$  immerso normalmente alle linee di forza di un campo uniforme di induzione  $B$ . Se si sposta normalmente al campo questo conduttore  $l$  con velocità  $v$ , si genera in esso



una  $f_{em}$ ,  $e=Blv$  che è diretta da  $a$  verso  $b$ , vedi foto sopra a sinistra. Se questo conduttore è aperto, non circola nessuna corrente e quindi il lavoro compiuto è nullo. Se il conduttore  $l$ , fa parte di un circuito, si genera una corrente  $I$  e quindi una potenza  $p=eI$ : di conseguenza nel tempo  $\Delta t$  si svilupperà nel circuito elettrico una energia elettrica  $\Delta W=eI \Delta t$ ; che si trasformerà in calore. E' chiaro che per poter determinare lo spostamento del conduttore  $\Delta s= v\Delta t$  si dovrà impegnare un lavoro meccanico  $L$  equivalente all'energia elettrica generata  $\Delta W$ .

Questo significa che per poter produrre lo spostamento considerato si deve vincere una forza  $f$  che si oppone al movimento e che è definita dalla seguente uguaglianza:

$$x \Delta s = e \times I \times \Delta t \quad \text{per cui} \quad f = (eI \Delta t) / \Delta s = (Blv \Delta t) / \Delta s$$

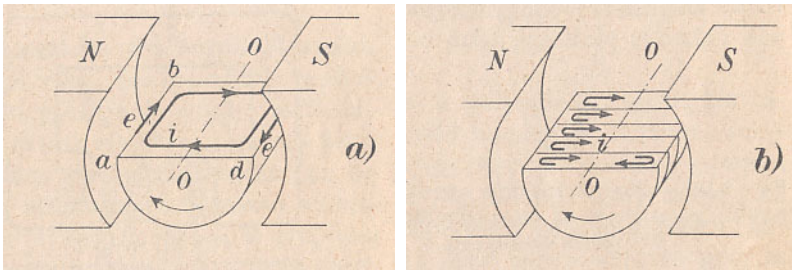
e quindi  $f = B \times l \times i$

questa forza  $f$  dipende dal fatto che il conduttore rettilineo  $l$  è immerso in un campo magnetico ed è attraversato da corrente: essa esiste non solo quando viene generata per induzione in seguito al movimento del conduttore interessato, ma anche quando viene fatta circolare nel conduttore una corrente prodotta da un generatore qualsiasi.

In pratica si può determinare il verso di questa forza con le regole della mano sinistra, vedi figure centrale e destra pagina precedente.

**Le correnti parassite o di Foucault.** Si definiscono come correnti parassite o di Foucault tutte le correnti indotte che si generano in seno alle masse conduttrici soggette a variazioni di flusso esse circolano in seno alla massa secondo percorsi chiusi. In pratica queste correnti parassite si generano in tutte le masse metalliche

*che sostengono gli avvolgimenti indotti delle macchine elettriche che ruotino o si spostino in un campo*



*magnetico. L'indotto portante di una macchina elettrica potrebbe ridursi a un cilindro di ferro rotante tra le espansioni polari N S, vedi figura a sopra: in tutte le generatrici del cilindro che vengono a tagliare le linee di forza del campo si generano delle f.e.m. indotte che generano delle correnti indotte secondo percorsi indicati in figura a. Per la legge di Lenz hanno l'effetto di frenare il movimento che le induce e l'energia di questa azione frenante si traduce in calore nella massa che quindi si riscalda: se il cilindro fosse realmente massiccio, vedi fig.a, la dissipazione di in energia in calore sarebbe così elevata che sarebbe impossibile il funzionamento della*

*macchina. Per ridurre questa perdita di energia a valori tollerabili, occorre interrompere la continuità del cilindro e al posto di esso si impiegano un pacco di lamiere, come in figura b;*

*questo pacco di lamiere è normale al campo e per ridurre le correnti parassite costringendole a richiudersi entro il sottile spessore delle lamiere interponendo fra quest'ultime un sottile foglio di carta.*

*Questo principio costruttivo viene impiegato in tutte le macchine elettriche le cui strutture magnetiche sono soggette a variazioni di flusso.*

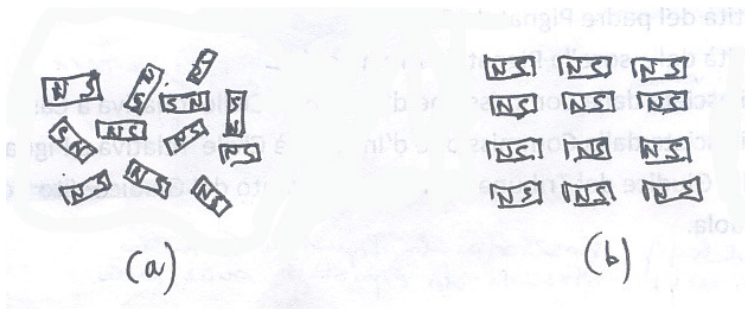
***Caratteristiche magnetiche dei materiali.*** Vediamo ora che *caratteristiche magnetiche dei materiali partendo dall'atomo . Come sappiamo alla base della materia abbiamo l'atomo che come il sistema solare ha un nucleo centrale che presenta un carica positiva, attorno al quale ruotano un certo numero di elettroni aventi carica negativa, Ciascun elettrone descrive attorno al nucleo un'orbita circolare o ellittica: possiamo assimilare l'orbita a una*

*spira percorsa da corrente elettrica dovuta all'elettrone ci circola nell'orbita ed essendo l'elettrone di carica negativa, la corrente circolerà in senso opposto all'elettrone stesso. Il valore della corrente sarà definito dal prodotto della quantità di carica che attraversa la sezione della spira nell'unità di tempo cioè*

*$I = ve$ ; dove  $e$  è la carica dell'elettrone e con  $v$  la sua frequenza di rotazione cioè il numero di orbite che l'elettrone descrive attorno al nucleo in un secondo. Quindi il moto di rotazione dell'elettrone dà luogo a un primo campo magnetico; se poi teniamo conto che l'elettrone ruota su se stesso si comporta esso stesso come un piccolo magnete permanente.*

*Esaminiamo ora il comportamento dei materiali paramagnetici. Questi a livello molecolare possiamo considerare costituiti da magnetini disposti in modo casuale per cui la risultante magnetica è nulla. Esistono tuttavia in natura dei materiali come la magnetite che sono magneticamente attivi perché nella loro struttura i ma-*

*gnetini sono orientati: in questo caso i campi magnetici delle singole molecole hanno tutti lo stesso verso e ne risulta un magne-te permanente. Tuttavia nella maggior parte dei materiali para-magnetici i magnetini sono orientati in modo casuale per cui si dice che il materiale è magneticamente nullo vedi fig.a sotto..*



*Se il materiale paramagnetico è sotto posto all'azione di un campo magnetico magnetizzante  $H$ , i magnetini si orienteranno nella direzione del campo, vedi fig.b.: al campo magnetizzante  $H$ , generato all'esterno, si sovrappone un campo magnetico  $H_m$ , dovuto ai magnetini del materiale che si orientano secondo una direzione preferenziale imposta non dalla struttura del materiale, ma dalla direzione del campo magnetizzante. Ne risulterà un campo*

magnetico  $H_r$  che sarà la somma del campo magnetizzante e del campo dovuto ai magnetini:  $H_r = H + H_m$

All'orientamento dei magnetini si oppongono i moti di agitazione termica delle molecole e dipende dall'intensità del campo magnetizzante: per valori non eccessivamente elevati di quest'ultimo avremo che all'aumentare di  $H$  aumenta  $H_m$  per cui avremo:

$H_m = \chi H$ ; dove  $\chi$  è un fattore numerico che dipende dalla natura del materiale interessato dal campo .chiamato suscettività magnetica del materiale; esso indica l'attitudine del materiale a magnetizzarsi e a rinforzare l'intensità del campo magnetico in cui viene immerso: essa è in genere minore dell'unità per cui il campo  $H_m$  è meno intenso del campo magnetizzante, per cui il campo risultante  $H_r$  sarà così definito:

$H_r = H + \chi H = H(1 + \chi)$  a cui corrisponde l'induzione magnetica

$B = \mu_0 \chi H_r = \mu_0(1 + \chi) H$  dove  $(1 + \chi) = \mu_r$ ;

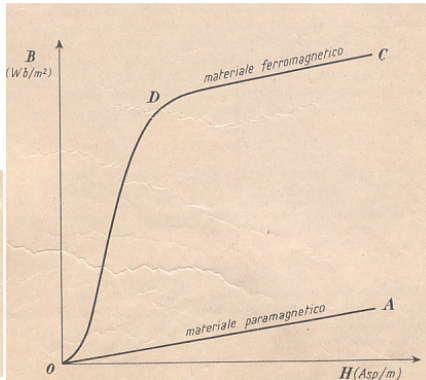
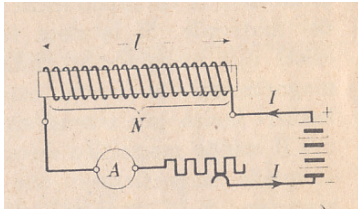
*Questa relazione mostra come si possa attribuire al materiale una permeabilità assoluta  $\mu = \mu_0(1 + \chi)$ ; per cui diremo semplicemente che l'induzione risultante  $B$  sarà così definita  $B = \mu H$ ;*

*In pratica per confrontare ogni materiale col vuoto  $\mu_0$  terremo conto della permeabilità relativa del materiale  $\mu_r$  in esame così definita  $\mu_r = (\mu / \mu_0)$ ; dove  $\mu$  è la permeabilità assoluta del materiale mentre  $\mu_r$  è la permeabilità magnetica relativa. La permeabilità relativa  $\mu_r = (1 + \chi)$  dei materiali paramagnetici è di poco maggiore all'unità.*

*Ora vediamo il comportamento dei materiali diamagnetici soggetti all'azione di un campo magnetizzante  $H$ . In questo caso avremo:*

*$H_m = \chi H$ ; dove però per i materiali diamagnetici che la costante  $\chi$  è negativa perché dovuta a un campo le cui correnti molecolari si oppongono al campo magnetizzante; la permeabilità magnetica assoluta sarà in questo caso:  $\mu = \mu_0(1 + \chi)$ ; ma essendo in questo caso  $\chi$  negativo  $\mu$  sarà minore di  $\mu_0$ .*

***I materiali ferromagnetici e le loro proprietà.*** Consideriamo ora le caratteristiche dei materiali ferromagnetici che sono in pratica quelli impiegati nelle applicazioni industriali perché hanno una permeabilità assoluta molto grande e può raggiungere anche i 100000. La causa di questa proprietà è dovuta alla disposizione dei magnetini: quelli molto vicini e contigui, si orientano, anche in assenza di un campo magnetizzante, con i loro assi paralleli, creando così dei volumi occupati da magnetini tutti orientati nella stessa direzione: questi volumi sono detti domini che possono contenere anche più di  $10^{10}$ . Ora in assenza di un campo magnetizzante i domini sono disposti nei materiali ferromagnetici in modo casuale così che il materiale è considerato magneticamente nullo. Ora consideriamo il caso di un solenoide di  $N$  spire e di lunghezza  $l$ , foto sotto a sinistra, in cui



si fa circolare una corrente  $I$  che determina un campo interno  $H$  così definito  $H=(NI)/l$ :

Il campo così ottenuto rappresenta il campo magnetizzante che agisce sul materiale su cui è avvolto il solenoide. Questo campo magnetizzante agendo sul materiale determina un flusso  $\Phi$  nel quale si sommano gli effetti del campo ,magnetizzante  $H$  dovuto alla corrente  $I$  del solenoide e quelli del campo dovuto alle correnti molecolari del materiale. Sopra a destra è indicato l'andamento dell'induzione  $B$  di un materiale paramagnetico di permeabilità

relativa  $\mu_r = 1$ ; al crescere del campo  $H$ , vedere curva  $OA$ , tenendo conto che la permeabilità magnetica nel vuoto  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  henry/m. La curva  $ODC$  rappresenta l'andamento dell'induzione  $B$  in funzione del campo magnetizzante  $H$  dei materiali ferro magnetici: in  $OD$  si ha un andamento molto ripido dovuto al fatto che con piccoli valori del campo magnetizzante si orientano i domini nella direzione del campo fino al ginocchio  $D$  (punto di saturazione del materiale), ove essi sono tutti orientati nella direzione del campo e quindi la curva dei materiali ferromagnetici assume lo stesso andamento dei materiali ferromagnetici. Dal punto  $D$  il campo magnetico  $H_m$ , dovuto all'orientazione dei domini, non subirà alcun aumento per quanto si incrementi il campo magnetizzante  $H$ . Se chiamiamo con  $H_s$  il campo magnetico costante, generato nel materiale in condizioni di saturazione. L'induzione magnetica  $B$  sarà definita:  $B = \mu_0(H_s + H) = \mu_0 H_s + \mu_0 H$ ; e si compone di un termine costante  $\mu_0 H_s$  e di un termine  $\mu_0 H$  proporzionale al campo

*magnetizzante e coincidente all'induzione  $B$  magnetica nel vuoto.*

*Questo spiega perché dopo il ginocchio  $D$  la curva assume*

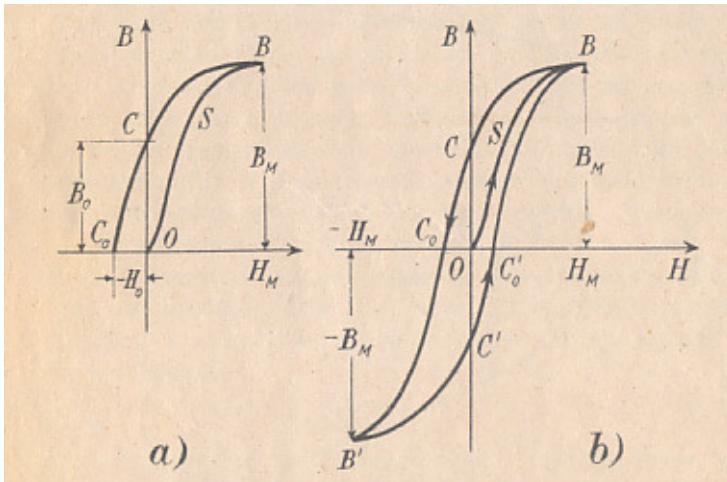
*un andamento lineare e parallelo rispetto alla curva dei materiali*

*paramagnetici. Ogni curva indicata prende il nome di curva di*

*magnetizzazione del materiale in esame.*

**ISTERESI MAGNETICA** *Le curve rappresentate sin'ora corrispondono a un processo di magnetizzazione iniziale che si ottiene facendo agire un campo magnetico su un nucleo di materiale che non*

sia stato mai magnetizzato o che non presenti tracce di ma-



gnetizzazioni precedenti. Nei processi successivi i materiali ferromagnetici risentono dei fenomeni di isteresi magnetica.

In particolare dalla figura a della pagina precedente si nota che da una linea iniziale OSB segue una linea di regresso che non ritorna all'origine ma scende da B a C: portando a zero il campo magnetizzante  $H$ , l'induzione magnetica  $B$  mantiene però dei valori notevolmente superiori rispetto alla fase iniziale.crescente: in questo

*modo con il campo magnetizzante  $H$  nullo, l'induzione magnetica  $B$  presenterà un valore  $B_0$  detto induzione residua.*

*In pratica alcuni domini rimangono ancora orientati e in questo consiste lo stato fisico dei magneti permanenti.*

*Per annullare questa induzione residua  $B_0$  occorre applicare un campo magnetico inverso crescente, fase da  $C$  a  $C_0$  della fig.a pagina precedente: il campo magnetico  $-H_0$  necessario ad annullare l'induzione residua  $B_0$  viene detto impropriamente forza coercitiva. Se ora aumentiamo gradualmente l'intensità del campo inverso i domini del materiale ferromagnetico si orienteranno nella nuova direzione del campo, opposto al precedente: l'induzione magnetica si inverte e viene rappresentata con ordinate negative - fase  $C_0$  a  $B'$  di figura b.. Quando il valore del campo magnetizzante inverso assumerà il valore  $-H_m$  eguale ed opposto al valore  $H_m$  della fase precedente,- l'induzione magnetica assume il valore  $-B_m$*

*eguale ed opposto a quello della fase di magnetizzazione precedente.*

*Infine il campo magnetico inverso viene condotto a 0, poi invertito e ricondotto al valore massimo della fase magnetizzante iniziale:*

*la linea di magnetizzazione, vedi figura b, si sposta simmetricamente da B' a B; si dice che il materiale ferromagnetico descrive un ciclo di isteresi simmetrico.*

**Caratteristiche dei materiali ferromagnetici.** *I metalli puri ferromagnetici sono il ferro, il cobalto, nichel e gadolinio.*

*Tra le moltissime leghe ferromagnetiche ricordiamo l'acciai al carbonio o legati escludendo alcuni acciai legati detti anche antimagnetici come gli acciai al nichel-cromo; le leghe in genere contengono almeno un elemento ferromagnetico; non si devono dimenticare le leghe di Heusler costituiti da elementi non*

ferromagnetici.

**Tabella di magnetizzazione dei materiali più usati**

Induzione magnetica B (Wb/m <sup>2</sup> )	Campo magnetizzante H in amperspire/cm e permeabilità relativa $\mu_r$										
	Ferro fucinato e acciaio fuso		Ghisa		Lamiere normali		Lamiere al silicio		Lamiere a cristalli orientati		Aria
	H (Asp/cm)	$\mu_r$	H (Asp/cm)	$\mu_r$	H (Asp/cm)	$\mu_r$	H (Asp/cm)	$\mu_r$	H (Asp/cm)	$\mu_r$	H (Asp/cm)
0,10	0,7	1140	2,0	400	0,45	1775	0,8	1000	—	—	800
0,20	0,9	1780	4,5	355	0,5	3200	1,0	1600	—	—	1600
0,30	1,0	2400	8,0	300	0,6	4000	1,25	1920	—	—	2400
0,40	1,2	2600	13,0	246	0,7	4570	1,45	2200	—	—	3200
0,50	1,4	2860	20,0	200	0,9	4450	1,6	2500	—	—	4000
0,60	1,7	2820	28,0	171	1,3	3690	1,8	2630	—	—	4800
0,70	2,2	2500	40,0	140	1,7	3290	2,0	2800	—	—	5600
0,80	2,7	2370	55,0	117	2,3	2780	2,5	2560	—	—	6400
0,90	3,2	2250	80,0	90	3,3	2180	3,1	2320	—	—	7200
1,00	4,0	2000	110,0	73	4,7	1700	4,0	2000	0,40	20000	8000
1,10	5,0	1750	150,0	58	6,3	1395	5,0	1760	0,58	15200	8800
1,20	6,2	1550	200,0	48	8,0	1200	7,0	1370	0,75	12800	9600
1,30	8,5	1230			10,5	990	12,0	867	0,88	11800	10400
1,40	12,0	930			13,5	830	23,0	487	1,00	11200	11200
1,50	20,0	600			18,0	567	40,0	300	1,40	8600	12000
1,60	35,0	365			31,0	413	75,0	171	4,50	2840	12800
1,70	60,0	226			52,0	262	140,0	97	16,00	850	13600
1,80	100,0	144			90,0	160	240,0	60	—	—	14400
1,90	160,0	95			148,0	103			—	—	15200
2,00	250,0	64			300,0	53			—	—	16000

*I materiali ferromagnetici comprendono le seguenti categorie:*

- 1) *Materiali magneticamente dolci, che hanno una piccola forza coercitiva e una elevata permeabilità iniziale, destinati alla costruzione di macchine elettriche e di elettromagneti;*

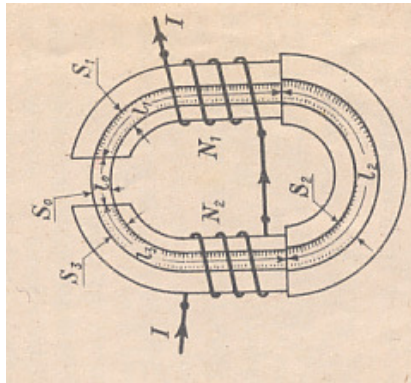
- 2) *Materiali magneticamente duri, con elevata forza coercitiva, per la costruzione di magneti permanenti:*
- 3) *Materiali ferromagnetici per applicazioni speciali.*

*L'induzione magnetica  $B$  sarà così definita  $B = \mu_0 \mu_r H$ ;*

*dove  $\mu_0 = 1,256 \times 10^{-6}$  henry/m è la permeabilità del vuoto,*

*$\mu_r$  è la permeabilità relativa del materiale e  $\mu$  è quella assoluta così*

*definita  $\mu = \mu_0 \times \mu_r$ .*



*Sopra: circuito magnetico*

**La legge di Hopkinson.** Considerando il circuito magnetico della pagina precedente, notiamo come figurativamente, il flusso d'induzione è costante nelle diverse sezioni e quindi

$$\Phi = B S = B_1 S_1 = B_2 S_2 = B_3 S_3 \dots\dots$$

L'induzione magnetica nelle diverse sezioni resta così definita:

$$B = (\Phi/S); \quad B_1 = (\Phi/S_1); \quad B_2 = (\Phi/S_2); \quad \dots\dots$$

L'intensità del campo magnetizzante nei diversi tronchi sarà: definita dal rapporto delle induzioni e le rispettive permeabilità assolute:

$$H_0 = B_0/\mu_0; \quad H_1 = B_1/\mu_1; \quad H_2 = B_2/S_2; \quad \dots\dots \text{ecc}$$

La tensione magnetica  $F$  relativo l'intero sviluppo del circuito magnetico sarà  $F = \sum N I = H_0 l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots \text{ecc}$

Dove  $l_0, l_1, l_2, \dots \text{ecc}$  sono le linee medie dei diversi tronchi del circuito magnetico.

La tensione magnetica totale si può esprimere per quanto detto così

$$F = \sum NI = \Phi \left[ \frac{l_0}{\mu_0 S_0} + \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \dots \right].$$

I termini tra le parentesi rappresentano le resistenze magnetiche o riluttanze magnetiche e quindi

$$R_0 = \frac{l_0}{\mu_0 S_0}; \quad R_1 = \frac{l_1}{\mu_1 S_1}; \quad R_2 = \frac{l_2}{\mu_2 S_2}; \quad R_3 = \frac{l_3}{\mu_3 S_3}; \quad \dots \text{ ecc}$$

E quindi la riluttanza totale  $R$  sarà  $= R_0 + R_1 + R_2 + \dots$  ecc

La tensione magnetica o forza magnetomotrice (f.m.m.) sarà così definita  $F = \sum NI = \Phi R$ , essa genera il flusso  $\Phi$  vincendo la riluttanza  $R$  come in un circuito elettrico la f.e.m. genera una corrente elettrica vincendo la resistenza elettrica del circuito.

In questo consiste la legge di Hopkinson che dice: in un circuito magnetico per produrre un flusso  $\Phi$  occorre una forza magnetomotrice  $F = \sum NI$  che è uguale al prodotto di questo flusso per la

riluttanza  $R$  dell'intero circuito magnetico; quindi la legge di Hopkinson è simile alla legge di ohm nei circuiti elettrici.

Occorre osservare che la riluttanza nei materiali magnetici dipende oltre che dalla natura del materiale, dai valori assunti dall'induzione magnetica; la riluttanza invece rimane costante in quei tratti che si sviluppano nell'aria o nei materiali non ferromagnetici in cui la permeabilità  $\mu$  rimane uguale a quella del vuoto che ricordiamo è  $\mu_0 = 1,256 \times 10^{-6}$  henry/m-

Nel caso di un solenoido toroidale, le linee di forza si sviluppano all'interno in forma di linee concentriche senza dispersione di flusso per cui si dice che si è in presenza di un campo magnetico perfetto. I

Il solenoide può essere avvolto indifferentemente in aria o su materiale ferromagnetico. Ogni sezione dell'anello è attraversato dallo stesso flusso  $\Phi$  così definito  $\Phi = NI/R$

Dove  $R$  è la riluttanza del circuito magnetico toroidale così definita

$R = l / (\mu S)$ ; dove  $l$  è la lunghezza della linea di forza media;

$\mu$  è la permeabilità assoluta così definita  $\mu = \mu_0 \times \mu_r$ ;

dove  $\mu_0$  è la permeabilità dell'aria pari a  $\mu_0 = 1,256 \times 10^{-6}$  henry/m

la lunghezza  $l$  si misura in metri mentre la sezione  $S$  in  $m^2$ .

La riluttanza  $R = (NI / \Phi)$  sarà quindi espressa in (amperspire/weber)

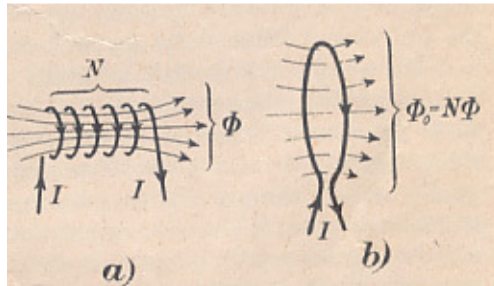
Essa esprime quindi il numero di amperspire e cioè la f.m.m. occorrenti per generare il  $\Phi$  di 1 weber. E' chiaro che se si vuole avere un flusso elevato con il minor numero possibile di amperspire occorre ridurre la riluttanza del circuito magnetico.

**Energia elettrocinetica di una corrente.** Ogni campo magnetico porta connessa e diffusa nel mezzo in cui si svolge una determinata energia, che viene espressa dalla seguente relazione  $w = (1/2) B H$ ;

In generale l'energia che viene accumulata in un campo magnetico

qualunque è rappresentata dal semiprodotto della f.m.m. o tensione magnetica  $F$  per il flusso totale  $\Phi$  del campo

cioè  $W=(1/2) \Phi N I$ .



Si osserva che agli effetti dell'energia accumulata nel campo, un circuito in cui si abbia un flusso  $\Phi$  che si concatena N volte dalla corrente I, è del tutto equivalente a un altro circuito in cui il flusso  $\Phi_c = \Phi$  si concatena con la stessa corrente una sola volta. Al flusso  $\Phi_c$  si dà il nome di flusso concatenato totale. Questo flusso è proporzionale alla corrente che lo ha generato e dipende dalla conformazione del circuito elettrico e dalla natura del mezzo in cui si svolge il campo. Quindi avremo semplicemente  $\Phi_c = N \Phi = L I$

dove  $L$  è l'induttanza del circuito relativa al flusso concatenato che il circuito genera quando è percorso dalla corrente di 1 A.

L'induttanza si misura in henry che si ottiene da (weber/Ampere) ed essendo il weber per definizione 1 Volt secondo avremo alla fine (volt secondo/Ampere) = ohm secondo = henry. Si dirà quindi che un circuito presenta l'induttanza di 1 henry quando la corrente di 1 ampere vi produce un flusso concatenato di 1 weber. Ponendo ora  $\Phi = LI$ ; si ottiene l'energia del campo magnetico nella forma  $W = (1/2) LI^2$  ove si nota che l'energia del campo magnetico è proporzionale al quadrato della corrente che lo produce. Questa energia viene detta energia intrinseca della corrente. Essa si va ad accumulare nel campo magnetico quando la corrente si costituisce e viene poi restituita quando la corrente si interrompe e il campo magnetico si annulla. L'energia di un campo magnetico di una corrente si può paragonare all'energia cinetica di un corpo in moto, che la assume all'atto dell'avviamento e finché esso accelera per restituirla quando rallenta fino a fermarsi. A causa dell'energia che si

accumula nel campo magnetico la corrente assume un carattere inerziale e quindi l'energia del campo magnetico viene detta energia elettrocinetica della corrente. Per questo motivo una corrente non può costituirsi istantaneamente nel circuito e richiede un periodo transitorio di avviamento, durante il quale il generatore è impegnato a produrre l'energia dissipata per l'effetto joule in calore più l'energia che si accumula nel campo magnetico che contorna il circuito. Allo stesso modo, interrompendo il circuito, la corrente tende a zero gradualmente perché deve restituire tutta la corrente accumulata: per questo interrompendo un circuito scocca la scintilla attraverso la quale si libera l'energia accumulata nel campo magnetico. Questa energia elettrocinetica dipende dalla corrente e dalla induttanza del circuito che essa percorre: si diranno molto induttivi quei circuiti che hanno un elevato valore di induttanza e poco induttivi quei circuiti che hanno una induttanza piccola. Il carattere induttivo di un circuito dipende dal flusso concatenato totale che esso genera quando è percorso

dalla corrente. Sono molto induttivi quei circuiti con molte spire, di grande sezione, avvolte su materiali magnetici avente grande permeabilità e bassa riluttanza mentre poco induttivi, quei circuiti con poche spire, piccola sezione, avvolte in aria.

Si possono realizzare circuiti anti-induttivi con due fili di andata e ritorno molto aderenti in modo che il flusso concatenato si annulli.

Avendo un circuito composto da  $N$  spire e di riluttanza  $R$ , il flusso sarà così definito  $\Phi = N I/R$ ; mentre  $\Phi_c = N \Phi = (N^2 I)/R$  e quindi l'induttanza  $L = \Phi_c/I = N \Phi/I$  e quindi  $L = N^2/R$  per cui l'induttanza  $L$  di un circuito è proporzionale al quadrato del numero di spire e inversamente proporzionale alla riluttanza  $R$  del circuito stesso. Occorre ricordare che nei circuiti avvolti su materiali ferromagnetici il valore dell'induttanza dipende dal grado di saturazione raggiunto perché varia la permeabilità magnetica  $\mu$  che interviene nel calcolo. Della riluttanza. L'induttanza di conseguenza ha un valore costante solo nei circuiti avvolti in aria: nei circuiti avvolti su

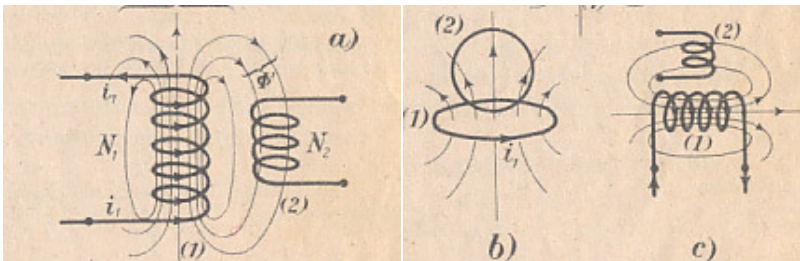
materiali ferromagnetici, l'induttanza varia al variare della corrente e questo in particolare se viene raggiunta la saturazione. I valori dell'induttanza variano da qualche decina di henry, circuiti con molte spire avvolte attorno grossi nuclei magnetici a valori di millihenry per piccoli circuiti avvolti in aria. Nelle linee elettriche costituite da un filo di andata e ritorno, essa assume il valore di 1 milli-henry.

## **IL FENOMENO DELL'INDUZIONE ELETTROMAGNETICA IN**

**PRESENZA DI CAMPI VARIABILI.** Consideriamo un circuito costituito da una spira. E' chiaro che se l'induzione  $B$  subisce nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  un incremento (positivo o negativo) anche il flusso  $\phi$  subirà una variazione  $\Delta\phi = S \Delta B$ : anche in questo caso la variazione di flusso abbracciato dalla spira determina in essa una f.e.m. il cui valore medio è così definito:  $E_m = - (\Delta\phi/\Delta t)$ ; per i valori

istantanei si passa al limite per  $\Delta t$  tendente a zero e si scrive quindi  $e = - (d\phi/dt)$ . Se la spira è interrotta la f.e.m. si manifesta come una tensione misurabile ai capi della spira: se essa viene chiusa farà circolare una corrente. Questa f.e.m. indotta permane fino a che c'è variazione di flusso e cessa di esistere quando manca la causa  $\Delta\phi$ . Il verso di queste f.e.m. si calcola con la legge di Lenz ed è quindi tale da agire a contrasto della causa che le genera.

### I FENOMENI DI MUTUA INDUZIONE.



Sopra: a) accoppiamento parziale; b) e c) accoppiamento nullo

L'entità dei fenomeni di mutua induzione che si possono esercitare tra due circuiti, dipende dal maggior o minor flusso che uno di essi invia a concatenarsi con l'altro. Considerando due circuiti qualsiasi, può succedere che a causa della loro forma e posizione, nessuna linea di induzione si concateni con il secondo circuito o che il secondo circuito si concateni in parte o totalmente con tutte le linee di induzione generate dal primo. Se accade che invertendo le funzioni dei circuiti indicati, si verificano uno dei tre casi indicati si terminerà col dire che l'accoppiamento magnetico tra i due circuiti è nullo, parziale o perfetto. Il concatenamento perfetto si ottiene soltanto disponendo i due circuiti uno sull'altro perfettamente aderenti per tutto il loro sviluppo. In pratica il calcolo del flusso che uno dei due circuiti invia sull'altro è possibile in pochi casi. In tutti gli altri casi il problema si risolve mediante un rilievo sperimentale diretto. Si prende come riferimento il flusso che si concatena con uno dei due circuiti quando l'altro è percorso dall'unità di corrente: il valore di questo flusso viene assunto per definire il coefficiente di mutua

induzione tra i due circuiti indicato con la lettera  $M$ . Quando questo circuito sarà percorso da una corrente  $i_1$ , il flusso che esso in via a concatenarsi col secondo sarà così definito  $\Phi_{12} = M i_1$ .

**Fenomeni i autoinduzione.** E' chiaro che ogni circuito percorso da corrente si concatena col flusso d'induzione da esso generato il quale si costituisce, varia ed estingue con la corrente. Ne risulta che ad ogni variazione di corrente corrisponde una variazione di flusso concatenato col circuito stesso: di conseguenza in questo circuito si genera una f.e.m. che per la legge di Lenz si oppone alla variazione di corrente che la induce. In questo consiste il fenomeno di autoinduzione che rappresenta quindi l'effetto di induzione elettromagnetica che ogni circuito esercita su se stesso come conseguenza delle variazioni di corrente che lo percorrono. Ora sappiamo che il flusso concatenato  $\Phi$  è così definito  $\Phi = L i$ ;

Se la corrente  $i$  in un certo tempo  $dt$  subisce una variazione  $di$ , il flusso concatenato  $\phi_c$  col circuito varia della quantità

$d\phi_c = L di$ . Per questo motivo si genera nel circuito una f.e.m. così definita  $e = -(d\phi_c/dt) = -L (di/dt)$ .

Concludendo, in un circuito percorso da corrente variabile si genera grazie al fenomeno dell'autoinduzione, una f.e.m. che in ciascun istante è determinata dal prodotto dell'induttanza del circuito per la derivata rispetto al tempo della corrente che la percorre cambiata di segno. L'induttanza  $L$  viene così chiamata coefficiente di autoinduzione.

