

MAGNETISMO

Premessa

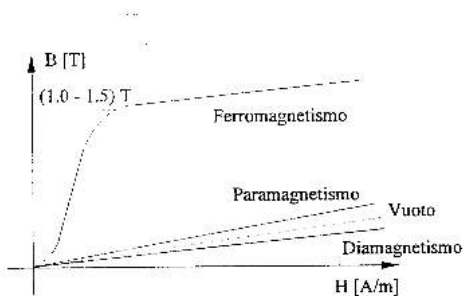
Le proprietà magnetiche di alcuni materiali erano già note agli antichi greci, ai romani e ai cinesi: presso questi popoli infatti, era conosciuta la capacità dell'ossido di ferro chiamato magnetite di attrarre la limatura di ferro. Essi inoltre osservarono che una sbarretta di ferro a contatto con frammenti di magnetite si magnetizza, cioè diventa un magnete naturale: alle estremità si producono un polo nord e un polo sud magnetici. Poli simili si respingono, mentre poli diversi si attraggono. Non esistono poli magnetici isolati: spezzando in due parti un magnete se ne ottiene uno nuovo, caratterizzato a sua volta da due polarità.

Anche l'uso della bussola era noto sin dall'antichità, tra gli Arabi e i Persiani, ma chi per primo considerò la Terra paragonabile ad un vero e proprio magnete fu l'inglese Sir. William Gilbert nel 1600. La configurazione del campo magnetico terrestre (CMT) nella sua esatta forma si deve a K.F. Gauss (1832) che tracciò le linee di forza del campo. Si riconobbe quindi che il 99% del campo magnetico è dovuto a cause interne alla Terra; secondo alcuni autori il CMT sarebbe rappresentabile da un dipolo centrale e da otto dipoli radiali collocati a 4800 Km di profondità (teoria della dinamo). Se la Terra venisse considerata come un semplice dipolo, l'andamento delle linee di forza indica il cammino che farebbe, verso il polo N, un piccolo magnete libero di muoversi nello spazio; un ago magnetico si disporrebbe parallelo alle linee di forza in quel punto, quindi sarebbe verticale ai Poli e orizzontale all'Equatore magnetico.

Attualmente, l'andamento del CMT ci è noto grazie a una infinità di misurazioni fatte a terra, da aerei e da satelliti. Si è visto che i Poli magnetici non coincidono con quelli geografici, ma formano un angolo tra gli assi di rotazione e quello magnetico (questo asse geomagnetico risulta considerando il CMT dipolare) di $11^{\circ}30'$.

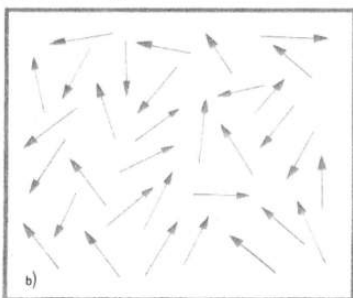
I materiali, in relazione alle loro proprietà magnetiche, possono essere di tre tipi:

- **Diamagnetici:** il loro comportamento in presenza di campo magnetico è lineare nella relazione che lega induzione e campo magnetico e la loro permeabilità magnetica relativa è sempre costante e di poco inferiore ad 1 (valore nel vuoto).
- **Paramagnetici:** si comportano come i diamagnetici, ma hanno una permeabilità magnetica relativa di poco superiore ad 1.
- **Ferromagnetici:** non si comportano in modo lineare e la loro permeabilità magnetica è funzione del campo magnetico. La permeabilità magnetica relativa è molto maggiore di 1.



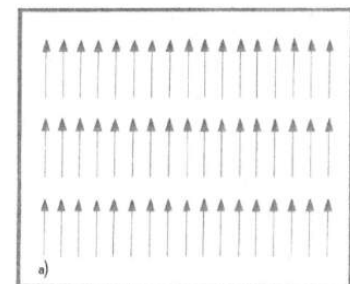
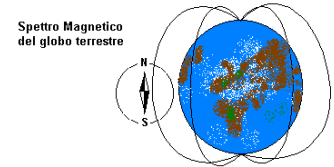
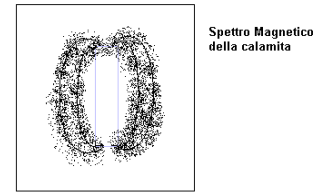
atomici tendono ad allinearsi lungo la direzione del campo applicato, rinforzandolo. I materiali paramagnetici contengono solitamente metalli di transizione o elementi delle terre rare, i cui atomi sono caratterizzati dalla presenza di elettroni spaiati. I fenomeni paramagnetici nei non-metalli dipendono generalmente dalla temperatura; più precisamente, l'intensità del momento magnetico indotto è inversamente proporzionale alla temperatura. Ad alte temperature, infatti, l'allineamento dei momenti magnetici atomici della sostanza lungo la direzione del campo magnetico è ostacolato dal moto vibrazionale di agitazione termica degli atomi stessi.

Una sostanza si dice ferromagnetica se è in grado di conservare un momento magnetico anche una volta rimosso il campo magnetizzante. Questo effetto è il risultato di una forte interazione tra i momenti magnetici atomici della sostanza. I materiali ferromagnetici sono divisi in piccole aree chiamate domini; all'interno di ogni dominio i momenti magnetici sono allineati in un'unica direzione.



In presenza di un campo magnetico esterno i domini, che normalmente hanno un'orientazione casuale, si allineano secondo la direzione del campo applicato, determinando la magnetizzazione del materiale. L'energia spesa per smagnetizzare il materiale ferromagnetico magnetizzato si manifesta in un ritardo nella risposta, detto isteresi.

Nei materiali ferromagnetici, i momenti magnetici dei singoli atomi tendono ad allinearsi tutti nella stessa direzione, esiste cioè una magnetizzazione spontanea presente anche in assenza di campo esterno applicato (a).



MAGNETISMO

Esiste però una temperatura sopra la quale i momenti magnetici perdono la loro disposizione ordinata e quindi anche la magnetizzazione spontanea (b).

Essi, successivamente, a seguito del raffreddamento, si allineeranno parallelamente ad un eventuale campo esterno, comportandosi come un materiale paramagnetico. Questa temperatura, che discrimina la zona con proprietà ferromagnetiche da quella con proprietà paramagnetiche, prende il nome di temperatura o punto di Curie ed è caratteristica di ogni materiale (per il ferro metallico la temperatura di Curie è di circa 770 °C).

In generale, possiamo dire che, se immergiamo un ago magnetizzato all'interno di un campo magnetico, esso tende ad orientarsi in modo da sistemarsi parallelamente alle linee di forza del campo (nei fenomeni su grande scala) cioè in modo da essere tangente alla linea di forza passante per il suo baricentro (nei fenomeni su piccola scala).

Se chiamo con H l'intensità del campo magnetico, l'ago magnetizzato di massa m , lunghezza l , formante l'angolo α rispetto alla direzione del campo magnetico H sarà soggetto all'azione di una coppia di forze di intensità pari a:

$$F = \pm m H$$

Il Momento Direttivo viene identificato dalla relazione:

$$M = F b$$

Sostituendo si ricava che:

$$M = m H l \sin\alpha$$

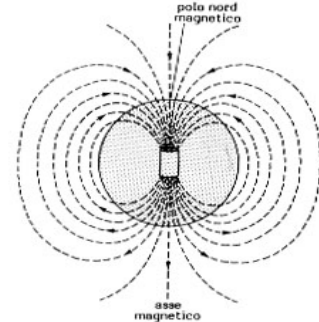
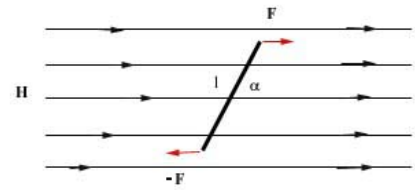
$$M = \mathfrak{N} H \sin\alpha$$

dove risulta che $\mathfrak{N} = (m l)$ definisce il Momento Magnetico.

Se a questo punto si lasciasse andare l'ago, lo si vedrebbe oscillare attorno alla posizione finale di equilibrio. Il periodo di oscillazione è dato dalla relazione:

$$T = 2\pi [k/(\mathfrak{N} H)]^{1/2}$$

dove k esprime il momento di inerzia di massa dell'ago rispetto al punto di sospensione.



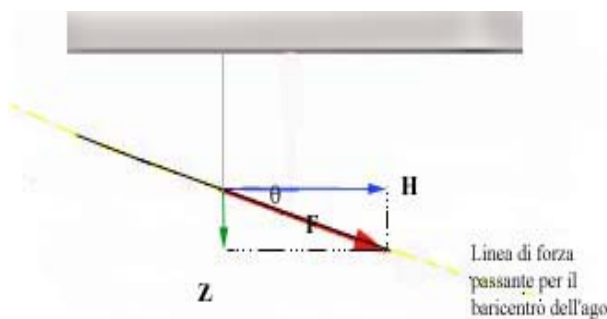
Campo Magnetico Terrestre

Il campo magnetico terrestre viene quindi identificato dai seguenti parametri:

POLI MAGNETICI
LINEE DI FORZA
INTENSITA' DEL CAMPO

L'intensità del campo che si indica con F è scomponibile in due componenti:

Componente Orizzontale del CMT (H)
Componente Verticale del CMT (Z)



L'angolo θ prende il nome di Inclinazione Magnetica; conoscendo questo angolo per tramite di banali nozioni di trigonometria, è possibile ricavare che:

$$H = F \cos\theta$$

$$Z = F \sin\theta$$

Si parlerà di Equatore Magnetico se $\theta = 0^\circ$; in particolare si avrà che $H = F$ e che $Z = 0$. In questa zona ed in prossimità di essa, le bussole subiranno la massima intensità del CMT e saranno pertanto più efficaci.

Si parlerà di Polo Magnetico allorché $\theta = 90^\circ$. In questo caso risulterà che $H = 0$ e $Z = F$.

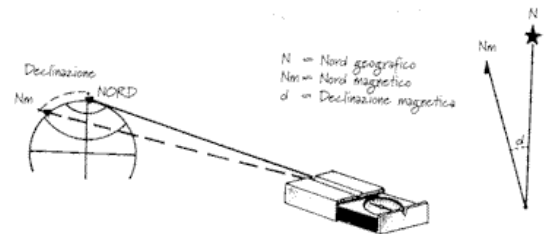
L'angolo compreso tra il Nord geografico (o Nord Vero) e il Nord

Magnetico, prende il nome di Declinazione Magnetica (d).

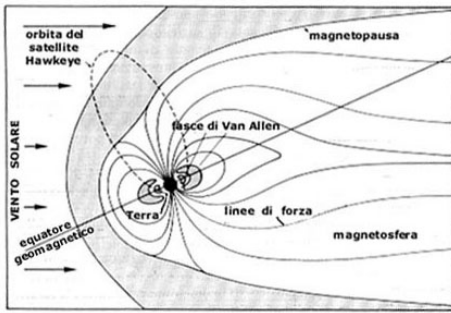
Il Campo Magnetico Terrestre (CMT) è soggetto a variazioni che possono essere: di breve periodo, secolari, di lunghissimo periodo. Le variazioni di breve periodo possono avvenire in poche ore o in anni, e sono collegate alle interazioni tra il campo magnetico interno alla terra e degli strati fortemente conduttivi nell'atmosfera. Possiamo suddividere queste variazioni in regolari e irregolari.

Tra le prime vi sono quelle giornaliere, determinate dalle azioni "mareali" del Sole e della Luna sulla ionosfera terrestre (strato ionizzato presente nell'atmosfera tra i 50- 60 Km e 400 Km di altitudine), quella mensile (ogni 27 giorni circa) che è messa in relazione con particolari campi magnetici del Sole.

Tra quelle irregolari vi sono quelle che prendono il nome di tempeste magnetiche, che sono collegate ad attività solari particolarmente intense dette "brillamenti solari": l'arrivo di plasma solare ad elevata velocità esercita grosse influenze sulla ionosfera, provocando disturbi alle radiocomunicazioni, che infatti usano la ionosfera per rimbalzare e tornare verso terra. Le particelle emesse dal Sole sono principalmente protoni ed elettroni e il CMT impedisce a queste particelle di colpire direttamente la superficie della Terra, che rimane protetta in una cavità detta magnetosfera. La magnetosfera ha una struttura interna molto complessa e in essa furono scoperte nel 1958 le "fasce di Van Allen". Nella figura è rappresentata la magnetosfera creata dal campo geomagnetico.



MAGNETISMO



Le variazioni secolari, al contrario, sono diverse da luogo a luogo anche considerevolmente e i loro aspetti più interessanti sono una costante e lenta diminuzione dell'intensità del campo, del dipolo principale e una migrazione verso ovest del campo ad un ritmo di una frazione di grado ogni anno. Questo fa pensare che le variazioni secolari del campo siano dovute a variazioni che avvengono entro la Terra a grandi profondità, diversamente da quelle a breve periodo.

Le variazioni che avvengono in lunghissimi periodi avvengono con un ritmo di alcune ogni milione di anni e sono state notate dallo studio delle rocce, in particolare di quelle vulcaniche effusive. Già nel secolo scorso ci si era accorti che le rocce vulcaniche presentano una forte magnetizzazione, che si supponeva

acquisita al momento del raffreddamento. Questa teoria è stata successivamente confermata dagli studi di Curie (scaldando un materiale magnetico, questo, ad una certa temperatura, detta "punto di Curie", inferiore al punto di fusione, si smagnetizza).

Quindi una lava che si raffredda, quando la sua temperatura scende al di sotto del "punto di Curie", conserva dentro di sé una magnetizzazione (chiamata magnetizzazione termorimamente) la cui orientazione è determinata dalla orientazione del CMT al momento in cui avviene il raffreddamento. La magnetizzazione termorimamente è molto stabile e si conserva anche se il campione di roccia è sottoposto a moderati disturbi meccanici, magnetici e termici; è dovuta all'orientazione che assumono i numerosi minerali ferromagnetici (magnetite, che ha il punto di Curie a 580°, o l'ematite con punto a 680°C) diffusi nella roccia quando questa non è ancora completamente solidificata. In conclusione le rocce vulcaniche conservano "fossilizzate" le direzioni del CMT e, misurando questo campo con particolari magnetometri come quello astatico o a rotazione e conoscendo l'età della roccia, possiamo sapere quali erano le caratteristiche del CMT in quel punto (dove è stato prelevato il campione di roccia) e in quell'età. Anche le rocce sedimentarie, deposte in acque tranquille, conservano una piccola magnetizzazione (detta detritica residua), che può essere misurata con strumenti molto raffinati.

È stato notato studiando una serie di strati di lava (lave terziarie e pleistoceniche dell'Islanda da ~65 a ~2 milioni di anni fa), con il più vecchio posto alla base, che il CMT ha avuto una serie di inversioni dei Poli magnetici; queste inversioni sono state notate anche in lunghe "carote" di sedimenti oceanici aventi un magnetismo detritico residuo. Si è potuto quindi stabilire una "scala cronologica della polarità geomagnetica", detta anche scala dei tempi geomagnetici, con "eventi" di inversione di polarità ogni 10.000 - 100.000 anni e "epoche" di polarità dell'ordine di 100.000 - 1.000.000 di anni. Naturalmente in ciò va considerato anche il processo di deriva dei continenti.

Ma qual è l'origine del CMT? Ancora non si sa con certezza, ma non si può pensare che sia causato dalla presenza di grosse quantità di ferro e nichel nel centro della Terra, poiché questi minerali si troverebbero al di sopra del punto di Curie. C'è un qualche accordo nel considerare il CMT dovuto a correnti elettriche in movimento lungo il nucleo esterno, la cui conducibilità elettrica deve essere altissima. Bullard nel 1948 propose il modello della "dinamo autoalimentata", qui esposta molto semplicemente: se si fa ruotare un disco metallico in un campo magnetico, si genera una forza elettromotrice (differenza di potenziale) tra l'asse rotante ed i bordi del disco; se si aggiunge una spira, attorno all'asse rotante fluirà una corrente; se la spira è posta coassialmente all'asse rotante, la corrente in essa circolante indurrà un campo magnetico, che andrà sempre più a rafforzare quello originario fino a stabilizzarsi ad un livello che dipende dalla velocità di rotazione del disco. Resta ancora da spiegare il campo magnetico iniziale, che alcuni pensano sia stato fornito da parte del campo magnetico del Sole.

Conseguentemente, anche la declinazione magnetica varia nel tempo. Ogni località è caratterizzata da un valore di declinazione specifico. Tale valore, che viene calcolato dalle università e dagli istituti di ricerca, si trova sulla carta nautica unitamente alle indicazioni relative alle sue variazioni annue.



Campo Magnetico di Bordo

Il magnetismo di bordo è provocato dai ferri di bordo, i quali possono essere distinti in : Ferri Dolci

Ferri Duri

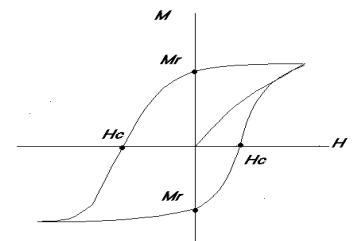
I due tipi di ferro si caratterizzano per il fatto che presentano cicli di isteresi (o di magnetizzazione) diversi.

I primi presentano infatti un ciclo stretto, i secondi presentano un ciclo più ampio (come per esempio quello in figura). Ovviamente, l'estremo dei ferri dolci è quello che non ha magnetismo residuo, mentre l'estremo dei ferri duri è quel ferro che presenta forza coercitiva infinita, cioè ferri che una volta magnetizzati non sono più smagnetizzabili. Appare chiaro che in natura questi due estremi non esistono.

In conclusione a bordo ci si confronta con i seguenti campi magnetici:

- Campo Magnetico Permanente
- Campo Magnetico Temporaneo
- Campo Magnetico Subtemporaneo

Il primo è dovuto ai ferri duri, il secondo ai ferri dolci, il terzo al ritardo dell'effetto rispetto all'istante in cui è avvenuta la causa (per esempio un incendio, o lavori di un certo tipo). Quest'ultimo campo magnetico non dipende né dai ferri duri né da



MAGNETISMO

quelli dolci. Generalmente, poiché è difficile da calcolare (il ritardo può superare anche un anno) e poiché di minima intensità, il campo subtemporaneo viene trascurato.

Vale la pena a questo punto introdurre alcune approssimazioni per semplificare lo studio del magnetismo navale. Innanzitutto, la nave verrà considerata a ponti orizzontali, cioè in assetto trasversale e longitudinale dritto.

Verrà trascurato l'effetto del campo magnetico subtemporaneo, considerato costante ed immutabile l'effetto dei ferri duri, mentre per i ferri dolci il loro effetto verrà considerato proporzionale alla causa (il che equivale ad assumere il ciclo di isteresi come una retta di equazione $B = \mu H$) In questo modo, il campo definito dai ferri dolci non raggiungerà mai la saturazione.

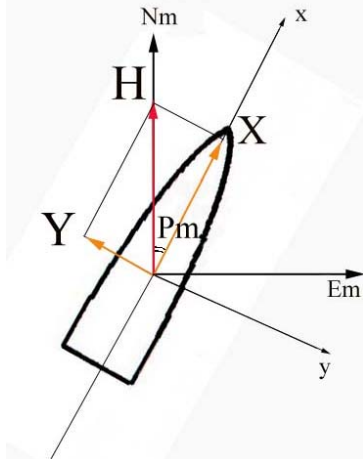
Come in tutti i sistemi fisici, anche nel magnetismo è necessario introdurre un sistema di riferimento. Tale sistema può per esempio essere riferito alla Terra. In questo caso una possibile terna cartesiana ortogonale prende come riferimento le direzioni Nord/Sud, Est/Ovest e la direzione della verticale (alto/basso). Se invece il sistema di riferimento viene riferito alla nave, ecco che le direzioni del sistema di riferimento saranno identificate nella direzione prora/poppa, dritta/sinistra, alto/basso. In particolare, vengono scelte positiva rispettivamente le direzioni Nord, Est e Basso per la prima terna e prora, dritta e basso per la seconda.

Nello scomporre le forze relative al campo magnetico, ci si troverà pertanto ad avere a che fare con i seguenti tipi di forze:

- forze fisse rispetto l'orizzonte
- forze fisse rispetto alla nave
- forze mobili rispetto l'orizzonte
- forze mobili rispetto alla nave

Equazioni di Poisson e scomposizione delle componenti

Cerchiamo ora di scomporre le forze del campo magnetico nel sistema di riferimento di bordo. Ricaveremo le equazioni di Poisson.



Innanzitutto, si può osservare che la componente orizzontale del CMT può essere scomposta nelle componenti X per prora e Y per dritta (si noti che Y è negativa in quanto risulta diretta verso sinistra), relativamente ad una certa prora magnetica e, in base alla trigonometria, risulta:

$$X = H \cos P_m$$

$$Y = H \sin P_m$$

La terza componente è infine invariante, è diretta verso il basso ed è Z. Essa risulta costante, avendo noi ipotizzato la nave a ponti orizzontali.

Passando ora alle componenti del magnetismo di bordo, si può osservare che il campo magnetico permanente, quello che "nasce" con la nave, sarà caratterizzato da componenti costanti nelle tre direzioni e cioè:

$$X = P \text{ (agenti verso prora)}$$

$$Y = Q \text{ (agenti verso dritta)}$$

$$Z = R \text{ (agenti verso il basso)}$$

Accanto al campo magnetico permanente, occorre poi considerare il campo magnetico temporaneo, che, proprio per questa sua caratteristica, crea numerosi problemi. In particolare sarà possibile identificare e raggruppare i ferri nel seguente modo:

- Ferri Longitudinali ad effetto Longitudinale (**ax**)
ad effetto Trasversale (**by**)
ad effetto Verticale (**cz**)
- Ferri Trasversali ad effetto Longitudinale (**dx**)
ad effetto Trasversale (**ey**)
ad effetto Verticale (**fz**)
- Ferri Verticali ad effetto Longitudinale (**gx**)
ad effetto Trasversale (**hy**)
ad effetto Verticale (**kz**)

In definitiva si ha che:

$$X' = X + P + ax + by + cz$$

$$Y' = Y + Q + dx + ey + fz$$

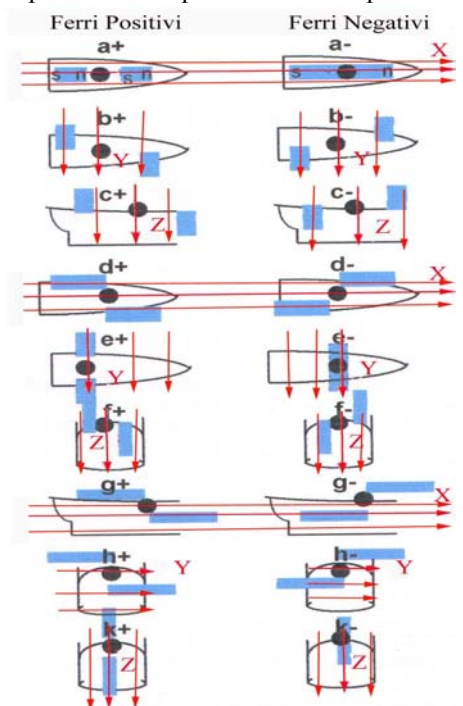
$$Z' = Z + R + gx + hy + kz$$

terna di equazioni che costituiscono le equazioni di Poisson.

A partire dalle equazioni di Poisson è possibile osservare come il CMT ed il campo magnetico permanente sono definibili da tre sole componenti, mentre il campo magnetico temporaneo risulta essere un campo tensoriale, essendo definito da ben nove componenti.

Si tratta a questo punto di analizzare singolarmente le forze relative al campo temporaneo, di raggrupparle assieme e di definire i coefficienti.

In particolare, è possibile osservare che, per come è costruita una nave, per effetto dei giochi di simmetria e del fatto che lo scafo è "intero" cioè continuo (non ci sono generalmente interruzioni), alcune di queste componenti definiscono



MAGNETISMO

effetti piccoli se non addirittura trascurabili, cioè dalle caratteristiche ben quantificabili. In questo discorso rientrano in particolare le componenti **by, dx, fz e hy**, che risultano piccole e di segno incerto.

Le componenti rimanenti presentano caratteristiche che consentono quanto meno di quantificarle. In particolare, tutte queste componenti risultano essere di segno positivo se si interrompono in corrispondenza della bussola. Poiché ciò non avviene mai, esse saranno tutte negative (**ax, ey, kz**). Sono inoltre significative, ma di segno non noto, le componenti **cz e gx**.

Le equazioni di Poisson sono di soluzione molto complicata, anche nell'ipotesi in cui si trascuri l'effetto della terza equazione, cioè quella relativa alla direzione verticale. Sappiamo peraltro già che le forze **X e Y**, se messe assieme, definiscono la componente **H** del CMT, che, in particolare, risulta indipendente dalla prora assunta dalla nave. Discorso analogo può essere fatto per le componenti **P e cz e Q e fz**, raggruppabili in quanto fisse e dirette rispettivamente verso prora e verso dritta. Ci restano da scomporre le forze **ax, by, dx ed ey**.

Relativamente a queste ultime si può verificare che per esse risulta rispettivamente che:

$$\begin{aligned} ax &= aH \cos P_m \text{ (prora)} & dx &= dH \cos P_m \text{ (dritta)} \\ by &= -bH \sin P_m \text{ (prora)} & ey &= -eH \sin P_m \text{ (dritta)} \end{aligned}$$

le quali sono a loro volta scomponibili in componenti dirette per Nm, Em, Prora, Dritta, cioè forze fisse (rispetto l'orizzonte o la nave) e forze mobili (formanti un angolo pari a 2Pm per Nm o Em), come per esempio indicato in figura.

A seguito della scomposizione (può essere utile fare una prova di scomposizione, per esempio di dx) si avrà che:

Forze fisse rispetto l'orizzonte:

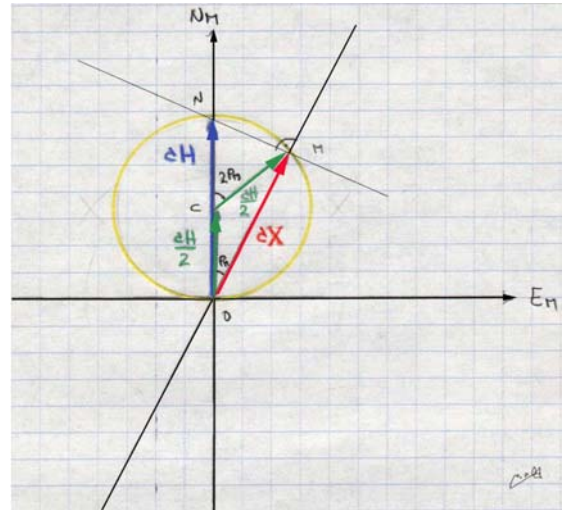
Nm $H + aH/2 + eH/2 = (1+(a+e)/2)H \sim \lambda H$ **Forza Direttrice**
 Em $dH/2 - bH/2 = H(d-b)/2 \sim \lambda H \mathcal{A}$

Forze fisse rispetto alla nave:

Prora $P + cz \sim \lambda H \mathcal{B}$
 Dritta $Q + fz \sim \lambda H \mathcal{C}$

Forze mobili:

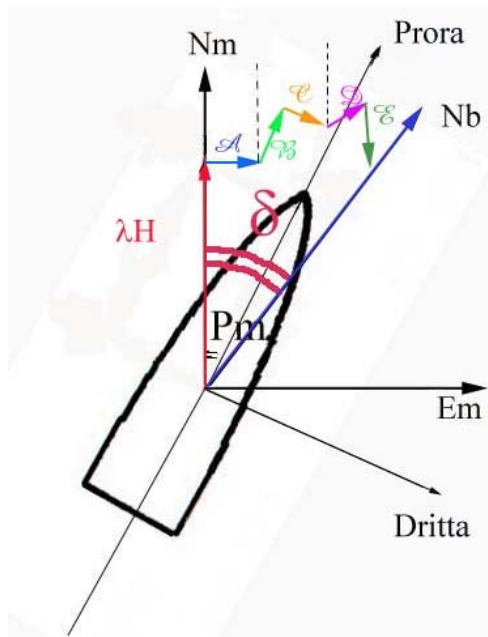
2Pm Nm $aH/2 - eH/2 = H(a-e)/2 \sim \lambda H \mathcal{D}$
 2Pm Em $bH/2 + dH/2 = H(b+d)/2 \sim \lambda H \mathcal{E}$



Spiegazione della scomposizione: sistemata la Pm della nave si traccia la componente da analizzare (ax). A questo punto si porta la perpendicolare alla direzione ax (cioè nel punto M) fino ad intercettare l'asse della direzione cardinale Nm (cioè il punto N). Il vettore NO rappresenta aH (dalla trigonometria risulta che $ax = aH \cos P_m$). Si calcola il punto medio di aH (individuo così il punto C). Si ricavano così le due componenti aH/2 dirette rispettivamente per Nm e per 2Pm con Nm. Il fatto che quest'ultima formi proprio un angolo pari a 2Pm con Nm ce lo dice la geometria: "l'angolo sotteso dal raggio rispetto ad un arco di circonferenza è il doppio dell'angolo sotteso dal diametro rispetto allo stesso arco di circonferenza".

Cenni di Compensazione e compensazione speditiva

Appare chiaro a questo punto che, ragionando vettorialmente, è facile definire il valore della deviazione, a condizione di conoscere il modulo delle varie componenti. E' compito del compensatore determinare il valore delle varie componenti e di compensarle (giri di bussola). In particolare, tanto per dare un ordine di grandezza si ha che $\mathcal{A} \approx 0,1$; $\mathcal{B} \approx 0,3$; $\mathcal{C} \approx 0,2$; $\mathcal{D} \approx 0,2$; $\mathcal{E} \approx 0,01$. A partire dai valori ottenuti con la scomposizione, si può definire già un primo valore della deviazione, come in figura, tenendo presente del fatto che conosciamo sia direzione che modulo.



Al termine delle operazioni di compensazione, è possibile definire, attraverso nuovi giri di bussola, la tabella delle deviazioni residue ovvero il grafico, come nelle figure seguenti. L'ufficiale di rotta non è perciò autorizzato a toccare i ferri compensatori (ad eccezione del ferro relativo alla deviazione di sbandamento).

λH definisce la forza direttrice. Poiché sia *a* che *e* offrono contributi negativi (si osservi però che $a < e$), per garantire una maggiore direttività alla bussola è necessario che essa sia il più lontano possibile dall'influenza dei ferri. Non a caso solitamente si trova in controplancia.

La componente $\lambda H \mathcal{D}$ è definita dalle stesse componenti di λH , ma, in virtù delle regole algebriche, offre un contributo positivo. L'effetto di questa componente si corregge tramite le sfere, o le sbarre (|O|, metodo Modena ovvero —O—, metodo Tedesco), le quali, rispettivamente, creano un effetto negativo **D**, ovvero creano un effetto tale da rendere la componente a uguale a quella *e*.

La componente $\lambda H \mathcal{A}$ ha un effetto costante su tutta la terra. Di norma

MAGNETISMO

non si compensa, in quanto le componenti che la definiscono sono piccole. Inoltre, per compensarla occorrerebbe agire sulla linea di fede, il che è poco auspicabile, per ovvie ragioni. Con motivazioni analoghe non si compensa neppure la componente $\lambda H \mathcal{E}$.

Pm	Deviazione	Pb	Deviazione
0	0	0	0
10	2,2	7,8	2,2
20	3,7	16,3	3,7
30	4,5	25,5	4,5
40	4,8	35,2	4,8
50	4,8	45,2	4,8
60	4,5	55,5	4,5
70	3,8	66,2	3,8
80	2,7	77,3	2,7
90	1	89	1
100	-0,6	100,6	-0,6
110	-2,2	112,2	-2,2
120	-3,5	123,5	-3,5
130	-4	134	-4
140	-4,4	144,4	-4,4
150	-4,5	154,5	-4,5
160	-3,8	163,8	-3,8
170	-2,9	172,9	-2,9
180	-1,5	181,5	-1,5
190	0,5	189,5	0,5
200	2	198	2
210	3	207	3
220	3,3	216,7	3,3
230	3,4	226,6	3,4
240	3,2	236,8	3,2
250	2,7	247,3	2,7
260	2,2	257,8	2,2
270	1,5	268,5	1,5
280	0,5	279,5	0,5
290	-0,5	290,5	-0,5
300	-1,5	301,5	-1,5
310	-2,5	312,5	-2,5
320	-2,9	322,9	-2,9
330	-2,8	332,8	-2,8
340	-2,3	342,3	-2,3
350	-1,3	351,3	-1,3
360	0	360	0

Rimane infine la componente $\lambda H \mathcal{E}$ che si compensa facendo uso della Sbarra di Flinders (\hat{O}), che compensa la componente dolce c .

Infine, ci sarebbe la deviazione di sbandamento che si manifesta in corrispondenza dei movimenti della nave (rollio e beccheggio). Tale effetto viene compensato con ferri duri di tipo R posti all'interno della chiesuola, sistemati su una catena, con la possibilità di venire avvicinato od allontanato dalla bussola al fine di smorzare l'oscillazione determinata dai movimenti della nave.

Un approccio alternativo possibile è infine quello offerto dalla matematica, che tiene conto della periodicità della curva delle deviazioni. E' possibile dimostrare che:

$$\delta^\circ = A^\circ + B^\circ \sin P_b + C^\circ \cos P_b + D^\circ \sin 2P_b + E^\circ \cos 2P_b$$

A partire da quest'ultima è possibile effettuare la compensazione speditiva, che si effettua disponendo la prora della nave nelle seguenti posizioni:

1. $000^\circ \delta^\circ = A^\circ + C^\circ + E^\circ$ compenso tutto (ferri Q, cioè creo un effetto pari a $-(A^\circ + C^\circ + E^\circ)$)
2. $090^\circ \delta^\circ = A^\circ + B^\circ - E^\circ$ compenso tutto (ferri P, cioè creo un effetto uguale ed opposto)
3. 180° dimezzo la deviazione residua (ferri Q, se no mi ritoverei un effetto globale pari a $2(A^\circ + E^\circ)$)
4. 270° dimezzo la deviazione residua (ferri P, se no mi ritoverei un effetto globale pari a $2(A^\circ - E^\circ)$)
5. $045^\circ \delta^\circ = A^\circ + D^\circ$ compenso tutto (sfere o cilindri dolci)
6. 135° dimezzo la deviazione (sfere o cilindri dolci, diversamente mi ritoverei con un effetto pari a $2A^\circ$)

La bussola

La bussola è uno strumento essenziale alla navigazione, non solo se questa si protrae su grandi distanze, ma anche solo per capire quale bordo sia meglio prendere per raggiungere il più velocemente una meta prefissata.

La bussola può essere Magnetica o Amagnetica (girobussola), a seconda che sfrutti i principi del magnetismo o quelli della dinamica.

Le bussole magnetiche sono quelle che troviamo su tutte le imbarcazioni (SOLAS 74/83, sono previste delle visite di controllo biennali), le girobussole vengono installate soprattutto su grandi navi. Vediamo il funzionamento della bussola magnetica.

Prendiamo una barretta magnetica, la poniamo sotto un cartoncino e su questo spargiamo della sottile polvere di ferro. Vedremo che quest'ultima si disporrà formando delle linee tutte intorno alla posizione in cui si trova la calamita. Questo disegno rende visibile lo spettro magnetico, le linee di forza del campo magnetico, che circonda la calamita.

Il campo magnetico è lo spazio in cui agiscono le forze di attrazione e di repulsione della calamita, il suo spettro definisce la forma che assumono le linee di forza del campo magnetico.

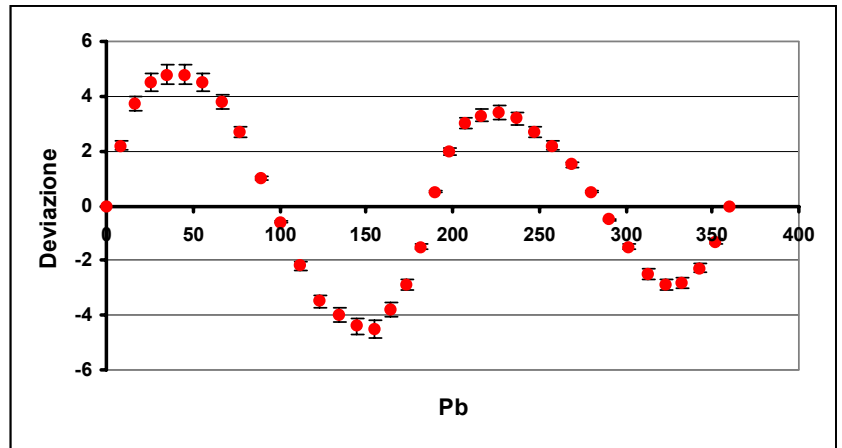
La calamita ha due polarità, Polo Sud e Polo Nord. Due calamite diverse possiedono entrambe un Polo Sud e un Polo Nord, e hanno capacità di attrazione e repulsione fra loro:

una calamita attrae al proprio sud il polo nord dell'altra e ne respinge il sud. La legge dice che: "poli opposti si attraggono, poli uguali si respingono".

La Terra è pensabile come un grande magnete e, intorno al globo, esiste un campo magnetico simile a quello messo in evidenza dalla polvere di ferro sul cartoncino. Il suo spettro è formato da linee che escono dal polo sud ed entrano nel polo nord. Considerando il principio dell'attrazione dei poli opposti, qualunque magnete, libero di ruotare, posto sulla superficie terrestre, tenderebbe ad orientare il proprio sud verso quello nord del globo e viceversa.

Così fa l'ago della bussola, in quanto è un piccolo magnete, sottile e leggero, i cui poli sud e nord si orientano parallelamente alle linee dello spettro magnetico terrestre.

Esistono delle aberrazioni, dovute a metalli posti in prossimità di una bussola oppure dovute a conformazioni geologiche, che creano errori nell'indicazione del nord da parte dello strumento. Si definiscono Deviazione nel primo caso e Declinazione nel secondo. Sia per una causa che per l'altra sono stati trovati opportuni rimedi.



MAGNETISMO

Su ogni carta nautica viene indicata la declinazione della zona, che varia nel tempo, ma in modo conosciuto. Su ogni imbarcazione che si rispetti esiste una tabella delle deviazioni, che corregge le aberrazioni della bussola dovute ai ferri di bordo, motori, impianti elettrici ecc., ecc.. La deviazione è sempre uguale per la stessa nave, ma varia a seconda di come questa orienti la prua rispetto al nord. La Tabella delle deviazioni viene stilata da un tecnico, il perito compensatore, il quale, tramite rilievi strumentali da terra e giri della barca su se stessa (giri di bussola), rileva le correzioni da apportare allo strumento.

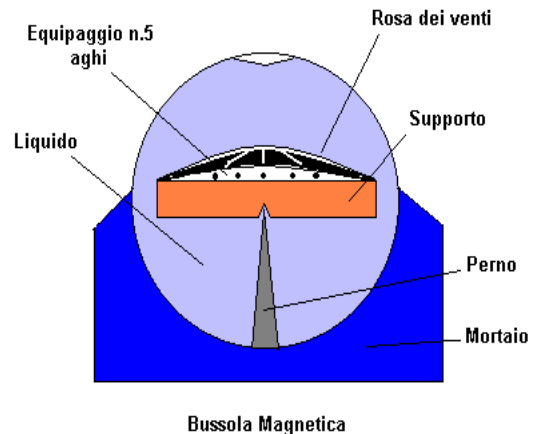
Vediamo come è costituita una bussola:

- Mortaio: è l'involucro esterno contenitore di tutto il resto.
- Equipaggio: è un gruppo di piccoli magneti, in numero dispari.
- Supporto: è una basetta galleggiante su cui poggia l'equipaggio.

Nel punto di appoggio con il perno, è costituito da materiale ad alta resistenza (zaffiro).

- Perno: è l'asse su cui ruota il supporto.
- Liquido anticongelante: serve a sostenere il supporto galleggiante su cui poggia l'equipaggio, diminuendo l'attrito fra il perno e il supporto.

- Calotta trasparente: chiude la bussola nella parte superiore.
- Rosa dei venti: è il disegno del quadrante della bussola.
- Indice: definisce la direzione del piano longitudinale di simmetria e quindi la direzione della prua.
- Supporti cardanici: sono gli elementi che mantengono orizzontale la bussola in qualsiasi condizione (rollio e beccheggio).



Caratteristiche della bussola magnetica

Per un corretto funzionamento della bussola è essenziale che:

1. La bussola sia sempre orizzontale. Ciò si ottiene:
 - abbassando il centro di gravità, cioè spostando i magneti in basso.
 - grazie ai giunti cardanici.
2. La bussola deve sentire la minima variazione di prora (sensibilità della bussola).
3. Se indirizzata per Nm deve essere difficile allontanarla da tale direzione (Stabilità di rotta).

Formule di conversione e di correzione

Le formule di conversione si usano per passare da valori "veri" a valori "bussola", tipicamente per passare dal valore di Pv tracciato sulla carta nautica, al valore di Pb da indicare al timoniere. Le formule di correzione si usano invece per passare dal valore "bussola" al valore "vero". Per esempio, effettuato un rilevamento (luogo geometrico degli osservatori che vedono un oggetto con il medesimo angolo), per poterlo riportare sulla carta nautica occorre correggerlo, cioè trasformarlo da valore "bussola" a "vero".

Conversione

$$\frac{Pv}{-d} \\ Pm \\ \frac{-\delta}{Pb}$$

Correzione

$$Rilb \\ \frac{+\delta}{Rilm} \\ \frac{+d}{Rilv}$$

Riferimenti Bibliografici

- ❑ Capasso Fede "Navigazione" Vol. II Ed. Hoepli
- ❑ Lanza "Dinamica della crosta terrestre" Ed Loescher
- ❑ Nicoli "Navigazione Tradizionale" Ed. Quaderni Marinari
- ❑ Rizzo "Navigazione di Base" Ed. Ferrari
- ❑ Stenner Materiale dal "Corso finalizzato al conseguimento dell'abilitazione all'insegnamento per la classe di concorso A056 "Navigazione, arte navale ed elementi di costruzione navale (O.M. 153/99)". Trieste, 2000.
- ❑ Vascotto Appunti Corso di Navigazione A.S. 1985-86

Internet

- ❑ <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/2155/magnetismo.html>
- ❑ http://www.geologia.com/area_raga/magnetismo/magnetismo.html