

C. I. M. A.

Centro Informativo Alto Adriatico

Cenni di teoria della nave per allievi e aspiranti C.L.C. con numerosi grafici illustrativi e lo svolgimento di alcuni esercizi

L'Avvisatore Marittimo di Venezia (www.avvisatorivenezia.it) ha realizzato un corso telematico di carattere sperimentale relativo a cenni di teoria sulla stabilità della nave per facilitare la preparazione agli esami degli studenti nautici, i padroni marittimi gli Aspiranti e Allievi C.L.C. ecc..

Il programma comprende numerosi grafici illustrativi e lo svolgimento di alcuni esercizi di stabilità trasversale e assetto della nave per un totale di 60 pagine, che possono essere stampate. Il programma è GRATUITO.

Il corso è stato elaborato da Capitani di L.C. che hanno svolto incarichi importanti a bordo delle navi mercantili italiane.

Esso rappresenta pertanto un approccio pratico e a carattere divulgativo dei problemi di stabilità della nave, senza pretendere di raggiungere la perfezione tecnico-scientifica degli studi di ingegneria navale che si occupano della materia.

Esso ha carattere integrativo della preparazione che gli allievi sono chiamati ad acquisire, in base ai programmi di esame, attraverso lo studio dei testi scolastici.

Il programma potrebbe inoltre rappresentare un elemento integrativo della preparazione degli Ufficiali di Coperta responsabili della stabilità della nave.

Si può accedere gratuitamente al programma attraverso il sito dell'Avvisatore Marittimo di Venezia (www.avvisatorivenezia.it) selezionando la finestra "Studi Nautici".

Ci auguriamo che questa iniziativa venga accolta favorevolmente dagli interessati.

In questo caso verranno immessi in rete ulteriori programmi di studio a carattere nautico-professionale relativi all'incaglio la falla, la condotta della navigazione nel cattivo tempo, l'analisi di incidenti marittimi, ecc., allo scopo di integrare la preparazione didattica e professionale degli Ufficiali di Coperta.

Per chiarimenti e precisazioni gli interessati potranno rivolgersi via e-mail al seguente indirizzo (info@avvisatorivenezia.it)

RICHIAMI ED ESERCIZI DI TEORIA DELLA NAVE

GALLEGGIABILITA' E STABILITA' DELLE NAVI

Un corpo rigido che galleggi liberamente sull'acqua possiede **sei gradi** di libertà di movimento rispetto a **forze esterne** che ne disturbino lo stato di equilibrio:

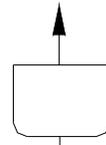
Movimento in avanti o indietro.....(in inglese detto **surge**)



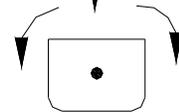
Traslazione trasversale.....(**sway**)



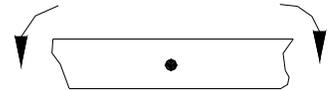
Traslazione verticale.....(**heave**)



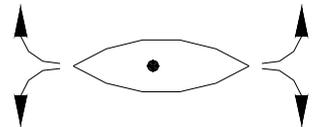
Rotazione intorno ad un asse longitudinale.....(**heel or roll**)



Rotazione intorno ad un asse trasversale.....(**trim or pitch**)



Rotazione intorno ad un asse verticale(**yaw**)



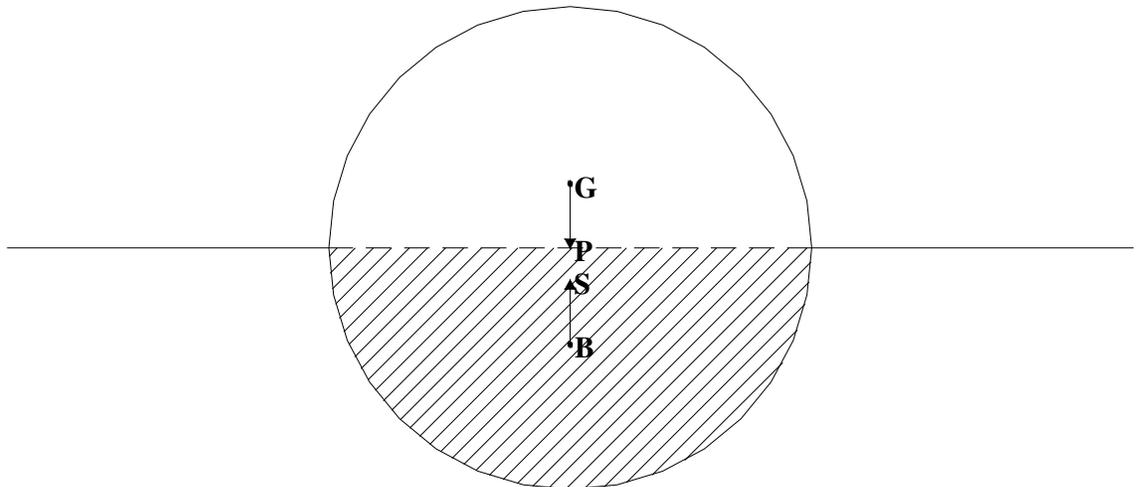
Corpo galleggiante in acqua calma

Un corpo che galleggia in acqua calma è soggetto ad una forza, diretta verticalmente verso il centro della Terra, detta Forza di Gravità.

Se il corpo ha una massa pari a (M), l'entità della forza sarà data dal prodotto $M \times g$ (ove g rappresenta il valore dell' accelerazione di gravità pari a 9,81 m/ sec x sec).

Questa forza viene indicata come **peso del corpo**.

In un corpo galleggiante la forza peso viene contrastata ed equilibrata dalla forza prodotta dalla pressione idrostatica esercitata dal peso del volume dell'acqua spostata sulla superficie immersa del corpo. Di questa forza ci interessa la risultante verticale indicata come **spinta idrostatica**.



La forza peso (P) può essere immaginata applicata nel punto (G), che rappresenta il centro di gravità della massa (M), comunemente chiamato **Centro di Gravità** del corpo.

La forza di galleggiamento che gli si oppone, può invece essere immaginata come se fosse applicata nel punto B, che rappresenta il **Centro di Galleggiamento** del corpo.

La forza di galleggiamento è rappresentata dal **peso del volume di acqua spostata dal corpo**, vale a dire ($V \times d$) ove (V) indica il volume dell'acqua spostata, (d) rappresenta la densità del liquido sul quale la nave galleggia.

Per la condizione di galleggiabilità deve risultare che

$$P = V \times d$$

Ciò significa che la forza di spinta verso l'alto cui è sottoposto un corpo galleggiante equivale al peso del corpo stesso.

Galleggiabilità della nave (*)

Anche una nave può essere equiparata ad un corpo liberamente galleggiante.

Le due forze principali che agiscono sulla nave liberamente galleggiante in acqua calma sono il suo **Peso** (D) e la **Spinta** (S) Il peso agisce verso il basso ed è applicato al centro di gravità della nave (G), la spinta agisce verso l'alto ed è applicata al centro di carena (B).

Nota:

Sulle navi correttamente costruite, il centro di gravità (G) giace sullo stesso piano verticale longitudinale del centro di spinta (B).

Se così non fosse, a causa di errori commessi nella fase di costruzione, la nave, dopo il suo varo, risulterebbe sbandata.

Dunque possiamo affermare che una nave liberamente galleggiante del **peso** (Dislocamento) pari a 9.875 Tonnellate, **sposta** (Disloca) con il suo scafo un volume d'acqua del peso di 9.875 Tonn. Il dislocamento di una nave varia con il variare del suo grado di carica (peso complessivo) e quindi del suo pescaggio. (*)

Il valore del dislocamento oscilla quindi da un minimo (dislocamento a nave vuota) ad un massimo (dislocamento a pieno carico).

Il **dislocamento a nave vuota** rappresenta il peso della nave completamente allestita e pronta a partire ma **senza equipaggio-passeggeri-viveri-combustibile-acqua e carico**.(*)

Il **dislocamento a pieno carico** rappresenta il peso della nave caricata fino al limite di Bordo Libero assegnatole. (*)

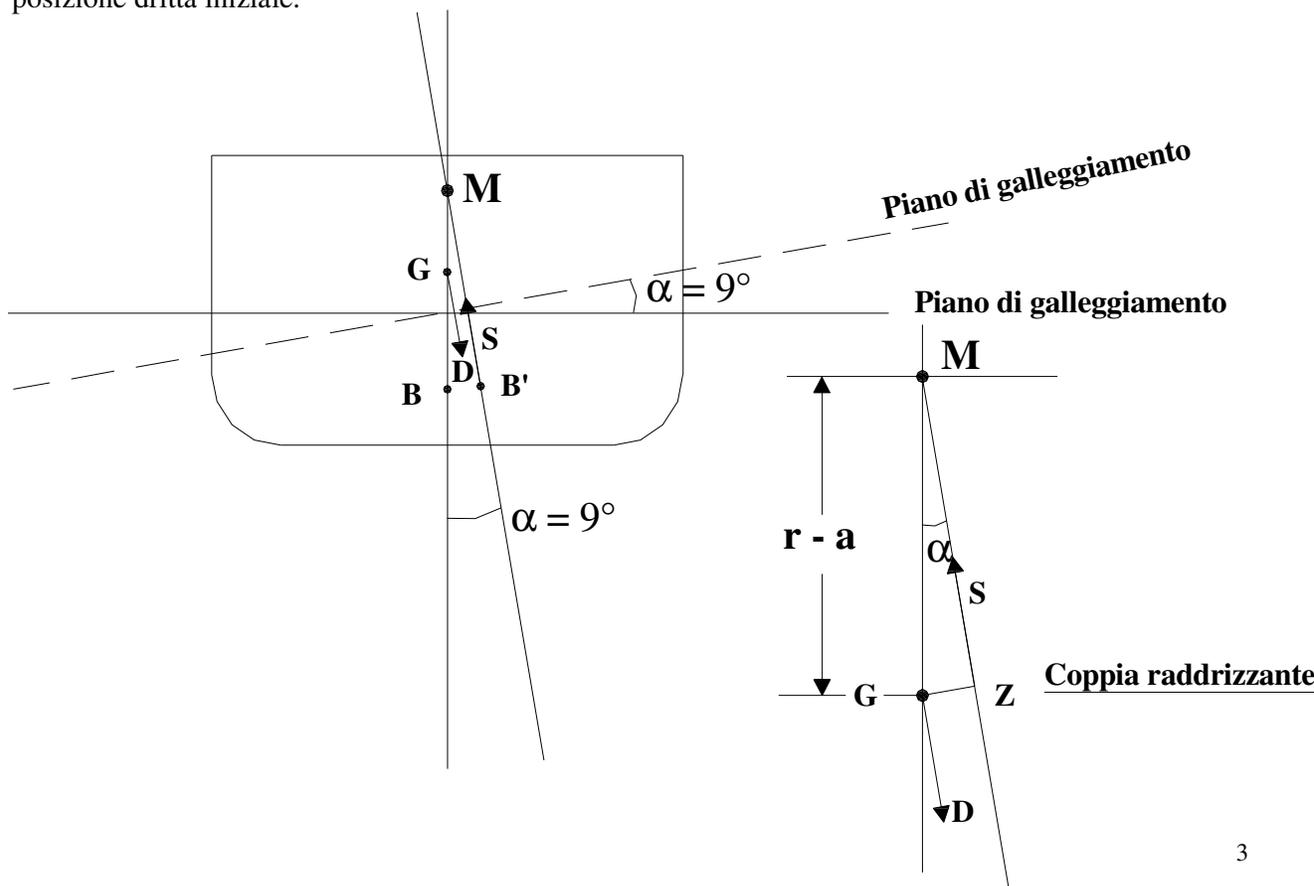
La **portata lorda (Deadweight)** rappresenta la differenza tra il dislocamento della nave (generalmente a pieno carico) e il dislocamento a nave vuota e indica pertanto il peso che quella nave può trasportare caricandola fino alla sua linea di bordo libero. (*)

STABILITA' STATICA DI UNA NAVE PER PICCOLI ANGOLI DI SBANDAMENTO (*)

Nota:

Generalmente si dice che una nave si trova in **equilibrio stabile** quando, allontanata dalla sua posizione dritta iniziale, ad esempio da una forza esterna (colpo di vento), tende a ritornare in posizione dritta al cessare della forza sbandante. (*)

Naturalmente ciò avverrà solo dopo che la nave avrà eseguito una serie di oscillazioni intorno alla sua posizione dritta iniziale.



Il concetto di **stabilità statica di una nave galleggiante** (*) può essere invece spiegato immaginando di applicare gradatamente alla nave una coppia sbandante tale da inclinare lo scafo di un angolo non superiore a 12° e di mantenere la nave sbandata in questa posizione.

Lo sbandamento acquisito non altera la posizione del centro di gravità della nave (G) mentre il centro di carena (B), a causa della variazione della forma dello scafo immerso, si sposta dalla sua posizione iniziale a quella finale (B').

Per piccoli angoli di sbandamento inferiori a 12° circa, la spinta (di galleggiamento) applicata in (B'), agisce lungo un asse che incontra il precedente asse di simmetria a nave dritta in un punto (M) detto Metacentro.

In questa condizione di sbandamento la spinta di galleggiamento (S) ed il peso, o dislocamento (D), della nave non agiscono sullo stesso asse ma formano una coppia:

$$D \times GZ \quad (*)$$

che tende a riportare la nave nella sua posizione iniziale dritta.

essendo $GZ = GM \text{ sen } \alpha$ dove $GM \dots = (r - a)$ = **Altezza Metacentrica**
(Metacentric height)

$GZ \dots = (r - a) \text{ sen } \alpha$ = **Braccio di raddrizzamento**
(Righting Lever)

$\alpha \dots$ **Angolo di sbandamento**

Avremo quindi tre possibili condizioni di equilibrio:

Equilibrio **indifferente**.....quando (G) ed (M) coincidono e (GZ) = 0

Equilibrio **inizialmente instabile**...quando (G) si trova sopra (M) e (GZ) è minore di 0 o negativo

Equilibrio **inizialmente stabile**.....quando (G) si trova sotto (M) e (GZ) è maggiore di 0 o positivo

Nota Bene:

La distanza tra il centro di gravità (G) della nave ed il suo centro di spinta (B) viene indicata con il valore algebrico (a).

La distanza tra il centro di spinta (B) ed il metacentro (M) viene indicata con il valore algebrico (r) e viene chiamata **raggio metacentrico**.

La differenza (r - a) viene definita **altezza metacentrica**. (*)

Poiché $GM = r - a$

possiamo scrivere che $GZ = (r - a) \text{ sen } \alpha$

Da cui nasce l'espressione che indica il **Momento di Stabilità Statica Trasversale** :

$$\underline{M_s = D (r - a) \text{ sen } \alpha} \quad (1)$$

Dove: (r sen alfa) indica la **stabilità di forma** (*)

e (a sen alfa) indica la **stabilità di peso** (*)

L'altezza metacentrica (GM = r - a) e, di conseguenza, il braccio o leva di raddrizzamento (GZ) devono sempre avere valore positivo tale da garantire la stabilità iniziale della nave.

Compito dell'Ufficiale di Coperta è quello di conoscere perfettamente, in qualsiasi condizione di carico, il **valore dell'altezza metacentrica della nave** tenendo presente che nelle peggiori condizioni esso **non dovrebbe mai risultare inferiore a 0,15 m.**(*) (vedi IMO - CODE OF INTACT STABILITY – pag. 12)

Nota : Considerando che per Alfa = 10° il valore naturale di sen Alfa è eguale a 0,174 e moltiplicando il valore minimo consentito di (r – a = 0,15 m.) per sen Alfa si ottiene **0,0261 m. (vale a dire 2,61 cm.) che rappresenta il valore del braccio di raddrizzamento (GZ).**

Una nave che dislocasse 10.000 Tonn. e presentasse una altezza metacentrica (r – a) pari a 0,15 m., avrebbe quindi, per uno sbandamento di 10 °, una coppia raddrizzante pari a:

$$10.000 \times 0,0261 = 261 \text{ (Tonn.metro) , pari, ad esempio, a } 26.1 \text{ T. x } 10 \text{ m.}$$

Esaminiamo ora brevemente i due valori (r) ed (a) da cui dipende il valore GZ e quindi il **momento di stabilità statica** della nave.

(r) - Per angoli di sbandamento non superiori a 12° il valore del raggio metacentrico trasversale (r) rimane costante secondo l'espressione:

$$r = \frac{I_{yy}}{V} \quad \text{dove } I_{yy} = \text{Momento di inerzia della figura di galleggiamento rispetto all'asse longitudinale che si esprime in } m^4.$$

e $V = \text{Volume della carena immersa che si esprime in } m^3.$

(a) - Il valore (a) rappresenta la distanza tra il centro di gravità della nave (G) e il suo centro di carena (B).

Analisi dei due elementi (r) ed (a) che determinano la stabilità di forma e la stabilità di peso

Il valore del raggio metacentrico (r) dipende dal progetto di costruzione della nave ed è modificabile soltanto con interventi strutturali allo scafo.

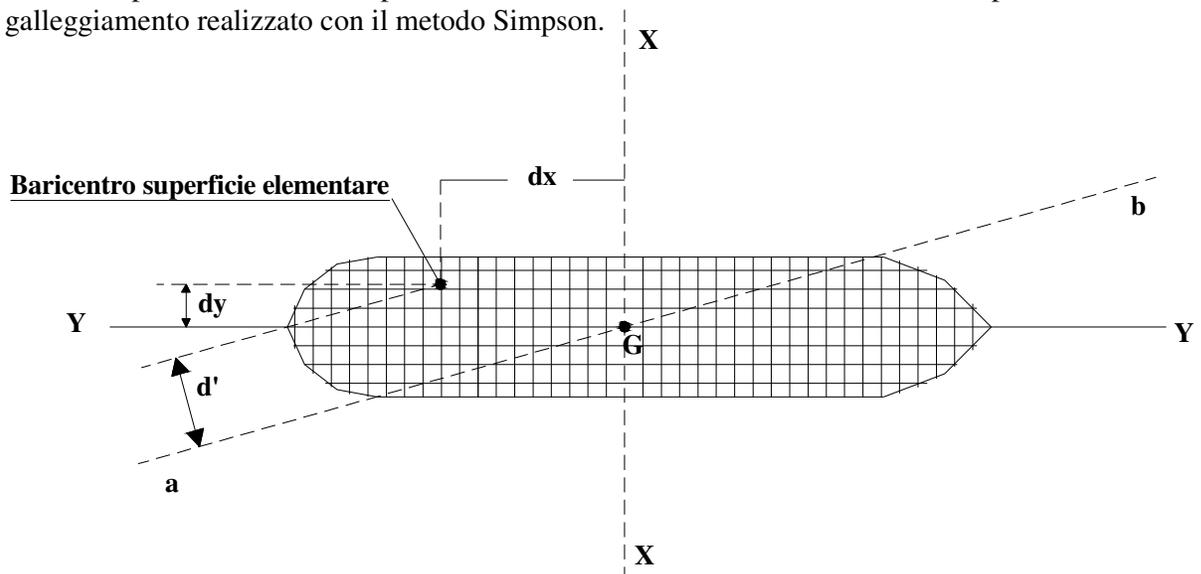
Accade ormai sempre più raramente di osservare navi che presentano ampi rigonfiamenti, detti bottazzi, controcarenare o “soufflages” o “bulges” su ambo i lati per tutta la lunghezza dello scafo in corrispondenza della fascia di galleggiamento.

Queste navi, già in fase di costruzione, presentavano evidentemente un raggio metacentrico (r) troppo corto per garantire una buona stabilità alla nave.

Poiché il valore del raggio metacentrico (r) dipende direttamente dal momento di inerzia della figura di galleggiamento rispetto all'asse longitudinale dello scafo, il costruttore navale è dovuto intervenire per aumentarne, con i grandi “bottazzi” laterali, la superficie di galleggiamento e quindi il suo momento di inerzia.

Il **momento di inerzia** di un piano rispetto ad un asse di oscillazione qualsiasi è rappresentato dalla **sommatoria dei prodotti di ciascuna area elementare (aree piccolissime in cui si suppone suddivisa la figura) per il quadrato della distanza del loro baricentro rispetto all'asse.**

Vedremo più avanti un esempio di calcolo del momento di inerzia della superficie dell'area di galleggiamento realizzato con il metodo Simpson.

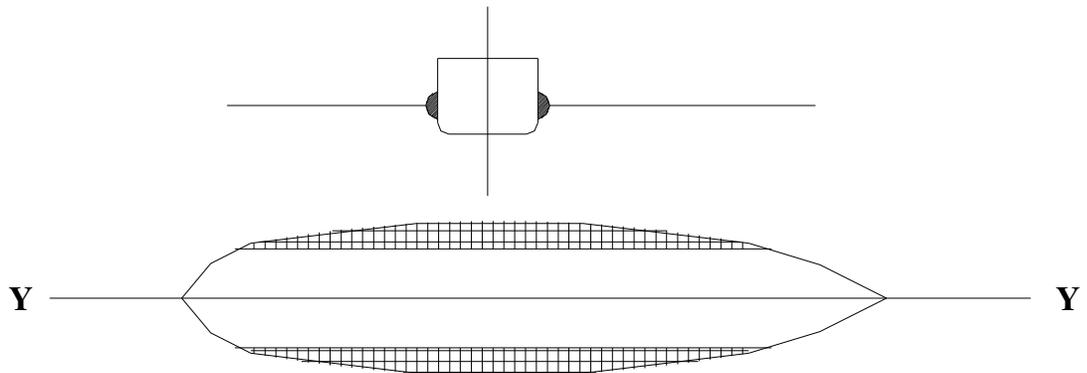


Il valore del momento di inerzia della superficie dell'area di galleggiamento rispetto all'asse longitudinale (I_{yy}) è il più piccolo rispetto ai momenti di inerzia della stessa superficie rispetto a qualsiasi altro asse di riferimento.

Il valore più grande del momento di inerzia (I_{xx}) e quindi del raggio metacentrico longitudinale (R) è quello relativo all'asse trasversale (xx).

Possiamo quindi concludere che una nave che presenta una buona stabilità di forma ($r \text{ sen } \alpha$) rispetto ai movimenti di sbandamento o di rollio intorno all'asse longitudinale (yy), risulta stabile rispetto a qualsiasi altro asse, con massima stabilità rispetto all'asse trasversale (xx) intorno al quale la nave beccheggia o varia il suo assetto.

Ampliamento della superficie di galleggiamento per aumentare la stabilità trasversale della nave.



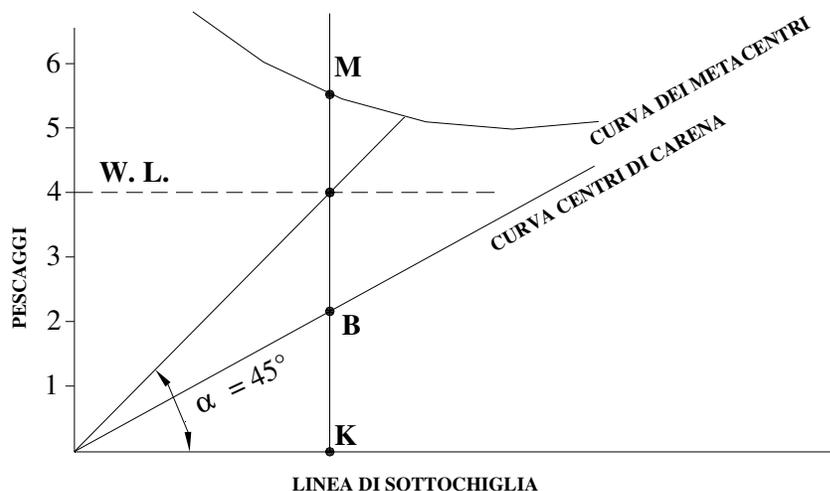
Il valore del raggio metacentrico trasversale (r) è inversamente proporzionale a quello del volume (V) della carena immersa.

Ciò significa che il raggio metacentrico (r) aumenta con il diminuire di (V) ossia con il diminuire del pescaggio.

In altre parole la stessa nave presenta due valori del raggio metacentrico trasversale (r): un valore massimo quando la nave è vuota, un valore minimo quando la nave è a pieno carico.

Diagramma Metacentrico

La distanza del centro di carena (KB) e del Metacentro (KM) rispetto alla linea di sottochiglia della nave e quindi il valore del raggio metacentrico ($r = KM - KB$) dipendono **soltanto dalle forme geometriche** della nave e dal pescaggio. Da ciò la necessità del diagramma metacentrico che permette di conoscere la posizione del metacentro (M) di una data nave **al variare del suo pescaggio**.



Il diagramma, su cui viene riportata anche la curva dei centri di spinta (B), consente di ricavare direttamente la distanza (BM)). **ossia il valore del raggio metacentrico trasversale (r) in base al pescaggio della nave.**

Una linea retta viene tracciata con un angolo di incidenza di 45° sull'origine. Mentre la base del diagramma rappresenta la linea di sottochiglia della nave, il bordo verticale rappresenta invece i pescaggi relativi alle varie condizioni di carico della nave.

L'intersezione della suddetta linea retta con la linea d'acqua (W.L.) corrispondente al pescaggio della nave viene presa come riferimento per tracciare una linea verticale KM.

Questa taglia la curva dei centri di galleggiamento in (B) e quella dei Metacentri in (M).

Si ottengono così i valori :

$$\underline{KM = KB + BM}$$

Dove (K) rappresenta la linea di sottochiglia della nave e (BM) il valore del **raggio metacentrico (r) corrispondente a quel pescaggio della nave.**

Calcolo dell'area della superficie di galleggiamento di una nave in base al metodo Simpson

Secondo il metodo Simpson l'area della superficie di galleggiamento di una nave è data da:

prodotto per il calcolo dell'area

$$A = \frac{2}{3} \times h \left(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + 4y_5 + 2y_6 + 4y_7 + y_8 \right)$$

Dove : h = distanza (in metri) tra i punti di frazionamento della lunghezza tra le perpendicolari del piano di galleggiamento su cui vengono misurate le semilarghezze(y) della superficie di galleggiamento in esame.

y = valore (in metri) delle semilarghezze.

Esempio:

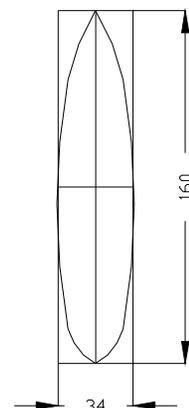
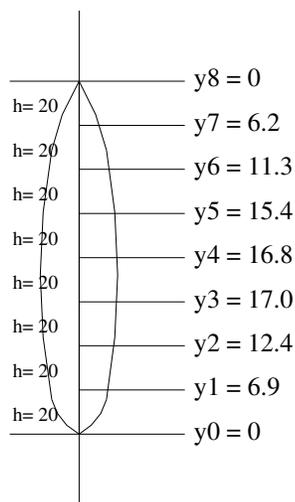
Lpp = 160 m.

l = 34 m.

i = 9 m.

Dislocamento 40.000 Tonn. circa

Volume di carena relativo = 40.000 x 0,975 = 39.000 metri cubi



Per il calcolo dell'area si ricorre al seguente schema:

Ordinata	Valore di y	SM (Simpson's Multiplier)	Prodotto per il calcolo dell'area
0	0	1	0
1	6,9	4	27,6
2	12,4	2	24,8
3	17,0	4	68
4	16,8	2	33,6
5	15,4	4	61,6
6	11,3	2	22,6
7	6,2	4	24,8
8	0	1	0
			263

$$A = \frac{2}{3} \times 20 \times 263 = \underline{\underline{3.507 \text{ m}^2}} \text{ (area della superficie di galleggiamento)}$$

Lo schema di calcolo proposto da Simpson consente, come si vede, una definizione molto precisa dell'area della superficie di galleggiamento.

Un metodo di calcolo molto più semplice consente tuttavia di ottenere dei risultati abbastanza precisi. Si tratta di calcolare l'area del rettangolo su cui è inscritta la figura di galleggiamento e moltiplicare il risultato per il **coefficiente di finezza della figura di galleggiamento che può variare tra 0,6 e 0,8**.

Nel caso della nostra nave, ponendo un coefficiente di finezza pari a 0,65 otterremo una superficie dell'area di galleggiamento pari a :

$$160 \times 34 \times 0,65 = 3.536 \text{ m}^2$$

valore che si avvicina molto a quello calcolato con il metodo Simpson.

I dati relativi ai coefficienti di finezza sono contenuti nei piani di costruzione della nave.

Anche la conoscenza del dislocamento unitario (Du),che vedremo più avanti, consente di calcolare facilmente l'area di galleggiamento.

Calcolo del momento di inerzia rispetto all'asse longitudinale (yy) effettuato seguendo lo schema proposto da Simpson, che si basa sulla formula:

$$I_{yy} = 2 \times \frac{1}{3} \int y^3 \times h$$

E sullo sviluppo dell'integrale:

$$\underline{\underline{I_{yy} = 2/3 \times (\text{prodotto per il calcolo del momento di inerzia}) \times 1/3 \times h}}$$

Ordinata	Valore di y	Valore di y ³	SM	Prodotto per il calcolo del Momento di Inerzia (I _{yy})
0	0	0	1	0
1	6,9	329	4	1.316
2	12,4	1.907	2	3.814
3	17,0	4.913	4	19.652

4	16,8	4.742	2	9.484
5	15,4	3.652	4	14.608
6	11,3	1.443	2	2.886
7	6,2	238	4	952
8	0	0	1	0

				52.712

Da cui si ottiene:

$$I_{yy} = 2/3 \times 52.712 \times 1/3 \times 20 = 234.276 \text{ metri alla quarta.}$$

Poiché il raggio metacentrico trasversale si calcola dividendo il momento di inerzia (I_{yy}) per il volume di carena (V) avremo, nel nostro caso, che

$$r = 234.276 / 39.000 = 6,00 \text{ m.}$$

che rappresenta certamente un valore piuttosto elevato di cui non bisogna però meravigliarsi data la notevole larghezza della nave in esame (34 m.).

Esempio:

Una nave che disloca 6.000 Tonn. in acqua di mare, presenta un momento di inerzia della sua figura di galleggiamento (ricavato da appositi diagrammi) di 16.300 (metri alla quarta), calcolare il valore del suo raggio metacentrico.

sappiamo che $V = \text{Dislocamento} / \text{densità dell'acqua di mare}$

$$\text{per cui } V = \frac{D}{d} = \frac{D}{1,025} = D \times 0,975 = 6.000 \times 0,975 = 5.850 \text{ (metri cubi)}$$

$$\text{Il valore di } (r) \text{ sarà dato da } r = \frac{16.300}{6.000 \times 0,975} = 2,79 \text{ m.}$$

Il calcolo del momento di inerzia della superficie di galleggiamento di una nave rispetto all'asse longitudinale (yy) può essere semplificato adottando alcune formule che permettono rapidamente di definire il momento di inerzia di superfici geometriche più semplici.

A) – Momento di inerzia (I) della superficie di un rettangolo di lunghezza (L) e larghezza (B) intorno ad un asse passante attraverso il suo centro di gravità (G) e parallelo al suo lato (L).

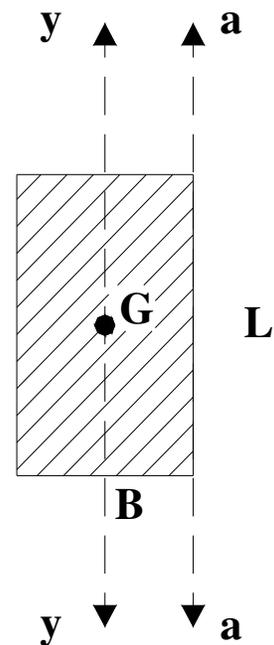
Vedremo in seguito l'importanza di questa formula quando si tratterà di calcolare gli effetti negativi sulla stabilità della nave provocati da specchi liquidi rettangolari liberi di oscillare (tanke o doppi fondi).

Diciamo però che già in fase di costruzione le tanke adibite al trasporto di liquidi presentano l'elemento (B), ossia la larghezza , ridotto adeguatamente onde diminuire al massimo il valore I_{yy} .

$$I_{yy} = \frac{1}{12} \times L \times B^3$$

Da notare che il momento di inerzia (I) aumenta di ben quattro volte se l'asse di riferimento coincide con il lato (L) del rettangolo, infatti:

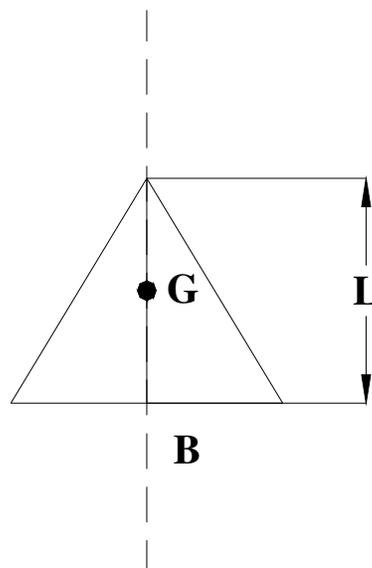
$$I_{aa} = \frac{1}{3} \times L \times B^3$$



B) – Momento di inerzia della superficie di un triangolo di altezza (L) e base (B) rispetto ad un asse del piano passante per il centro di gravità (G) del triangolo e perpendicolare alla sua base (B).

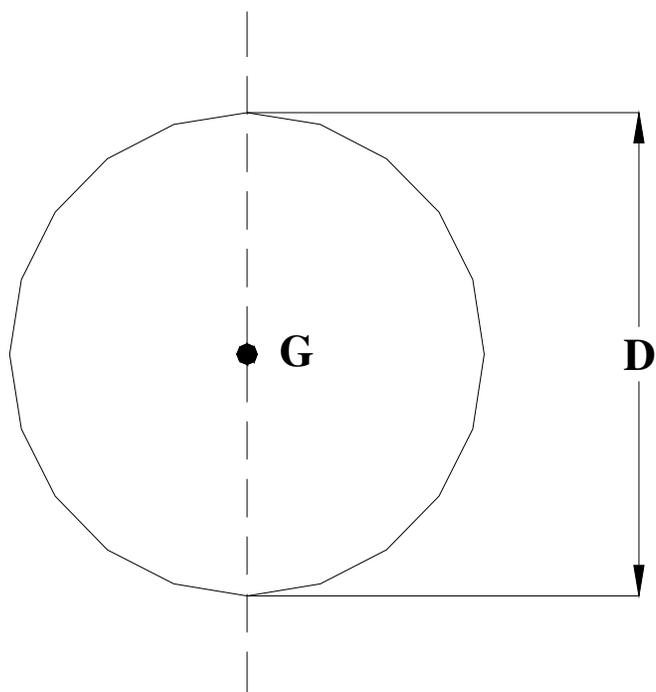
Anche questa formula è molto utile per calcolare rapidamente l'effetto negativo sulla stabilità dovuto allo “specchio libero” dell'acqua presente nel gavone di prora quando non completamente riempito (e gavone di poppa).

$$I_{yy} = \frac{1}{36} \times L \times B^3$$



C) Momento di inerzia di un cerchio di diametro (D) intorno ad un asse appartenente al suo piano e passante per il centro di gravità (G).

$$I_{yy} = \frac{1}{64} \times 3,14 \times D^4$$



Schema semplificato per il calcolo del momento di inerzia della figura di galleggiamento.

Partendo dai dati precedenti relativi al piano di galleggiamento di una nave che presenta una Lpp pari a 160 m. ed una larghezza massima di 34 metri abbiamo già calcolato, con il metodo di Simpson, il valore del suo momento di inerzia rispetto all'asse longitudinale (yy).

Il momento di inerzia è risultato pari a 234.276 metri alla quarta.

Per semplificare il calcolo del momento di inerzia (I_{yy}) possiamo immaginare che la figura di galleggiamento della nostra nave sia riducibile ad una composizione di figure geometriche semplici di cui risulta facile calcolare rapidamente il momento di inerzia con le formule viste in precedenza, ad esempio un rettangolo e due triangoli isosceli.

Naturalmente le tre figure geometriche (A – B – C) dovranno avere dimensioni tali da adattarsi con buona approssimazione alla superficie di galleggiamento ottenuta dai piani di costruzione o con il metodo Simpson o con l'uso del coefficiente di finezza del piano di galleggiamento.

Possiamo ad esempio costruire una figura di galleggiamento costituita da un rettangolo e due triangoli aventi le seguenti dimensioni:

Triangolo (A) - Base 28 metri, Altezza 40 metri.....	Superficie	560 mq.
Rettangolo(B) - Base 28 metri, Altezza 100 metri.....	“	2.800 mq.
Triangolo (C) - Base 28 metri, Altezza 20 metri.....	“	280 mq.

Per una superficie totale di **3.640 mq.** (valore che non si discosta molto rispetto a quello calcolato con il metodo Simpson).

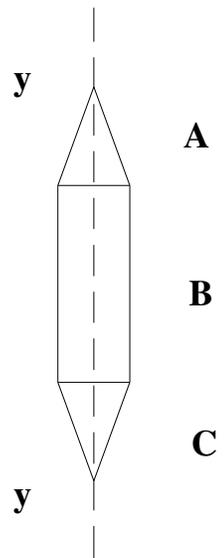
Applicando le formule che già conosciamo possiamo ora facilmente calcolare il valore del momento di inerzia di queste aree semplici:

$$A = \frac{40 \times 28^3}{36} = \dots\dots\dots 24.391 \text{ m}^4$$

$$B = \frac{100 \times 28^3}{12} = \dots\dots\dots 182.933 \text{ m}^4$$

$$C = \frac{20 \times 28^3}{36} = \dots\dots\dots 12.195 \text{ m}^4$$

Totale	219.519 m ⁴
--------	------------------------



Valore che si discosta poco dal momento di inerzia calcolato con lo schema di Simpson.

Possiamo concludere che il raggio metacentrico trasversale (r), per inclinazioni trasversali intorno all'asse longitudinale (yy) comprese entro un angolo Alfa non superiore a 12°, è direttamente proporzionale al valore del momento di inerzia del piano della superficie di galleggiamento (Iyy) e inversamente proporzionale al volume della carena immersa (V).

Poiché il valore (Iyy) non è modificabile se non attraverso interventi strutturali allo scafo, possiamo affermare che il valore del raggio metacentrico cambia a seconda del volume della carena immersa (V) e quindi del pescaggio della nave.

In generale una nave a murate verticali in zavorra presenterà un raggio metacentrico superiore rispetto a quello della stessa nave a pieno carico, come si può del resto constatare dallo studio del diagramma metacentrico.

Esempio:

Supponendo che la nave fin qui esaminata [Lpp = 160 m. - l = 34 m. - i = 9 m. - Cb (Coefficiente di finezza totale) = 0,8 - d = 1,025 - D = 40.000 Tonn. - V = 39.000 m.cubi] **sia a murate verticali**, calcolare il valore del raggio metacentrico in due casi: quando essa si trova nelle condizioni di pieno carico (i = 9 m.) e quando il suo pescaggio si riduce a 6 metri.

Nella condizione di pieno carico abbiamo già visto che il suo raggio metacentrico trasversale (r) è uguale a

$$r = \frac{234.276}{39.000} = 6,00 \text{ m.}$$

Se la nave, in seguito a sbarco di pesi, emerge sino a 6 metri di pescaggio, la superficie della figura di galleggiamento, essendo lo scafo a murate verticali, diminuirà di una quantità trascurabile.

Lo stesso non si può dire del volume della carena immersa (V) che assumerà il seguente valore:

$$V = 160 \times 34 \times 6 \times 0,8 = 26.112 \text{ m}^3$$

per cui

$$r' = \frac{234.276}{26.112} = 8,97 \text{ m.}$$

Sia chiaro però che un raggio metacentrico più grande non significa maggiore stabilità poiché questa dipende solamente dal braccio di raddrizzamento (GZ) e dal diagramma di stabilità. (*)

CONCLUSIONI (*)

Il raggio metacentrico (r), vale a dire la distanza compresa tra il centro di galleggiamento della carena immersa (B) e la posizione del Metacentro della nave per angoli di sbandamento compresi intorno ai 12°, presenta un valore non modificabile se non con gli interventi ingegneristici allo scafo già esaminati.

Esso dipende infatti dai piani di costruzione della nave (stabilità di forma) e varia solamente in funzione del volume della carena immersa.

L'attenzione dell'Ufficiale di Coperta, per quanto riguarda la stabilità della nave, sia in porto che in mare, sarà dunque rivolta alla stabilità di peso cioè all'elemento (a), vale a dire alla distanza compresa tra il Centro di Spinta della carena immersa (B) e il Centro di Gravità della nave (G).

Poiché le disposizioni internazionali (IMO) stabiliscono che il valore di (r - a) non deve essere inferiore a 0,15 m. per non compromettere la stabilità della nave, gli Ufficiali di Bordo opereranno in modo tale da mantenere l'altezza metacentrica sempre al di sopra di quel valore.

Ciò sarà possibile tenendo sotto controllo la posizione del centro di gravità (G) pianificando opportunamente la disposizione dei pesi a bordo in fase di caricazione (stabilità di peso), controllando la subdola perdita di stabilità dovuta alla creazione di specchi liquidi liberi di oscillare provocati dal progressivo consumo dei depositi di acqua dolce e di combustibile durante la navigazione e infine adottando accorgimenti per impedire lo scorrimento laterale del carico.

Una nave che presenta un alto valore dell'altezza metacentrica (r - a) rolla rapidamente con mare mosso al traverso, con movimenti di rollio bruschi e di breve periodo, dannosi per le strutture della nave, per il carico e per l'equipaggio. Queste navi vengono definite "navi dure".

Un alto valore iniziale dell'altezza metacentrica (r - a), veniva una volta considerato sinonimo di stabilità, ma ciò ha spesso condotto a fatali errori di progettazione e costruzione di scafi che, sotto inclinazioni anche modeste, oppure avendo riportato danni alle strutture, si capovolgevano facilmente.

Ciò può capitare specialmente a navi inizialmente "dure" **che presentano però un bordo libero ridotto**. In queste condizioni, anche con angoli di sbandamento limitati, la murata sul lato sbandato può finire sott' acqua e la nave può capovolgersi.

In realtà un buon costruttore navale dovrà mantenere l'attenzione puntata sul valore del braccio di raddrizzamento (GZ) **per qualsiasi angolo di sbandamento**.

Sarà per ciò necessario analizzare le curve o diagrammi di stabilità statica della nave nelle varie condizioni di sbandamento.

DIAGRAMMI DI STABILITA' STATICA TRASVERSALE (*)

Riferendoci alla formula (1) : $M_s = D (r - a) \text{ sen } \alpha$

dove D = Peso (Dislocamento) della nave in Tonn.

r = raggio metacentrico per inclinazioni fino a 12° circa (distanza in metri tra B e M)

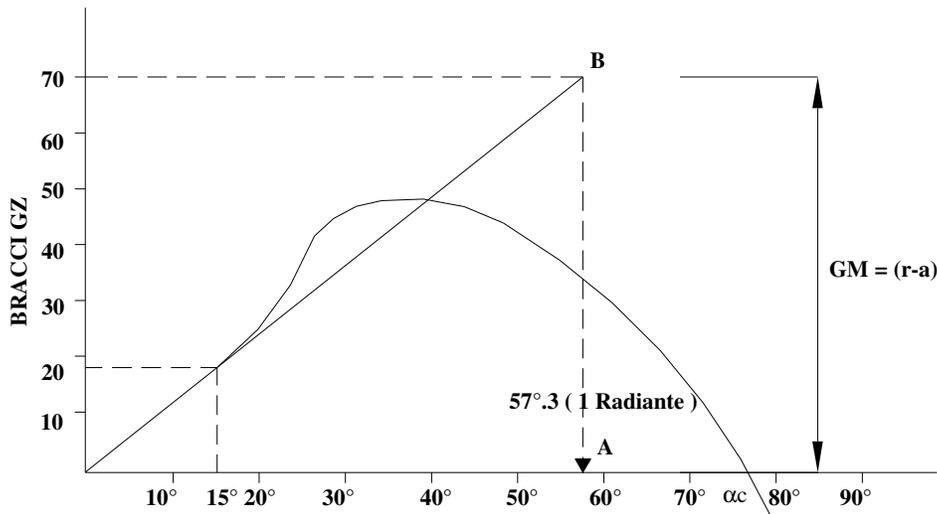
a = distanza in metri compresa tra B e G

alfa = angolo di sbandamento

E' possibile ricavare il diagramma di stabilità statica trasversale della nave in esame ponendo sull'asse delle ordinate (verticale) i valori (r - a) sen Alfa dei bracci di raddrizzamento (GZ) alle varie inclinazioni e sull'asse delle ascisse (orizzontale) gli angoli di inclinazione (Alfa).

Il diagramma che ne risulta **non è una sinusoide** poiché, oltre i 12° di sbandamento, il Metacentro cambia posizione, seguendo la così detta "evolva metacentrica", alterando il valore di (r - a).

Il diagramma di stabilità statica è utile poiché fornisce: 1) I limiti della stabilità (angolo di capovolgimento α c); 2) Il valore massimo del braccio (GZ); 3) L'angolo di sbandamento al quale corrisponde il massimo valore del braccio (GZ); 4) Il valore dell'altezza metacentrica ($r - a$) o (GM) dato dall'incrocio della tangente alla curva sulla sua origine e la verticale condotta sull'angolo $\alpha = 57,3^\circ$ (1 radiante).



NOTA BENE : Dalla geometria possiamo ricavare che $GZ = GM \times \alpha$ (radianti) quando il valore di (α) è compreso entro angoli piccoli. Ne deriva che **la pendenza della curva dei bracci di stabilità (GZ) definita dalla tangente sulla sua origine consente di definire il valore di GM .**

Il valore di GM può infatti essere facilmente **derivato dalla curva dei GZ , tracciando una tangente alla curva sulla sua origine; questa linea taglia l'ordinata relativa ad $\alpha = 57,3^\circ$ (1 radiante) ad una altezza eguale a GM , misurata sulla stessa scala GZ .**

Infatti se nella formula precedente ($GZ = GM \times \alpha$ radianti) poniamo $\alpha = 57,3^\circ$ (1 radiante) avremo che $GZ = GM \times 1$ e quindi $GZ = GM$.

Il diagramma di stabilità statica indica che a nave dritta ($\alpha = 0$; $\sin \alpha = 0$) il Braccio di Stabilità (GZ) è nullo così come il Momento di Stabilità ($D \times GZ$).

La nave però è **inizialmente stabile** poiché, se allontanata dalla sua posizione dritta, presenta subito un momento di stabilità positivo che tende a riportarla nella sua posizione iniziale.

Continuando l'azione della forza sbandante, la nave continua a sbandare mentre il suo momento di stabilità cresce fino ad un valore massimo, intorno ai 35° , in cui generalmente la linea di galleggiamento taglia il ponte di coperta in una zona adiacente alla suola.

Da qui in poi il Momento di Stabilità inizia a decrescere, rimanendo comunque sempre positivo, fino ad annullarsi su un angolo di sbandamento intorno ai 75° (angolo di capovolgimento statico).

Oltre questo angolo il Momento di Stabilità torna a crescere ma, questa volta, in senso negativo: esso tende cioè a far capovolgere la nave.(*)

Esempio numerico:

In base al diagramma dei bracci di stabilità (GZ) di cui alla pagina precedente, calcolare il valore del Momento di Stabilità statica trasversale della nave per $\alpha = 15^\circ$.

La nave di cui al diagramma suddetto ha un dislocamento di 18.700 Tonn. ed $(r - a) = 0,70$ m.

Dal diagramma, per un angolo di sbandamento pari a 15° , si ricava un valore di GZ pari a $= 0,18$ m. per ciò: $M_s = 18.700 \times 0,18 = 3.366$ Tonn.metri (ad esempio 135 T. x 25 m.)

E' interessante notare che, **a parità di bracci di stabilità (GZ)**, una nave che dislocasse 187.000 tonnellate presenterebbe un Momento di Stabilità **dieci volte superiore alla precedente**.

Questo spiega il fenomeno per cui mentre il mare al traverso forza 7 disturba alquanto una nave di 18.700 T. di dislocamento, esso non rappresenta che un lieve disturbo per una nave che ne disloca 187.000.

Distinzione tra la stabilità di una nave sbandata e una nave ingavonata (*)

Spesso accade di osservare delle navi, impegnate in operazioni di carico o scarico, che presentano angoli di sbandamento più o meno accentuati.

Esse vengono genericamente definite “navi sbandate”.

Bisogna però distinguere tra navi sbandate e navi ingavonate e la distinzione tra queste e quelle è data **dalla stabilità**.

Una nave sbandata possiede comunque intatta la propria stabilità iniziale positiva, essa è dunque una nave stabile che, a causa di una disomogenea distribuzione del carico durante le operazioni commerciali (specialmente con carico alla rinfusa), subisce uno sbandamento a cui il personale di bordo può porre rimedio spostando un peso adeguato dalla parte opposta al lato dello sbandamento oppure procedendo in modo più razionale alle operazioni di sbarco-imbarco.

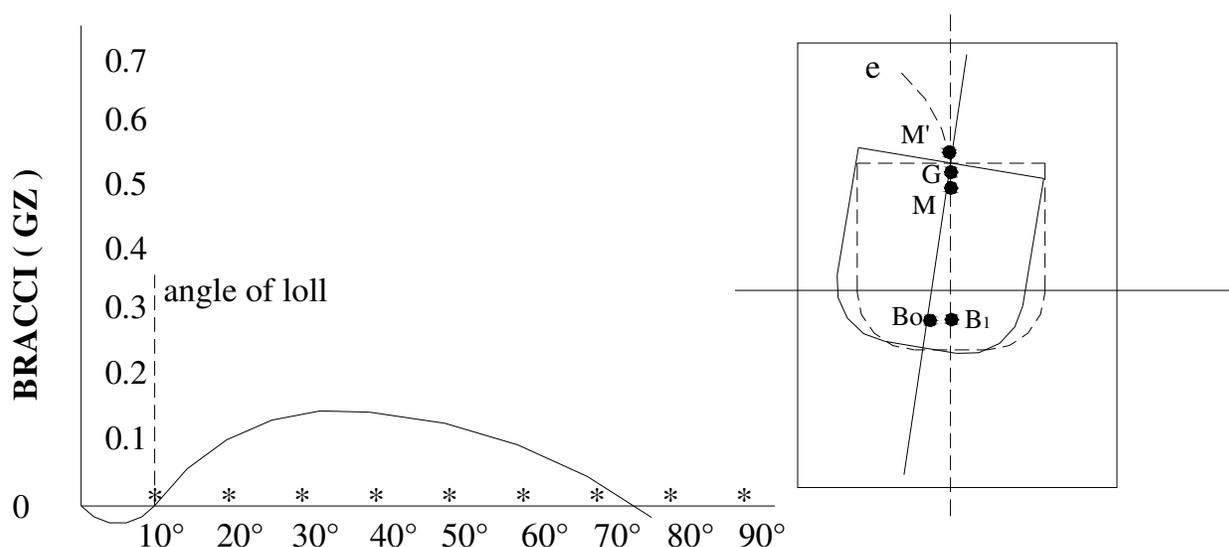
Si tratta di una nave sbandata, ma comunque stabile. (*)

La nave ingavonata, al contrario, presenta **una stabilità iniziale negativa, vale a dire è una nave inizialmente instabile (*)**

Si tratta di navi che, per vari motivi, presentano un forte innalzamento del loro centro di gravità (G).

Questo si viene in definitiva a trovare al di sopra del Metacentro (M) e il valore (GM) diventa negativo.

La stabilità iniziale risulta dunque negativa e la nave sbanda indifferentemente a dritta o a sinistra. Se l'evoluta metacentrica (e) ha inizialmente rami ascendenti, come accade sulle navi a murate verticali, lo sbandamento della nave si arresta quando il Metacentro (M'), spostandosi lungo l'evoluta, si viene a trovare in posizione superiore al centro di gravità (G). In quel momento la nave raggiunge uno sbandamento di equilibrio (angolo di ingavonamento = angle of loll). Da quel momento in poi il valore dell'altezza metacentrica (GM) torna ad assumere segno positivo.



Esempio numerico:

Una nave presenta un valore negativo della sua altezza metacentrica ($GM = - 0,08$ m.).

Dai diagrammi di costruzione risulta che, in base al pescaggio, il suo raggio metacentrico (BM) è pari a 5 m.

Calcolare il valore dell'angolo di sbandamento (angle of loll) che la nave assume in acqua calma nella sua posizione di equilibrio, dopo di che la sua altezza metacentrica ritorna ad avere valori positivi

Disegnare inoltre il diagramma di stabilità dei bracci (GZ) – (vedi pag. 15)

Si applica la nota formula:
$$\text{Tang. Alfa} = \sqrt{\frac{-2 (-GM)}{BM}}$$
 dove GM e BM sono espressi in cm.

Introducendo i valori della nostra nave ($GM = - 8$ cm. e $BM = 500$ cm) otteniamo:

$\text{Tang. Alfa} = 0,179$ da cui **Alfa = 10,1°**

E' interessante notare come piccoli valori negativi di (GM) (Es. - 8 cm.) conducano ad angoli di sbandamento notevoli (Es. 10°).

La nave ingavonata è inizialmente instabile e sarebbe un errore grave e pericoloso tentare di raddrizzarla spostando trasversalmente dei pesi, perché sbanderebbe violentemente e ancora di più sull'altro lato. (*)

L'unico sistema per portare una nave ingavonata alle condizioni di equilibrio stabile , nella posizione dritta, è di imbarcare pesi in basso(ad esempio zavorrandola con acqua nei doppi fondi ecc.) o di abbassare dei pesi in modo da provocare l'abbassamento del centro di gravità della nave (G) al disotto del metacentro trasversale (M).

PROVA DI STABILITA' (Inclining Experiment) (*)

Questa prova ha lo scopo principale di stabilire il valore (GM) dell'altezza metacentrica di una nave di nuova costruzione o sottoposta a ristrutturazioni, dal quale valore risalire a quello fondamentale della distanza KG del Centro di Gravità dalla linea di sottochiglia.

Mentre gli Ufficiali di bordo devono conoscere il valore assunto da (GM) in qualsiasi condizione di carico per poterlo mantenere entro lo standard di sicurezza, i costruttori navali sono invece chiamati a stabilire, sin dalla fase di costruzione della nave, il valore (KG) della distanza del Centro di Gravità dalla linea di sottochiglia.

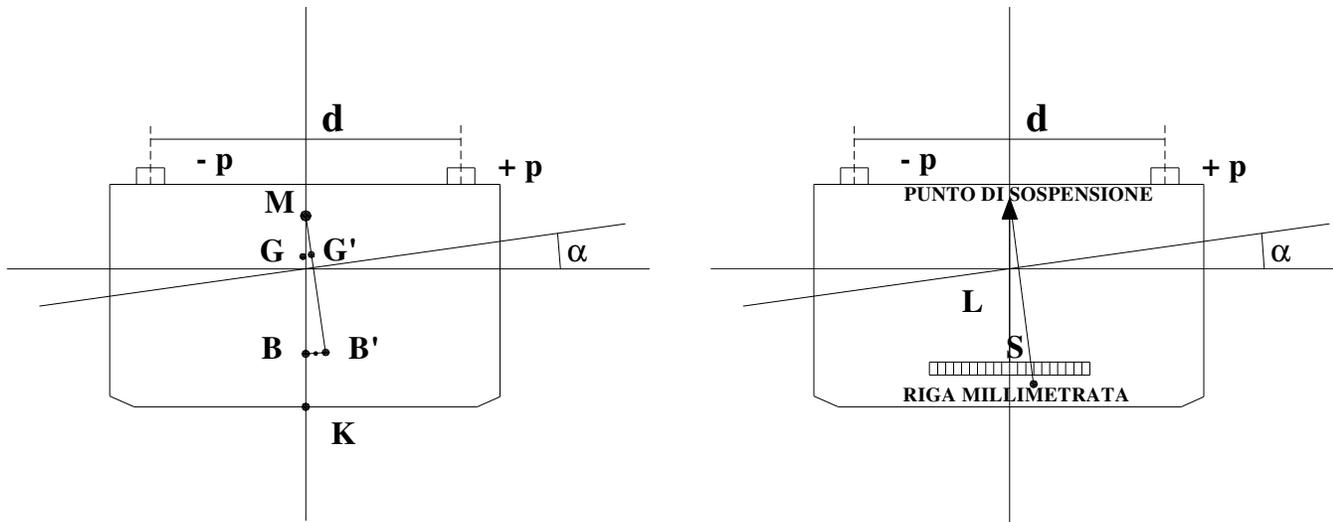
Tale distanza è data dalla semplice relazione : **$KG = KM - GM$**

Questa misura (KG) è di grande importanza nella progettazione della costruzione e nei calcoli per le diverse condizioni di carico della nave.

Un peso (p) di modesta entità (ad esempio 2 tonnellate) viene mosso trasversalmente attraverso il ponte di coperta per una distanza (d) ben conosciuta da un lato all'altro delle murate.

Ciò provoca l'inclinazione della nave di un angolo che viene misurato grazie ad un pendolo costituito da un lungo filo d'acciaio collegato ad un punto di sospensione all'interno della nave e terminante con un peso a volte immerso in una vasca d'olio o di acqua per eliminare le oscillazioni.

Il movimento del filo d'acciaio è misurato lungo una riga millimetrata disposta perfettamente orizzontale.



Lo spostamento trasversale del peso determina un momento sbandante ($p d \cos. \alpha$) a cui la nave contrappone il suo momento di stabilità trasversale ($D \times GM \times \sin. \alpha$).

Nella posizione di fine corsa del peso (p) la nave si sarà sbandata di un angolo certamente inferiore ai 12° (metodo metacentrico) fino a raggiungere una posizione di equilibrio per cui:

$$p d \cos. \alpha = D \times GM \times \sin. \alpha$$

$$\text{da cui } GM = \frac{p d}{D \times \tan \alpha}$$

Di cui conosciamo tutti gli elementi poiché anche il valore della tangente di α ci viene fornito dal rapporto tra la lunghezza dello scostamento (S) del filo d'acciaio lungo la riga millimetrata e la distanza (L) tra il punto di sospensione del pendolo e la riga stessa, misurata a nave dritta.

$$\tan \alpha = S / L$$

Esempio in lingua inglese:

A ship has a displacement of 3.600 T., and during an inclining experiment 4 T. of ballast were moved transversely through 6 m. This caused the end of the pendulum 5 m. long (L) to deflect (S) by 75 mm. What is the value of the GM in this condition?

$$\tan. \alpha = 0,075 / 5 = 0,015 \quad (\text{Alfa} = 0^\circ 55')$$

$$GM = (r - a) = \frac{4 \times 6}{3600 \times 0,015} = 0,444 \text{ m.}$$

Ancora un esempio in lingua inglese:

A ship has a lightship displacement of 3500 T., and during an inclining experiment a stabilograph (strumento usato per misurare direttamente l'angolo di inclinazione) recorded a maximum angle of

1.3° when a weight of 6 T. was moved across the deck through a distance of 10 m. The hydrostatic curves show that the value of KM in this condition is 8.50 m. What is the height of the centre of gravity above the keel?

$$\tan 1.3^\circ = 0,0227$$

$$GM = \frac{6 \times 10}{3500 \times 0,0227} = 0,755 \text{ (altezza metacentrica)}$$

$$KG = KM - GM = 8,500 - 0,755 = 7,745 \text{ m. (altezza del centro di gravità dalla linea di sottochiglia)}$$

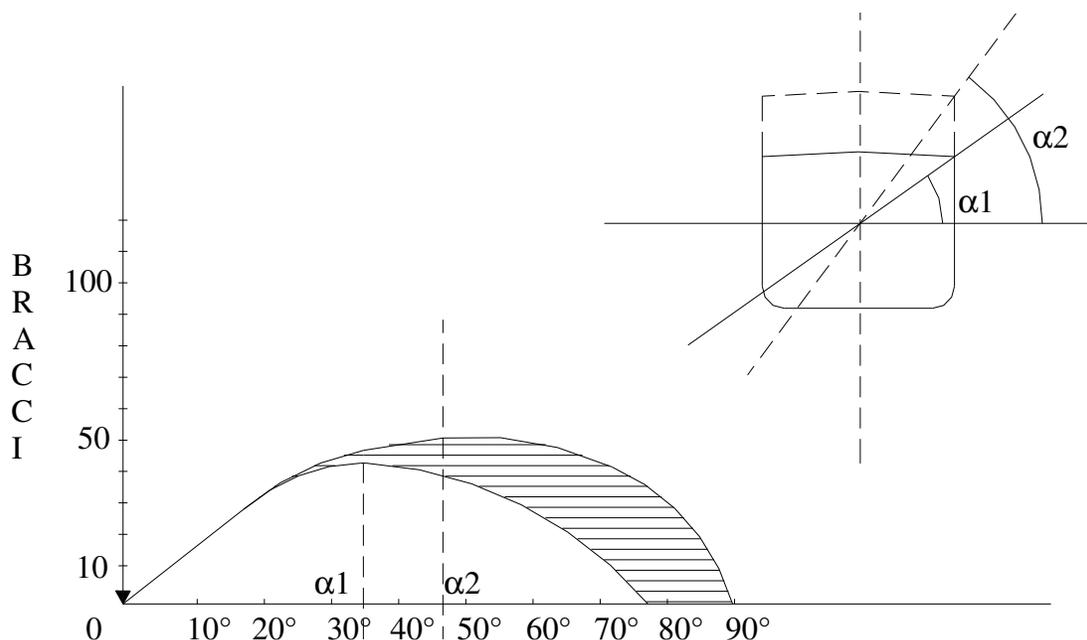
ANALISI DEI DIAGRAMMI DI STABILITÀ STATICA TRASVERSALE (*)

E' necessario chiarire che i comportamenti dinamici della nave in navigazione, sottoposta a condizioni meteomarine avverse, vanno analizzati sulla base dei diagrammi di stabilità dinamica, che verranno in seguito esaminati.

L'Ufficiale di Coperta deve in ogni caso sapere che il diagramma di stabilità statica della nave non rappresenta uno schema fisso e immutabile.

E' necessario quindi esaminare e conoscere ad uno ad uno quali sono gli elementi che possono modificare i diagrammi di stabilità.

Stabilità di forma: ampio bordo libero (*)



L'estensione del diagramma di stabilità e quindi la capacità della nave di resistere ad ampi sbandamenti dipende in gran parte dal **Bordo Libero**.

E' il Bordo Libero che garantisce alla nave non solo **la riserva di galleggiabilità** ma anche la **"riserva di stabilità"** ampliando notevolmente il valore di quest'ultima .

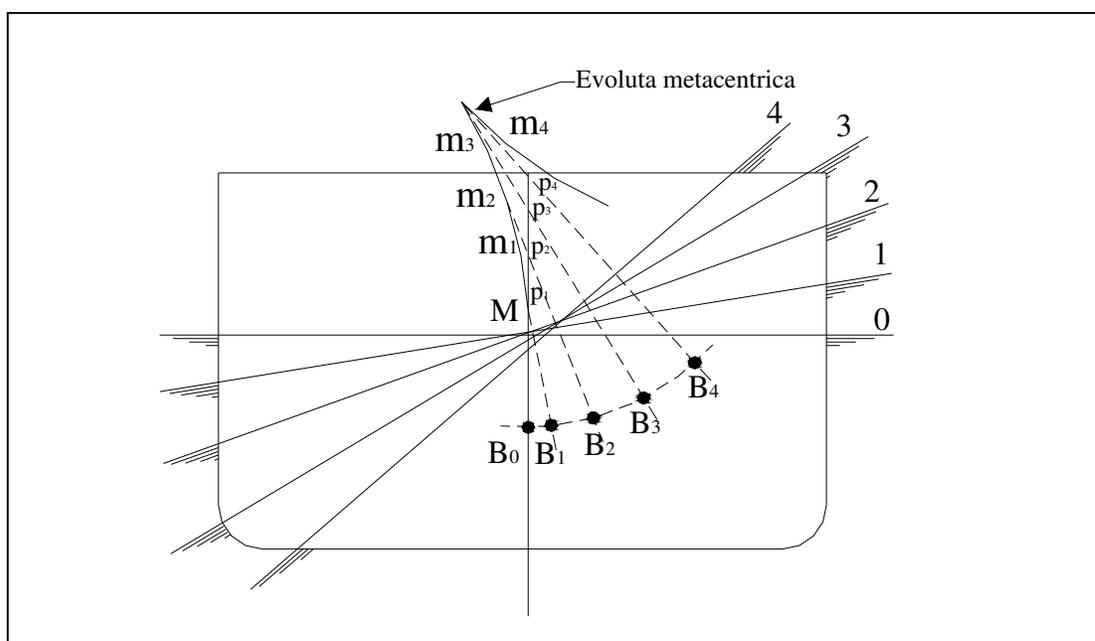
Un ampio bordo libero mantiene un alto valore della superficie della figura di galleggiamento e quindi del raggio metacentrico (r) anche a nave fortemente sbandata e impedisce contemporaneamente al mare di invadere la coperta e provocare così un pericolosissimo sovraccarico dal lato dello sbandamento.

Stabilità di forma : Evolute metacentriche (*)

Se la forma della carena è tale che, partendo da nave dritta, alle successive inclinazioni isocareniche, l'area delle figure di galleggiamento aumenta (**sino ad una certa inclinazione**), anche il valore del momento di inerzia di tale area aumenta e quindi il valore stesso del raggio metacentrico (r).

Si dice che queste navi (generalmente a murate verticali) hanno una “evoluta metacentrica” inizialmente a rami ascendenti, il che favorisce la loro stabilità .

Evoluta Metacentrica a rami inizialmente ascendenti.



I raggi di curvatura (r) della curva dei centri di galleggiamento ($B_0 - B_1 - B_2 - B_3$ ecc.) aumentano inizialmente man mano che la nave si inclina trasversalmente, fino ad un certo angolo di inclinazione, poiché aumenta la superficie della figura di galleggiamento.

Il metacentro (M) iniziale comincia a spostarsi lungo una curva ($M - m_1 - m_2 - m_3$ ecc.) detta “evoluta metacentrica”.

Nelle navi a murate verticali detta evoluta metacentrica possiede rami inizialmente ascendenti e ciò favorisce la stabilità iniziale della nave.

STABILITA' DI PESO : come aumentare la stabilità della nave (*)

Nella formula generale che consente di ottenere i momenti di stabilità della nave per inclinazioni non superiori a 12° (metodo metacentrico) e che qui ripetiamo, $M_s = D (r - a) \text{ sen } \alpha$, **l'unico elemento sul quale il Capitano può intervenire efficacemente per aumentare la stabilità della nave è rappresentato da (a), cioè dalla distanza tra il centro di gravità (G) e il centro di carena (B).**

Abbiamo già visto che se il centro di gravità (G) viene a trovarsi sopra il metacentro (M), la nave ha una stabilità iniziale negativa e, quanto meno, si ingavona. E' necessario pertanto operare in modo tale da **ridurre** il valore di (a), **abbassando il centro di gravità (G)** rispetto alla posizione di (M).

Mentre agli ingegneri navali spetta il compito di collocare le strutture fisse di bordo, e quindi il centro di gravità (G) iniziale, in modo tale da garantire la necessaria stabilità alla nave vuota, pronta a iniziare le operazioni commerciali, agli Ufficiali di Coperta spetta il compito di pianificare la caricazione in modo tale che la nave conservi la sua stabilità in qualsiasi condizione di carico. Gli Ufficiali dovranno inoltre tener conto della presenza di specchi liquidi liberi di oscillare che, pur non provocando sbandamenti della nave, ne diminuiscono l'altezza metacentrica (r - a) e quindi la stabilità.

SPOSTAMENTO DI PESI A BORDO (*)

Qualsiasi spostamento di pesi esistenti a bordo della nave (perfino quello del marinaio che va da prua a poppa) determina un cambiamento di posizione del centro di gravità (GG') nella direzione dello spostamento del peso:

$$\text{variazione (GG')} = \frac{p \times d}{D}$$

dove p = entità del peso (t.)
d = entità dello spostamento (m.)
D = peso o dislocamento della nave (t.)

Spostamento verticale di pesi (*)

Lo spostamento verticale di un peso (già presente a bordo) determina un aumento dell'altezza metacentrica (r - a) se avviene verso il basso ed una diminuzione se avviene verso l'alto.

La variazione dell'altezza metacentrica è data da :

$$GG' = p \times z / D \quad \text{dove (z) rappresenta lo spostamento verticale del peso (p).}$$

Esempio in lingua inglese:

A ship has a displacement of 7200 t., and 100 t. of cargo are moved from the upper deck to the bottom of the hold. If the centre of gravity of the cargo is moved vertically through 7.20 m., **by how much is the metacentric height changed?**

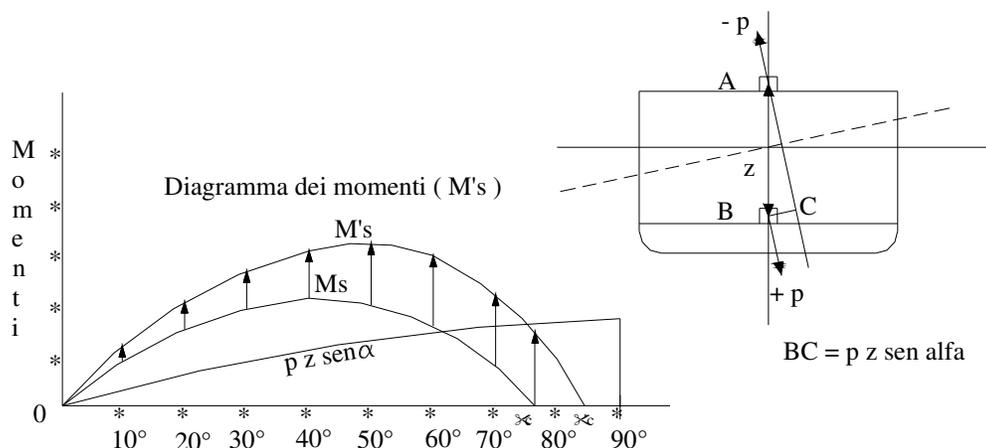
Movement of centre of gravity of ship:

$$GG' = 100 \times 7,20 / 7200 = \mathbf{0,10 \text{ m.}}$$

As the centre of gravity of the ship is lowered, **the metacentric height is increased by 0,10 m.**

Diagramma e grafico

abbassamento di un peso (p)



$M's = D (r - a) \text{sen. alfa} + pz \text{sen. alfa} = D (r - a + pz / D) \text{sen. alfa}$. Al momento di stabilità iniziale (M_s) si **somma** quello della coppia raddrizzante positiva ($pz \text{sen. alfa}$).

Il diagramma della stabilità viene perciò incrementato.

Se il peso fosse invece innalzato si otterrebbe una diminuzione di stabilità.

Spostamento trasversale di pesi (*)

Lo spostamento orizzontale sul piano trasversale di un **piccolo peso (p)** già esistente a bordo, **non modifica la stabilità della nave poiché non altera il valore dell'altezza metacentrica**. Esso produce tuttavia uno sbandamento dovuto alla coppia $p \cdot x \cos \alpha$ a cui la nave si oppone con il proprio Momento di Stabilità iniziale $D \times GM \text{sen. alfa}$.

Quando le due coppie si equilibrano, la nave cessa di sbandare. Per piccoli angoli di sbandamento il valore dell'angolo è dato da :

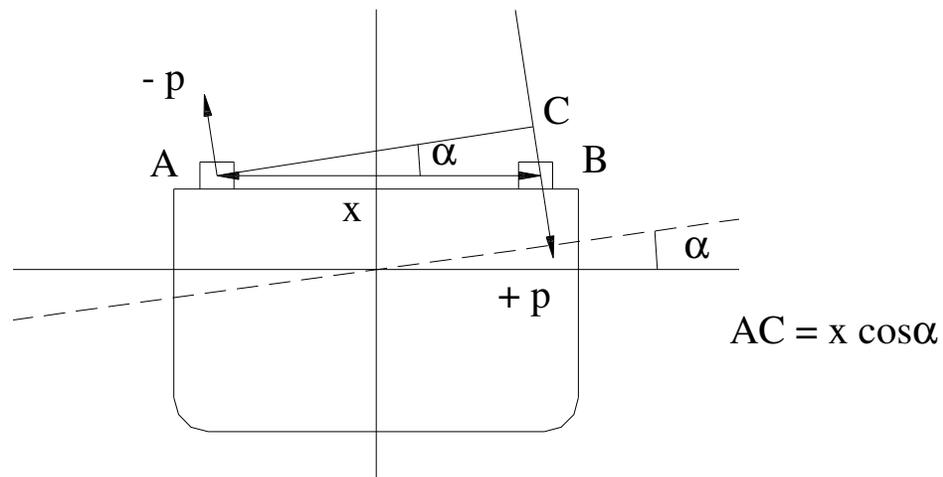
$$\text{tang. alfa} = p \cdot x / D \times GM$$

Esempio :

Un container del peso di 18 t. viene tramaccato da un lato all'altro del ponte di coperta di una nave inizialmente dritta, con uno spostamento del suo baricentro di 12 m..La nave disloca 8.700 t. e il valore di GM è eguale a 0,75 m.

Calcolare l'angolo di sbandamento della nave provocato dallo spostamento del container.

$$\text{tang. alfa} = 18 \times 12 / 8.700 \times 0,75 = 216 / 6.525 = 0,033 = 1,9^\circ$$



Lo spostamento di piccoli pesi non determina una variazione della stabilità statica iniziale della nave, poiché l'elemento $(r - a)$ non viene alterato.

La prova di stabilità viene infatti eseguita con lo spostamento trasversale di un piccolo peso proprio perché non influenza, ma anzi misura, la stabilità della nave.

Diversa è la condizione di una nave che ha subito lo spostamento laterale del carico con sbandamento e perdita di stabilità.

Questo problema sarà affrontato in seguito.

Pesi sospesi (*)

Un peso già presente a bordo, sospeso per qualsiasi motivo per mezzo di una gru o picco di carico, trasferisce il proprio centro di gravità sul punto di sospensione nel momento stesso in cui si stacca dall'appoggio.

Per questo motivo un peso sospeso ha lo stesso effetto negativo sulla stabilità della nave di quello provocato dallo spostamento verticale dello stesso peso fino al punto di sospensione.

L'entità della diminuzione del valore dell'altezza metacentrica ($r - a$) è data dal solito rapporto:

$$GG' = pz / D$$

dove p = entità del peso (in tonnellate)

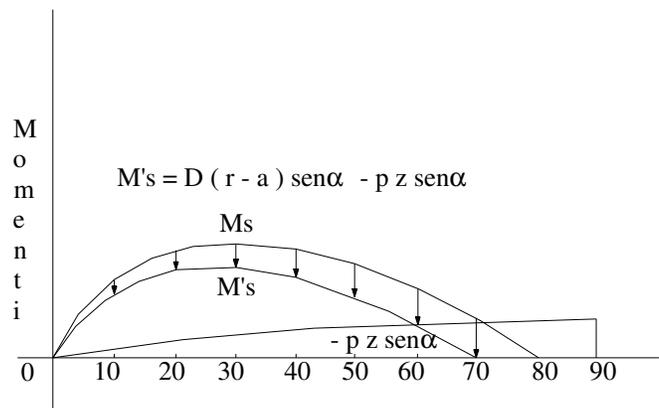
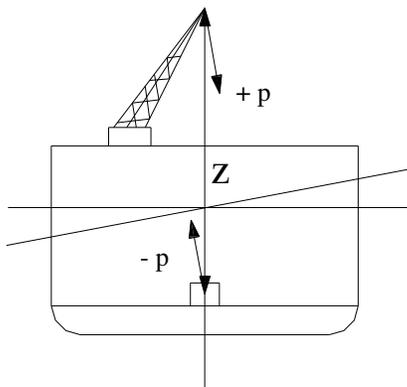
z = distanza tra il punto di sospensione e il centro di gravità del peso (in metri)

D = Dislocamento della nave (in tonnellate)

GG' = diminuzione dell'altezza metacentrica (in metri)

Abbiamo visto che lo spostamento verticale di pesi determina un momento sinusoidale ($pz \text{ sen } \alpha$) che può incrementare o diminuire il diagramma di stabilità statica trasversale della nave.

Nel caso di pesi sospesi la variazione è sempre negativa.



Esempio numerico:

Un peso di 80 t. viene sollevato dal fondo stiva di una nave che disloca 8.000 t. per mezzo di una speciale gru di bordo. La distanza tra il baricentro del peso e il punto di sospensione è di 15 m. Calcolare la diminuzione di altezza metacentrica (GG') nel momento in cui il peso viene sollevato.

$$GG' = 80 \times 15 / 8000 = 0,15 \text{ m.}$$

Supponendo che la precedente altezza metacentrica fosse 0,95 m, la nuova altezza sarà data dalla differenza tra 0,95 m. e 0,15 m.e cioè 0,80 m.

Se il peso viene infine sbarcato bracciandolo in fuori per 8 metri dal precedente punto di sospensione la nave, con il peso bracciato in fuori, si sbanderà di un angolo alfa pari a :

$$\text{Tang.alfa} = 8 \times 80 / 8000 \times 0,80 = 0,10$$

$$\text{Alfa} = 5,7^\circ$$

Specchi liquidi liberi di oscillare (slack tanks) (*)

Una nave in servizio può presentare dei depositi liquidi parzialmente pieni.

Oltre alle tanks di carico si potrebbe trattare di depositi combustibile, di acqua dolce e/ o zavorra.

Alcuni di questi depositi, posti in consumo, possono vuotarsi gradatamente durante la navigazione provocando, come vedremo, una progressiva diminuzione della stabilità della nave, cioè la

diminuzione della sua altezza metacentrica iniziale ($r - a$), senza che il fenomeno sia percepibile dall'esterno.

La diminuzione è dovuta al manifestarsi di “specchi liquidi liberi di oscillare” la cui azione negativa, pur essendo presente, non si manifesta palesemente.

Esistono diversi casi di navi che si sono rovesciate, anche in mare calmo, a causa del completo annullamento della loro altezza metacentrica iniziale per l'effetto negativo degli specchi liberi.

Il transatlantico Normandie, incendiatosi nel porto di New York, si capovoltò per deficiente stabilità provocata dagli specchi liberi dell'acqua con la quale si inondò lo scafo per spegnere l'incendio.

Lo stesso accadde alla nave passeggeri “Pegasus”, incendiatasi alla banchina della Marittima, a Venezia (soltanto il fondale di mt 10 antistante ne impedì il capovolgimento).

La perdita di stabilità della nave, cioè la riduzione della sua altezza metacentrica ($r - a$), a causa della presenza di specchi liquidi è data dall'espressione:

$d x i / D$

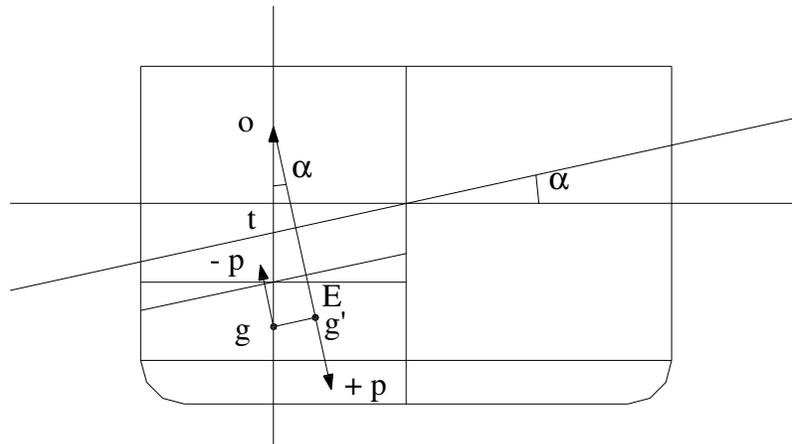
dove $d = \dots\dots\dots$ densità del liquido presente nel deposito

$i = \dots\dots\dots$ momento di inerzia della superficie liquida libera di oscillare rispetto al suo asse longitudinale (metri alla quarta)

$D = \dots\dots\dots$ Dislocamento della nave (tonnellate)

Dimostrazione

Supponiamo che la nave presenti una cisterna, collocata in un punto qualsiasi dello scafo e non completamente piena, in cui è presente un peso (p) di liquido avente densità pari a (d).



Se la nave si inclina (per qualsiasi causa) di un angolo Alfa inferiore ai 12° (metodo metacentrico) il liquido si dispone con la superficie parallela a quella di galleggiamento ed il suo baricentro si sposta da (g) a (g') seguendo un arco centrato in un punto (O) tale che $gO = t$

Si viene quindi a creare una coppia sinusoidale pari a : $p \cdot gE$, cioè $p \cdot t \text{ sen. alfa}$ che rappresenta, per la nave, un momento sbandante.

Il nuovo momento di stabilità sarà dato da :

$$M's = D (r - a) \text{ sen alfa} - p t \text{ sen alfa}$$

In cui $t = i / v$

Essendo imomento di inerzia dello specchio liquido rispetto all'asse longitudinale

vvolume del liquido presente nella tanka

Si può anche affermare che la diminuzione di stabilità è pari a quella provocata da un peso libero di oscillare agganciato al punto di sospensione (O).

Di conseguenza $M's = D (r - a - p t / D) \text{ sen alfa}$

che dimostra la diminuzione dell'altezza metacentrica della nave a causa della presenza di specchi liquidi liberi di oscillare.

Per quanto riguarda il calcolo necessario a determinare il valore della diminuzione dell'altezza metacentrica (- $p t / D$), la formula viene semplificata nel modo seguente:

Essendo $(p) = d \times v$

dove $(d) =$ densità del liquido presente nella tanka

$(v) =$ volume del liquido nella tanka

Essendo $(t) = i / v$

dove $(i) =$ valore del momento di inerzia della superficie liquida libera di oscillare rispetto all'asse longitudinale

$(v) =$ volume del liquido nella tanka

avremo: $p t = d \times v \times i / v = d \times i$

Per ciò il nuovo momento di stabilità sarà dato da :

$$\underline{\underline{M's = D (r - a - d \times i / D) \text{ sen alfa } (*)}}$$

In cui conosciamo il valore di tutti gli elementi salvo quello (i) del momento di inerzia dello specchio liquido libero di oscillare.

Questo valore è calcolabile usando le formule già viste in precedenza quando trattavamo dei momenti di inerzia di figura geometriche semplici (rettangolo, triangolo, cerchio).

Ricordiamo che le cisterne e i depositi liquidi hanno generalmente forma rettangolare:

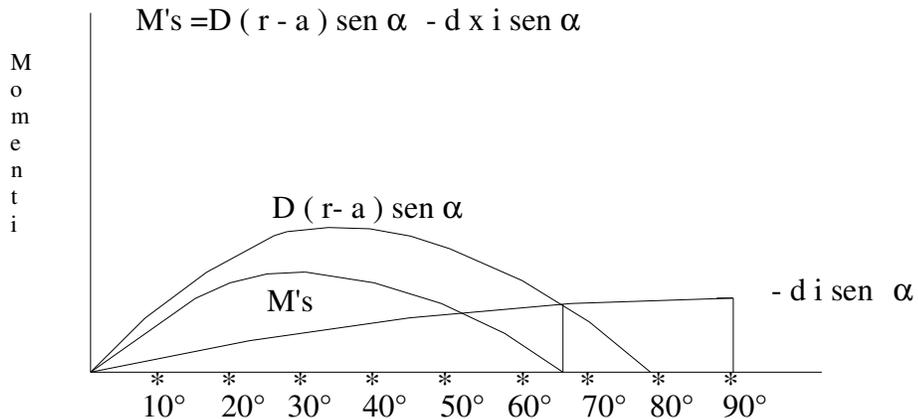
Il valore (i) di uno specchio liquido libero di oscillare di forma rettangolare rispetto al suo asse baricentrico longitudinale è dato dalla nota espressione:

$$i = \frac{L \times B^3}{12}$$

Se il deposito viene diviso in due per mezzo di una paratia stagna longitudinale, il momento di inerzia diminuisce di 4 volte.

Per questo motivo la navi destinate al trasporto di carichi liquidi, oltre a riempire a tappo i depositi, pur dando al liquido la possibilità di dilatarsi, hanno almeno una paratia longitudinale continua e stagna. (*)

Diminuzione di stabilità per specchi liberi di oscillare- Diagrammi



Esempio in lingua inglese:

A ship has oil of relative density 0,88 in a tank of length 12 m. and breadth 9,5 m. The oil has a free surface. The displacement of the ship is 8.700 tonnes.

Determine the loss of metacentric height due to the free surface.

$$i = \frac{1}{12} \times 12 \times 9,5^3 = 857 \text{ metri alla quarta}$$

$$\text{Perdita di altezza metacentrica (loss of GM)} = \frac{0,88 \times 857}{8.700} = 0,087 \text{ m. (9 cm. circa)}$$

Onde limitare la perdita di stabilità dovuta alla presenza di specchi liquidi liberi di oscillare, la larghezza delle tanche, già nella fase di progetto di costruzione della nave, viene ridotta quanto più è possibile.

NOTA BENE

Con buona approssimazione possiamo dire che la diminuzione dell'altezza metacentrica per la presenza di specchi liquidi è pari a i / V dove (i) è il momento di inerzia dello specchio liquido e (V) il volume dello scafo immerso della nave.

In seguito a collisione o per qualsiasi altro motivo (falla o spegnimento incendio) l'acqua potrebbe invadere i grandi spazi della nave destinati al carico e non compartimentati longitudinalmente. A quel punto il valore negativo (i / V) degli specchi liberi che si vanno formando, potrebbe eguagliare quello del piano di galleggiamento della nave (I / V). In questo malaugurato caso i valori di GM e di GZ potrebbero essere annullati e la nave si capovolgerebbe rapidamente anche in mare calmo (caso Andrea Doria).

SPECCHI LIQUIDI LIBERI DI OSCILLARE

I momenti (FSM : FREE SURFACE MOMENTS) dovuti agli specchi liquidi liberi di oscillare presenti nelle tanche non completamente piene di acqua zavorra, combustibile o carico liquido, sono sempre stati analizzati e calcolati con la formula classica :

$$\text{FSM} = i \cdot d \text{ (tonn-metri)}$$

dove (i) rappresenta il momento di inerzia della superficie libera di oscillare rispetto all'asse longitudinale (y) e (d) rappresenta la densità del liquido contenuto in essa.

Per quantificare la riduzione (GG') dell'altezza metacentrica iniziale (r -a) dovuta alla presenza degli specchi liquidi liberi di oscillare viene usata la formula:

$$GG'(\text{metri}) = i \cdot d / D$$

Questa formula risulta di uso comune e viene praticamente adottata da tutti i testi che trattano la stabilità della nave.

Essa non tiene però conto del grado di riempimento del deposito che influisce sempre più con l'aumentare dell'angolo di sbandamento che la nave potrebbe subire a causa di forze esterne e per intrinseca incapacità ad opporsi a dette forze sbandanti.

Esempio di calcolo :

una nave che disloca (D) 10.000 tonn. presenta una tanca, piena al 50% , contenente un liquido di densità(d) pari a = 0,9 .

Le dimensioni della tanca sono: altezza (h) = 5,80 m.,larghezza (b) =10 m. ,lunghezza (L) =10 m. determinare la riduzione (GG') della sua altezza metacentrica iniziale.

$i = 1/12 \times L \times b^3$ avremo $I_y = 833,3$ metri alla quarta quindi $FSM = 833,3 \times 0,9 = 750$ tonn-metro
 $d = 0,9$

$D = 10.000$ t.

$$GG' = 833,3 \times 0,9 / 10.000 = 0,075 \text{ m.}$$

Cioè l'altezza metacentrica iniziale si riduce di 7,5 cm. a causa della presenza del liquido nella tanca dimezzata.

Uno studio australiano, pubblicato sull' International Journal of Maritime Engineering, prende invece in considerazione alcuni elementi ignorati dal calcolo tradizionale e cioè:

- a) La quantità di liquido presente nella tanca, evidenziando che il momento sbandante (FSM), dovuto alla presenza di specchi liquidi liberi di oscillare, è massimo quando la tanca è piena al 50% della sua capacità.
- b) Il rapporto tra la larghezza della tanca e la sua altezza (b / h) , evidenziando come il momento (FSM) sia massimo con tanche cubiche dove $b / h / L = 1$ (uno).
- c) L'angolo di sbandamento (Alfa) cui è sottoposta la nave per varie cause , evidenziando che per angoli di sbandamento fino a 30° e per tanche in cui il rapporto larghezza/ altezza sia compreso tra 3 e 1 il valore del momento (FSM) è maggiore, ma non si discosta molto, da quello calcolato con il metodo classico ($FSM = i \cdot d$).

Il momento (FSM) raggiunge invece valori elevatissimi su tanche in cui il rapporto larghezza/ altezza sia prossimo a 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4.

Si tratta di tanche a forma di "pozzo" molto ridotte in larghezza ma molto profonde e decisamente inusuali sulle navi normali.

Inoltre il vertiginoso aumento del loro FSM avviene solo in corrispondenza di angoli di sbandamento compresi tra 80° e 90° ,quando, a nostro parere, il capovolgimento della nave non è più scongiurabile, ma per motivi di instabilità dovuti a ben altre cause come Allagamenti per Falla, per Collisione, ecc.

Tralasciando questi casi limite e ritornando alla tanca presa in esame nell'esempio precedente, proviamo a calcolare il suo momento (FSM) secondo il programma di calcolo definito "Hydromax".

Per un angolo di sbandamento di 30° , tenuto conto che la tanca suddetta sia piena al 50% di un liquido (Vt) di densità (d) dobbiamo sviluppare una formula piuttosto complessa per ottenere il FSM ricercato.

$$FSM = V_t d_t \left[\frac{h}{4} + \frac{b}{4 \tan \alpha} - \frac{h^2}{6 b \tan \alpha} \left(1 + \frac{1}{2 \tan^2 \alpha} \right) \right]$$

Dove $V_t = 290$ m.cubi (volume del liquido presente nella tanca dimezzata)

$d = 0,9$ densità del suddetto liquido

$h = 5,80$ m. (altezza della tanca)

$b = 10$ m. (larghezza della tanca)

$L = 10$ m. (lunghezza della tanca)

$\alpha = 30^\circ$ (angolo di sbandamento della nave)

Avremo:

$$FSM = 290 \times 0,9 \left[\frac{5,80}{4} + \frac{10}{4 \times 0,57735} - \frac{33,64}{6 \times 10 \times 0,57735} \left(1 + \frac{1}{2 \times 0,33333} \right) \right]$$

$$FSM = 261 \left[1,45 + 4,33 - 0,97 (1 + 1,5) \right]$$

$$FSM = 261 (1,45 + 4,33 - 2,43) = 261 \times 3,35$$

$$FSM = 874 \text{ tonn-metro}$$

Da cui avremo che $GG' = 874 / 10.000 = 0,085$ metri (approssimati)

quindi con un incremento di circa 1 cm rispetto al sollevamento subito dal centro di gravità dovuto allo specchio libero di oscillare calcolato con il metodo classico (0,075 metri).

IL SISTEMA CLASSICO CHE PERMETTE DI CALCOLARE IL MOMENTO (FSM = i . d) DOVUTO ALLE SUPERFICI LIBERE DI OSCILLARE VA DUNQUE CONSIDERATO COME IL PIU' SEMPLICE E VALIDO PER LA CORREZIONE DELL'ALTEZZA METACENTRICA INIZIALE DELLA NAVE IN RELAZIONE AL DISLOCAMENTO (D) DELLA STESSA SECONDO LA FORMULA:

$$(r - a)' = (r - a) - GG' = \left(r - a - \frac{i \cdot d}{D} \right)$$

E' evidente, come risulta da questa equazione, che la variazione dell'altezza metacentrica iniziale (GG') dovuta alla presenza di specchi liquidi liberi di oscillare, è inversamente proporzionale al dislocamento (D) della nave.

A parità di momento (FSM), più grande è il dislocamento (D) della nave, minore sarà la variazione negativa dell'altezza metacentrica iniziale.

NOTA :

Nel corso di questi ultimi anni l' IMO (International Maritime Organization) ha stabilito alcuni criteri da rispettare per assicurare la stabilità iniziale delle navi e quindi la loro navigabilità.

Tra l'altro è stato indicato un metodo di calcolo del Free Surface Moment (FSM) basato sulla seguente formula:

$$FSM = v \cdot b \cdot d \cdot k \cdot \text{delta}$$

dove : v = Capacità totale della tanca (metri cubi).

b = Larghezza della tanca (metri).

d = Peso specifico o densità del fluido (tonn./metro cubo).

k = coefficiente non dimensionale secondo il rapporto b/h e secondo il valore dell'angolo di sbandamento della nave.

$$\text{delta} = \frac{v}{b \cdot h \cdot L} \quad \text{Coefficiente di finezza della tanca (che presumiamo uguale a 1).}$$

L = Lunghezza della tanca.

Se applicassimo questa formula per calcolare il FSM della tanca indicata nell' esempio precedente avremmo:

$$FSM = 580 \times 10 \times 0,9 \times 0,08^* \times 1 = 417,6 \text{ tonn.-metro}$$

* essendo k = 0,08 estrapolato da apposite tabelle (IMO) per un angolo di sbandamento di 30° e per il rapporto b/h della nostra tanca pari a 1,72.

Il FSM / D così calcolato non indica però il valore della riduzione dell'altezza metacentrica iniziale (GG') bensì il valore della riduzione del BRACCIO DI RADDRIZZAMENTO GG' sen Alfa.

Ossia :

$$GG' \text{ sen Alfa} = \frac{FSM}{D} \quad \text{da cui} \quad GG' = \frac{FSM}{D \text{ sen Alfa}}$$

Ritornando all'esempio precedente e applicando questa formula IMO avremo:

$$GG' = \frac{417,6}{10.000 \text{ sen } 30^\circ} = \frac{417,6}{10.000 \cdot 0,5} = 0,084 \text{ m.}$$

Molto simile al valore trovato con il sistema normalmente adottato o con il sistema Hydromax.

Comunque, in accordo con i migliori studiosi in materia, consigliamo di calcolare il valore della riduzione dell'altezza metacentrica iniziale, dovuto alla presenza di specchi liquidi liberi di oscillare, usando il metodo classico (GG' = i . d / D) generalmente adottato in tutti i testi che si occupano di stabilità della nave.

E' necessario tuttavia precisare che questo metodo, generalmente adottato, ha la sua validità nei limiti delle condizioni dello stato del mare, anche molto severe, in cui una nave può venirsi a trovare sottoposta a forti movimenti di rollio.

Inoltre il suddetto metodo non tiene conto del fenomeno di "SLOSHING" cioè dello scuotimento del liquido libero di oscillare all'interno della tanca. Questo fenomeno può comportare ulteriori

elementi negativi per la stabilità e integrità dello scafo durante le violenti rollate che si possono registrare nel mare in burrasca.

Per angoli di sbandamento molto ampi la formula classica non può più essere adottata.

A quel punto però, come abbiamo già detto, la stabilità della nave è compromessa per altre gravi cause.

Vanno allora considerati tutti quei nuovi sistemi di calcolo elaborati grazie alle recenti applicazioni dell'indagine ingegneristica computerizzata legata alla stabilità della nave, come la ricerca " Hydromax" o quella che ha generato la formula IMO.

Diminuzione di stabilità dovuta a spostamento del carico (*)

Il carico può spostarsi trasversalmente a causa del violento rollio della nave nel mare agitato.

Gli effetti dello scivolamento del carico sono:

- Una inclinazione permanente sul lato verso il quale il carico si è spostato.
- Il diagramma di stabilità è ridotto (diminuzione del valore dell'angolo di capovolgimento).
- Il valore massimo di GZ (braccio di raddrizzamento) è ridotto, sul lato dello sbandamento.
- La stabilità dinamica è ridotta, sul lato dello sbandamento.

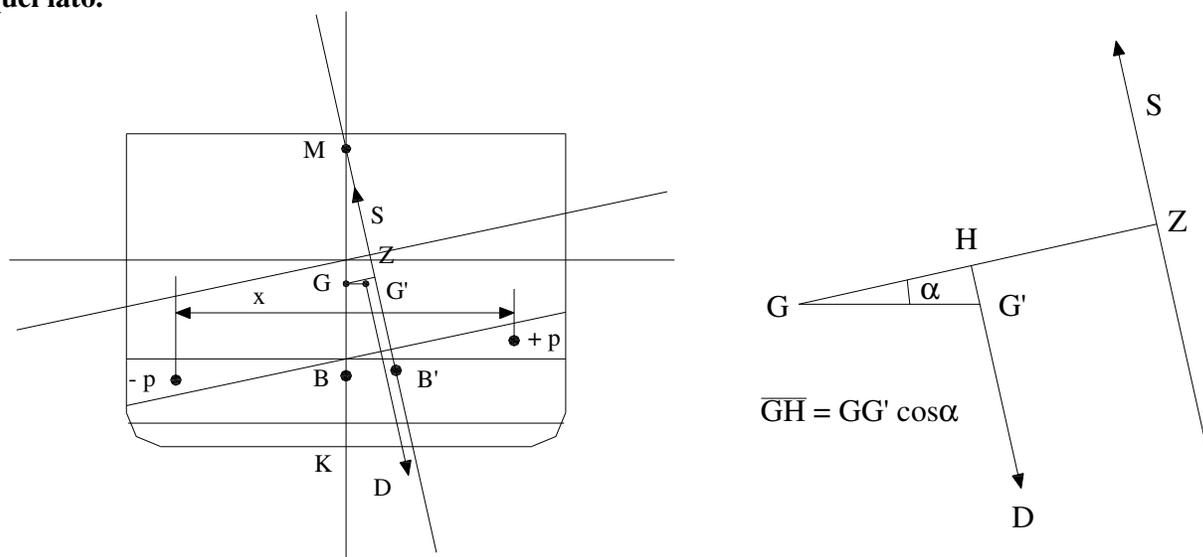
Una situazione di questo genere si può verificare nel trasporto di carichi secchi come le granaglie, il minerale e, in casi eccezionali, anche il carbone.

Questi tipi di carico alla rinfusa si costipano durante il viaggio per mare cosicché le stive che inizialmente apparivano piene, presentano in seguito spazi vuoti in alto.

Tutti i materiali suddetti presentano un "angolo di riposo" (o di declivio naturale).

Se la nave raggiunge rollando angoli di sbandamento superiori all'angolo di riposo, il carico si sposta lateralmente e non ritorna più nella precedente posizione.

Di conseguenza si potrebbe verificare un trasferimento permanente del carico su un fianco della nave **con pericolo di rovesciamento in seguito a rollate successive per forte riduzione di stabilità su quel lato.**



Lo spostamento di una parte del carico (p) per la distanza (x) determina lo spostamento proporzionale del centro di gravità della nave (G) nella stessa direzione (GG').

In realtà il centro di gravità della nave (G) subisce anche un leggero innalzamento di cui, agli effetti pratici, non si tiene conto.

Si deve invece tener conto dello spostamento orizzontale (GG') del centro di gravità.

Il valore di GG' è dato dal rapporto : $p \cdot x / D$

Lo spostamento del centro di gravità della nave comporta la diminuzione del braccio di raddrizzamento (GZ) di una quantità (GH) pari a $GG' \cos \alpha$.

In definitiva il valore del nuovo braccio di raddrizzamento dal lato dello sbandamento sarà dato dall'espressione:

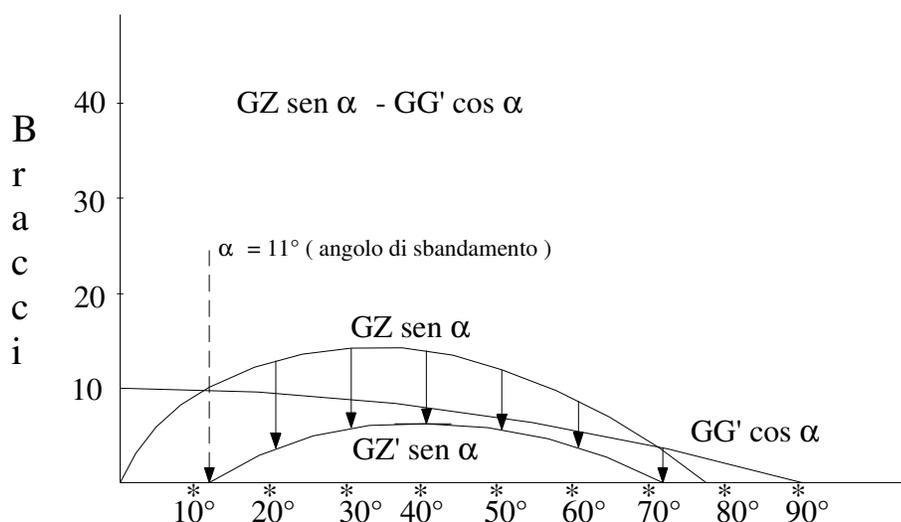
$$GZ' = GZ - (p \cdot x / D) \cos \alpha$$

dove p = entità del peso del carico spostato (tonn.)

x = entità dello spostamento del peso (metri)

D = dislocamento della nave (tonn.)

Ricordiamo che queste formule sono valide per angoli di sbandamento compresi intorno ai 12° (metodo metacentrico).



Lo spostamento del carico rappresenta un'azione di carattere cosinusoidale che agisce sulla nave facendola inclinare dal lato dello spostamento e diminuendo il valore del suo braccio di raddrizzamento.

E' vero che il braccio di raddrizzamento viene aumentato sul lato opposto allo sbandamento ma ciò determina delle rollate più contenute su quel lato e impedisce al carico di ritornare nella sua posizione originale.

Ulteriori spostamenti del carico sul lato sbandato porterebbero al capovolgimento della nave.

In passato molte navi sono andate perdute a causa dello scorrimento del carico.

Nel dicembre del 1969 la nave "Fusina", partita da Porto Vesme con un carico di blenda(1), si capovolsse, a causa dello spostamento del carico provocato dal rollio per mare al traverso, affondando davanti a Capo Sandalo (Isola di S.Pietro). Solo un membro dell'equipaggio riuscì a salvarsi.

E' chiaro dunque che la nave sbandata si trova in una situazione di pericolo a cui è necessario sottrarla al più presto assumendo una prora che diminuisca il rollio e conducendola in acque più tranquille.

Per tutti questi motivi, nelle navi adibite al trasporto di carichi scorrevoli vengono adottati speciali accorgimenti, sia in fase di costruzione che durante la caricazione, onde limitare al massimo il pericolo dello scorrimento del carico. (*)

Esempi di angoli naturali di declivio naturale di carichi alla rinfusa:

grano e granaglie = circa 28°

carbone..... = circa 45°

(1) Minerale (solfuro di zinco) che in determinate condizioni diventa scorrevole

STABILITA' PER GRANDI ANGOLI DI SBANDAMENTO

Finora abbiamo considerato la stabilità della nave nell'ambito di **piccoli angoli di sbandamento** (metodo metacentrico).

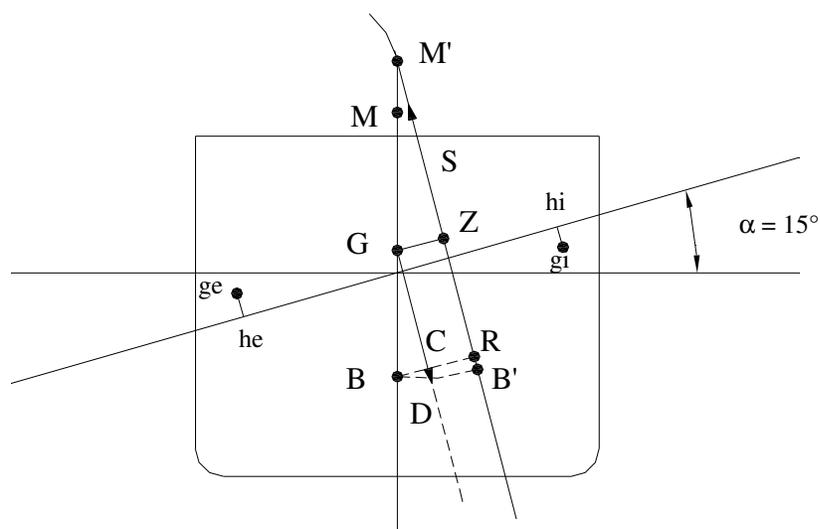
In quei casi abbiamo senz'altro applicato la formula : $M_s = D (r - a) \text{ sen } \alpha$ poiché la nave, sbandando, mantiene invariata la posizione del metacentro (M) e gli sbandamenti avvengono intorno all'asse centrale longitudinale della figura di galleggiamento.

Nelle navi a murate verticali (wall-sided ships) quando l'angolo di sbandamento comincia a superare i 5°, la posizione del metacentro (M) non rimane fissa e inoltre lo sbandamento non avviene più intorno al suddetto asse centrale longitudinale.

Fino ad un angolo di sbandamento di 12° circa, le formule del metodo metacentrico sono comunque valide per stabilire il valore del braccio di raddrizzamento: $GZ = (r-a) \text{ sen } \alpha$

Oltre questo angolo di sbandamento il metodo metacentrico non rappresenta più un sistema corretto per determinare la stabilità della nave.

Il valore del braccio di raddrizzamento (GZ), ricavato dal diagramma di stabilità, costituisce, in questo caso l'elemento da usare per determinare il momento di stabilità : $M_s = D \times GZ$.



Esiste tuttavia una formula, detta di Atwood, che si applica alle navi a murate verticali, che consente di calcolare il valore del braccio di raddrizzamento (GZ) in base all'angolo di sbandamento (alfa) subito dalla nave . Poiché $GZ = BR - BC$, ed essendo $BC = BG \text{ sen } \alpha$, avremo:

GZ = BR - BG sen alfa

dove il valore di BR= Distanza in metri tra il primitivo centro di spinta (B) e la verticale passante per il nuovo centro di spinta (B') ed il nuovo metacentro (M'), è dato dall'espressione:

$$BR = \frac{v \times h_e \times h_i}{V} \quad \text{essendo } v = \text{volume di sovrimmersione della carena dal lato dello sbandamento}$$

h_e e h_i le altezze dei baricentri dei volumi di emersione e di immersione rispetto alla linea di galleggiamento relativa alla nave fortemente sbandata.

V il volume della carena immersa della nave sbandata.

Questo tipo di calcolo è però particolarmente laborioso, presenta notevoli difficoltà e vari metodi di procedura che comprendono l'uso degli integrali e del computer.

Pertanto, per grandi angoli di sbandamento, il braccio di raddrizzamento (GZ) deve essere dedotto direttamente dal diagramma di stabilità.

Alcune note sulla stabilità:

- 1) Quando una nave completamente carica e con i doppifondi pieni risulta instabile, allora l'unica azione possibile per aumentarne l'altezza metacentrica e quindi la stabilità è quella di procedere allo sbarco o al getto dei pesi imbarcati in alto (per esempio sopra coperta).
- 2) Sarebbe comunque buona norma che la caricazione della nave avvenisse collocando in basso le merci più pesanti e in alto quelle più leggere in modo tale che la stabilità sia già assicurata dalla sola disposizione del carico.
La stabilità della nave non dovrebbe essere infatti garantita, come spesso avviene, soltanto dal riempimento dei doppifondi di zavorra poiché ciò potrebbe comportare il rischio di capovolgimento in seguito a collisione, incagli o strisciamento su fondali rocciosi che provochino la perdita anche parziale di queste strutture. Per buona norma il carico dovrebbe essere distribuito nel modo seguente : 2/3 in stiva, 1/3 in corridoio di cui 1/10 (prelevato dal corridoio) in coperta.
- 3) Le navi ingavonate (inizialmente instabili) possono essere raddrizzate pompando acqua nei doppifondi, se utilizzabili, vale a dire caricando pesi in basso, a cominciare dal doppiofondo del lato dello sbandamento per evitare violenti e pericolosi sbandamenti in senso opposto.
Naturalmente all'inizio, la nave ingavonata potrebbe inclinarsi ancora di più a causa dell'effetto negativo prodotto dagli specchi liquidi liberi di oscillare che si formano nei doppi fondi in fase di riempimento. Questo effetto negativo scomparirà quando i doppifondi saranno pieni e la nave comincerà a raddrizzarsi avendo riacquisito la sua stabilità.

CONSIDERAZIONI SULLA CURVA DI STABILITA' STATICA TRASVERSALE (*)

Il diagramma relativo ai bracci di raddrizzamento (GZ) presenta diversi elementi utili per indicare la stabilità della nave.

Abbiamo già visto che la pendenza della curva alla sua origine determina il valore (GM) dell'altezza metacentrica e quindi della sua stabilità iniziale.

Il valore massimo dell'ordinata della curva dei GZ moltiplicata per il dislocamento della nave (D) indica il valore equivalente al più grande momento statico di una forza sbandante a cui la nave riuscirebbe ad opporsi senza capovolgersi.

Questo valore e il valore dell'angolo di sbandamento relativo sono entrambi molto importanti.

Il valore dell'angolo di capovolgimento (alfa c) in corrispondenza del quale l'elemento GZ diventa nullo o scompare, rappresenta l'angolo di sbandamento massimo dal quale una nave sbandata può ritornare in posizione dritta quando cessa la causa sbandante.

Questo angolo viene definito "angolo di capovolgimento", e definisce anche la curva in cui i bracci di raddrizzamento (GZ) hanno sempre valore positivo e quindi indica la stabilità della nave.

La stabilità, come abbiamo già visto, viene incrementata dal bordo libero della nave e quindi dalla sua riserva di spinta.

STABILITA' DINAMICA TRASVERSALE (*)

Fino ad ora la stabilità è stata considerata come un problema statico. In realtà si tratta di un problema dinamico.

DEFINIZIONI :

La "Stabilità Dinamica" indica il lavoro (La) che una forza esterna deve compiere per portare la nave da una posizione diritta di equilibrio stabile, ad una posizione inclinata trasversalmente, definita dal corrispondente angolo (alfa) di sbandamento. (*)

Si dimostra che l'area sottesa dal diagramma dei Momenti di Stabilità della nave rappresenta la "Riserva Totale di Stabilità", cioè il lavoro che una forza esterna deve compiere per poter inclinare la nave fino all'angolo di capovolgimento. (*)

Quando la nave abbandona le acque placide del porto ed esce in mare aperto deve essere in grado di affrontare gli elementi marini che agiscono su di essa con forze dinamiche a volte molto intense.

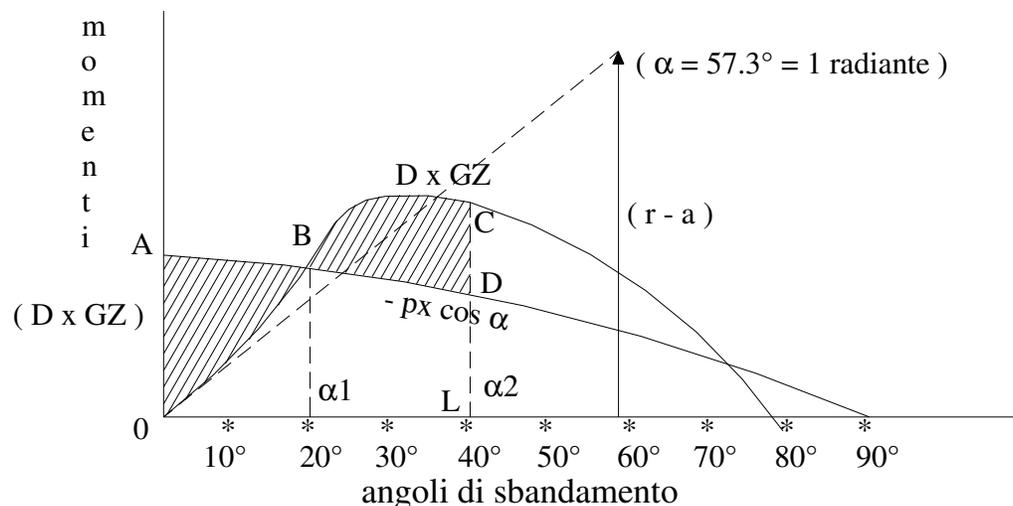
E' necessario pertanto conoscere la sua capacità di opporsi a queste forze specialmente quando esse agiscono in direzione trasversale (al traverso) rispetto all'asse longitudinale dello scafo.

Sappiamo che questa è la situazione più pericolosa poiché in essa il raggio metacentrico (r) della nave raggiunge il suo valore minimo.

La capacità della nave di opporsi a queste forze senza subire movimenti di rollio incompatibili con la sicurezza del carico e dell'equipaggio o che addirittura ne provochino il capovolgimento, rappresenta appunto **la stabilità dinamica. (*)**

ANGOLI DI EQUILIBRIO STATICO E DINAMICO (*)

Una forza esterna (vento e mare) per poter inclinare la nave fino ad un certo angolo di equilibrio statico (alfa 1) deve compiere un lavoro (La) fornito dal momento sbandante di carattere cosinusoidale (p . x cos alfa)



L'area sottesa dal diagramma della forza sbandante ($p \cdot x \cos \alpha$) fino ad un certo angolo di equilibrio statico (α_1) rappresenta il lavoro che la forza esterna (vento e mare) deve compiere per inclinare la nave fino a quel punto.

Come si vede il momento inclinante si esprime con la massima forza ($\cos \alpha = 1$) quando ancora il momento di stabilità della nave è nullo.

Di conseguenza la nave, raggiungendo l'angolo di equilibrio statico (α_1) con una certa energia cinetica, sorpassa quel punto e continua a sbandare fino a raggiungere l'angolo di equilibrio dinamico (α_2).

Affinché la nave raggiunga l'equilibrio dinamico in (α_2), occorre che la sua stabilità dinamica eguagli il lavoro del momento inclinante. (*)

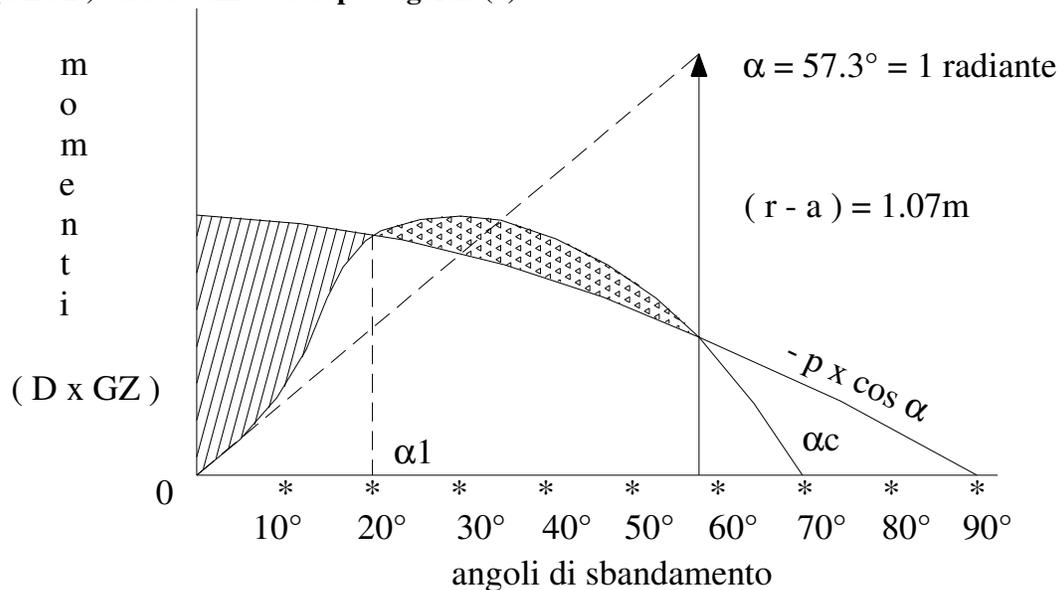
Ciò si verifica quando il lavoro della coppia sbandante rappresentato dalla superficie (OLDA) viene equilibrato dal lavoro del momento di stabilità indicato dalla superficie (OLCB).

In pratica quando le superfici (OBA) e (DCB) si eguagliano.

L'angolo di equilibrio (α_2) è chiamato **angolo di equilibrio dinamico**, perché in esso la nave si trova a fine oscillazione.

In questa posizione la nave non è in equilibrio statico, poiché il suo momento di stabilità statica è superiore (in quel punto) al momento sbandante, e tende quindi a ritornare verso la posizione di equilibrio compiendo una serie di oscillazioni fino ad arrestarsi in corrispondenza dell'angolo di equilibrio statico (α_1).

Se la stabilità dinamica ossia la "riserva di stabilità totale" della nave risulta inferiore al lavoro svolto dalla coppia inclinante ($p \cdot x \cos \alpha$) la nave non trova un angolo di equilibrio dinamico (α_2) ed è destinata a capovolgersi. (*)



È chiaro dunque che un'altezza metacentrica ($r - a$) o un coefficiente di stabilità $[D (r - a)]$ di valore elevato **non rappresentano un elemento di sicurezza per la stabilità della nave.**

La nave che presenta maggiore resistenza al capovolgimento è quella che possiede una vasta riserva di stabilità totale, indicata dalla superficie sottesa dalla curva dei momenti di stabilità ($D \times GZ$) o, in proporzione, dalla curva sottesa dai bracci di raddrizzamento (GZ).(*)

A parità di altre condizioni, la nave che ha maggior bordo libero (murate più alte), è più stabile. (Vedi pagina 18).

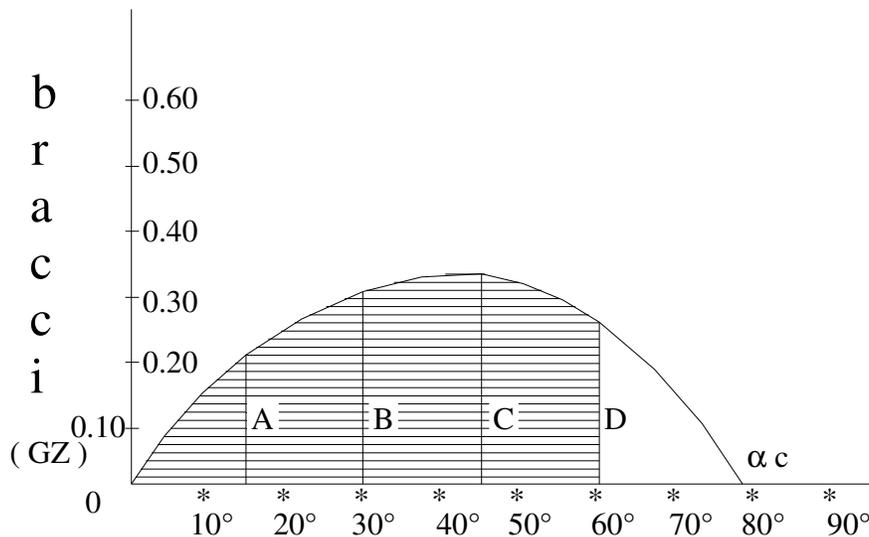
Esempio di calcolo dell'area sottesa dal diagramma dei bracci di raddrizzamento (GZ)

Premesso che :

- a) L'area sottesa dal diagramma dei bracci di raddrizzamento (GZ) è espressa in **metriradiani (mrad)**.
Essa è proporzionale (secondo il dislocamento D) al lavoro da compiere per inclinare la nave fino ad un certo angolo (alfa).
- b) Il prodotto dell'area sottesa dal diagramma, relativa ad un determinato angolo di inclinazione (alfa), per il dislocamento della nave (D), costituisce il lavoro (La) che la forza sbandante deve compiere per poter inclinare la nave fino al detto angolo (alfa).
- c) L'unità di misura del lavoro è il Kilogrammetro = 9,81 Joule = 9,81 Newton per metro.
- d) Un MegaNewton = 1.000.000 di Newton

Esempio : Usando i valori di GZ relativi al particolare diagramma dei bracci di raddrizzamento di una nave avente un dislocamento (D) pari a 15.000 Tonn. determinare la stabilità dinamica (Lavoro) della nave quando viene inclinata fino a 60°.

La determinazione del valore dell'area richiede un calcolo integrale che viene effettuato secondo il sistema di Simpson (1 – 4 – 2 – 4 – 1) dopo aver suddiviso la superficie con ordinate intervallate da angoli uguali (in questo caso 15°).



- A = 0,218 m.
- B = 0,315 m.
- C = 0,340 m.
- D = 0,260 m.

Tabella di calcolo

Inclinazione	GZ (m.)	Moltiplicatore di Simpson	Prodotti
0°	0	1	0
15°	0,218	4	0,872
30°	0,315	2	0,630
45°	0,340	4	1,360
60°	0,260	1	0,260
Somatoria			3,122

L'area sottesa dalla curva dei bracci (GZ) fino a 60° è data dalla formula di Simpson:

$$\text{Area} = 15^\circ/57,3 \times 1/3 \times 3,122 = 0,272 \text{ metriradiani}$$

Il lavoro (La) è dato da:

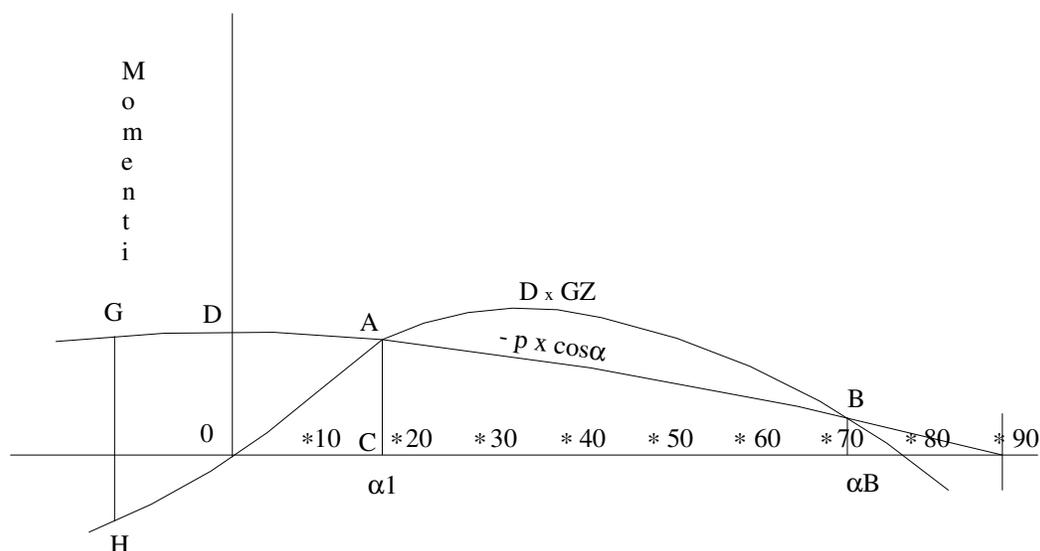
$$\text{Lavoro} = 15.000.000 \text{ (Kg.)} \times 9,81 \times 0,272 = 40,02 \text{ MegaNewtonm.}$$

Ricordiamo che questi esercizi non sono normalmente oggetto di interrogazioni da parte delle Commissioni di Esame.

E' bene tuttavia che un Ufficiale di Coperta conosca, sia pure superficialmente, questo tipo di materia.

Situazione molto pericolosa

Sappiamo che il vento al traverso comporta un'azione sbandante a causa della pressione esercitata sulla superficie dell'opera morta della nave.



L'azione si manifesta attraverso un momento sbandante di carattere cosinusoidale ($p \cdot x \cdot \cos \alpha$) dove (p) rappresenta la pressione del vento e (x) il braccio della coppia cioè la distanza verticale tra il centro di applicazione della forza del vento e il centro di resistenza idrodinamica in cui è applicata la forza di resistenza al movimento laterale attraverso l'acqua.

Una situazione molto pericolosa per una nave che sta rollando si può verificare quando lo scafo, dopo aver raggiunto il massimo angolo di sbandamento sopravento, viene investito da una violentissima raffica di vento mentre sta tornando rapidamente verso la sua posizione di equilibrio.

L'energia accumulata dalla nave a causa del vento e della contro rollata è in questo caso rappresentata dall'area GDACOH.

La nave continuerà ad inclinarsi fino ad assorbire tutta l'energia e potrebbe alla fine superare l'inclinazione di non ritorno (B).

STABILITA' DI PESO SBARCO E IMBARCO PESI

Condizioni di carico

Un piano generale che indichi la posizione, la capacità e la posizione dei centri di volume di tutti gli spazi di bordo dovrebbe normalmente essere fornito al comandante, da parte del Cantiere di Costruzione, anche per aiutarlo ad affrontare particolari condizioni di emergenza.

I dati relativi alla stabilità della nave nelle varie condizioni di carico dovrebbero essere ogni volta calcolati e riferiti al comandante dall'Ufficiale al Carico.

Ciò avviene normalmente attraverso la stesura di un piano di carico che indichi le posizioni dei pesi caricati a bordo, l'attestazione dei pescaggi finali, l'assetto della nave e **il valore dell'altezza metacentrica (r-a)**.

Dal cantiere di Costruzione dovrebbero inoltre essere fornite informazioni sulla stabilità della nave attraverso le curve di stabilità statica.

Le condizioni di carico normalmente previste dovrebbero essere:

- (1) Nave vuota (Lightship)
- (2) Nave in partenza a pieno carico, con carico omogeneo
- (3) Nave in arrivo a pieno carico, con carico omogeneo
- (4) Condizioni di zavorramento
- (5) Altre condizioni di servizio particolari.

Imbarco pesi (senza variazioni di assetto) (*)

Imbarcando o sbarcando un peso (p) piccolo rispetto al dislocamento (D), sulla verticale passante per il baricentro della figura di galleggiamento (F) non si verifica alcuna variazione di assetto.

DISLOCAMENTO UNITARIO (*)

Si definisce "dislocamento unitario" l'entità del peso (Du) che è necessario imbarcare o sbarcare da una nave affinché la sua immersione media subisca la variazione di 1 centimetro (1 / 100 m.)

Il valore del dislocamento unitario, **che varia a seconda del pescaggio per il variare dell'area di galleggiamento**, è dato dall'espressione:

$$Du = f \times A / 100 \quad (1)$$

dove : f = densità dell'acqua

A= Area della figura di galleggiamento

Esempio: Calcolare il dislocamento unitario di una nave avente le seguenti dimensioni relative ad una immersione di 9 metri:

$$L_{pp} = 160 \text{ m.}$$

$$l = 34 \text{ m.}$$

Avevamo già calcolato l'area della superficie di galleggiamento di questa nave con il metodo Simpson ottenendo $A = 3.507 \text{ mq.}$

Considerando pari a 1,025 il valore della densità dell'acqua di mare (f) avremo:

$$Du = \frac{3.507 \times 1 \times 1,025}{100} = 35,95 \text{ Tonnellate}$$

Ciò significa che per variare di 1 cm. il pescaggio medio di quella nave è necessario imbarcare o sbarcare un peso pari a 35,95 tonnellate.

Dalla espressione (1) si può ricavare l'area della superficie di galleggiamento (A) essendo noto il valore del dislocamento unitario (Du) ponendo

$$A = d \text{ unitario} / 0,01 \times 1,025 \text{ -nel nostro caso- } A = 35,95 / 0,01025 = 3.507 \text{ m}^2$$

IMBARCO PESI (*)

L'imbarco di un peso (relativamente piccolo) produce **sempre** un aumento del pescaggio medio della nave.

Esso produce in genere:

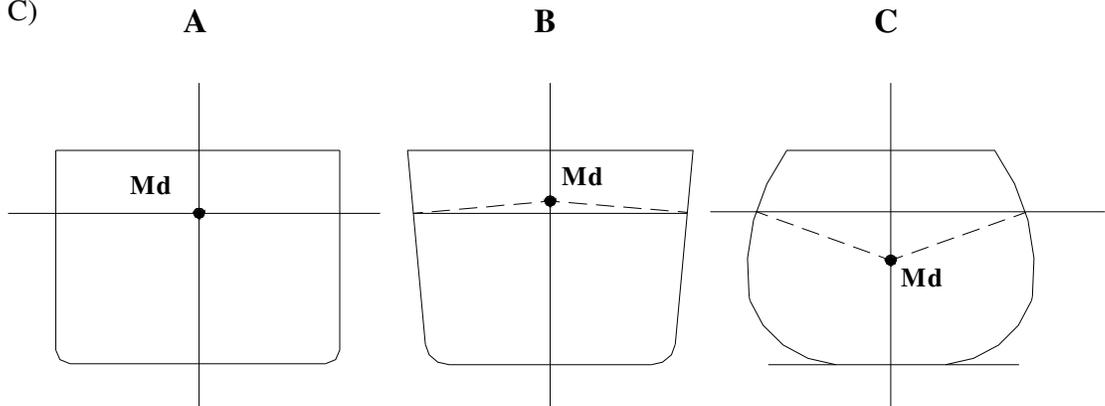
- a - Un aumento o una diminuzione di stabilità a seconda che il peso sia imbarcato al disotto o al disopra del metacentro differenziale di galleggiamento (Md).
- b - Uno sbandamento dal lato in cui il peso è imbarcato qualora l'imbarco avvenga fuori dal piano diametrale longitudinale della nave.
- c - Una variazione di assetto se il peso è imbarcato fuori dal piano trasversale passante per il centro di galleggiamento (F).

METACENTRO DIFFERENZIALE O DI GALLEGGIAMENTO (*)

Si tratta di un punto (Md) molto importante per quanto riguarda la variazione di stabilità di una nave in seguito all'imbarco di un peso (p).

Esso si trova approssimativamente nel punto di incontro, sul piano longitudinale, delle rette normali al perimetro della sezione maestra della nave dove questo incontra la linea di galleggiamento.

Le navi possono presentare murate verticali (caso A), murate svasate (caso B), o murate rientranti (caso C)



Imbarco pesi : variazione di stabilità, sbandamento e assetto. (*)

L'imbarco di un peso relativamente piccolo (p) rispetto al dislocamento (D) della nave, produce **sempre un aumento dell'immersione media, in centimetri**, dato dall'espressione (p : Du).

- a) Se l'imbarco avviene all'altezza del metacentro differenziale trasversale (Md) della figura di galleggiamento non si registra **nessuna variazione di stabilità della nave**.
- b) Se l'imbarco avviene sul piano diametrale longitudinale esso non provoca **nessun sbandamento**.
- c) Se l'imbarco avviene sulla verticale passante per il centro della figura di galleggiamento (F) esso non provoca **nessuna variazione di assetto**.

In realtà le merci vengono imbarcate in posizioni diverse rispetto ai punti e ai piani predetti e sarà quindi necessario sistemarle in modo tale che, a fine caricazione, la nave si trovi in buone condizioni di stabilità, non presenti angoli di sbandamento e assuma un assetto longitudinale idoneo alla navigazione e alla buona governabilità.

Naturalmente gli addetti alla caricazione potranno intervenire per correggere leggeri sbandamenti o modificare l'assetto, utilizzando allo scopo i depositi di zavorra e i gavoni di prora o di poppa.

Considerando le dimensioni relative alla nave presa in esame in precedenza:

$$\begin{aligned} L_{pp} &= 160 \text{ m.} \\ l &= 34 \text{ m.} \\ D &= 40.000 \text{ T.} \\ Du &= 35,9 \text{ TPC} \\ i &= 9 \text{ m.} \\ (r - a) &= 0,87 \text{ m.} \end{aligned}$$

Calcoliamo la variazione di immersione, di stabilità e lo sbandamento provocato dall'imbarco di un peso (p) di 150 T. il cui centro di gravità (g) risulti situato, a fine imbarco, sul piano trasversale passante per il centro di galleggiamento (F), 5 metri (z) sotto il metacentro di galleggiamento (M) e a 12 metri di distanza (x) dal piano longitudinale a dritta.

$$\text{Variazione di immersione media (aumento)} = p / Du = 150/35,9 = \mathbf{4,2 \text{ cm.}}$$

$$\begin{aligned} \text{Variazione di stabilità (aumento dell'altezza metacentrica)} &= p \cdot z / D = \\ &= 150 \times 5 / 40.000 = \mathbf{1,9 \text{ cm.}} \end{aligned}$$

Sbandamento a dritta

$$\text{tang.alfa} = \frac{p \times d}{D' (r - a)'} = \frac{150 \times 12}{40.150 \times 0,89} = 0,05037 = \mathbf{2,9^\circ}$$

Poiché l'imbarco è avvenuto sul piano trasversale passante per il centro della figura di galleggiamento (F) non si registrerà **nessuna variazione** dell'assetto precedente.

Gli effetti sull'immersione, sulla variazione dell'altezza metacentrica, sullo sbandamento e sulla variazione di assetto, dovuti allo SBARCO dello stesso peso dalla stessa posizione, saranno naturalmente OPPOSTI a quelli registrati per l'imbarco.

IMBARCO DI GRANDI PESI

Abbiamo visto come calcolare lo spostamento verticale del centro di gravità ($GG' = p \cdot z / D$) in seguito all'imbarco o lo sbarco di un peso (p) piccolo rispetto al dislocamento (D).

Quando si procede invece all'imbarco di grandi quantità di carico è necessario ricorrere ad un altro schema di calcolo (**basato sul teorema dei momenti**) che ci consente di determinare il valore della distanza dalla linea di sottochiglia (KG') del nuovo centro di gravità della nave ad imbarco avvenuto.

Indichiamo con D il dislocamento iniziale e con KG la distanza iniziale del centro di gravità della nave dalla linea di sottochiglia.

Indichiamo con P il valore del peso di un certo quantitativo di carico e con kG la distanza del centro di gravità di questo peso dalla linea di sottochiglia.

Indichiamo con D' il nuovo dislocamento a imbarco avvenuto ($D' = D + P + P' + P'' + \dots + P_n$) e con KG' la distanza dalla linea di sottochiglia del centro di gravità della nave al termine delle operazioni.

Per il teorema dei momenti

avremo:

$$KG' = \frac{D \times KG + (P \cdot kG + P' \cdot kG' + P'' \cdot kG'' + \dots + P_n \cdot kG_n)}{D'}$$

Dal diagramma delle carene diritte (proprio di ogni nave), in base al nuovo dislocamento (D') è possibile determinare, tra l'altro, la nuova posizione del metacentro (KM') e quindi il nuovo valore dell'altezza metacentrica ($GM' = KM' - KG'$)

Esempio : La nostra nave (di cui conosciamo già tutte le caratteristiche) prima delle operazioni di carico presenta una immersione di 5,00 m e un corrispondente dislocamento ($D = 25800 \text{ T.}$).

La posizione del centro di gravità della nave rispetto alla sua linea di sottochiglia è $KG = 7,00 \text{ m.}$

La posizione del metacentro rispetto alla stessa linea è $KM = 8,30 \text{ m.}$

Il valore dell'altezza metacentrica ($r - a$) = $KM - KG = 1,30 \text{ m.}$

Si domanda quale sarà il valore della nuova altezza metacentrica della nave dopo l'imbarco dei seguenti pesi ($P = 700 \text{ T.} - kG = 10 \text{ m.}$), ($P' = 800 \text{ T.} - kG' = 7,5 \text{ m.}$), ($P'' = 500 \text{ T.} - kG'' = 15 \text{ m.}$)

Avremo:

	Peso	Altezza dal Sottochiglia	Momento rispetto al Sottochiglia
	25.800	7,00	180.600
	700	10,00	7.000
	800	7,50	6.000
	500	15,00	7.500
Totale	27.800 (nuovo dislocamento D')		201.100

per cui $KG' = 201.100 / 27.800 = 7,23 \text{ m}$

Dai diagrammi si rileva, in base al nuovo dislocamento, che la posizione del metacentro è invariata, per cui il valore della nuova altezza metacentrica è dato da

$$GM' = KM - KG' = 8,30 - 7,23 = 1,07 \text{ m.}$$

BORDO LIBERO (*)

La distanza verticale che intercorre tra la linea di galleggiamento e l'intersezione della superficie esterna della murata con quella superiore del ponte più alto (dotato di particolare robustezza e di chiusure stagne per tutta la sua lunghezza) si chiama "bordo libero".

Anche il ponte suddetto viene chiamato "ponte di bordo libero".

Il bordo libero ha il compito di assicurare alla nave l'opportuna **riserva di galleggiabilità**, cioè la riserva di spinta contenuta potenzialmente nel volume di scafo compreso tra la linea di massimo carico e il ponte di bordo libero.

Ciò consente alla nave di non affondare in seguito a sovrainmersioni o allagamenti in coperta che si possano verificare durante la navigazione in mare aperto.

Il bordo libero, come abbiamo già visto, ha anche il compito di fornire una **riserva di stabilità** che consente di ampliare la superficie del diagramma di stabilità.

Ciò permette alla nave di resistere maggiormente alle forze esterne (vento e mare) che tendono ad inclinarla o a capovolgerla.

Il bordo libero assicura infine galleggiamento e stabilità anche **in seguito a danni allo scafo, spostamento del carico, falla ecc.**

Prima dell'introduzione della marca di bordo libero, la caricazione della nave avveniva a discrezione del Padrone o dell'Armatore.

Allo scopo di assicurarsi il maggior guadagno possibile dall'uso della loro nave, questi tendevano a sovraccaricarla oltre i limiti di prudenza.

Nel 1875, in Inghilterra, un certo Sig. Plimsoll, dopo aver promosso aspre agitazioni che lo condussero perfino in galera, ottenne finalmente l'intervento del Governo che fissava, per ogni nave, a seconda della stagione e delle aree marittime, la linea di massimo carico.

Inverno Nord Atlantico (INA) – Inverno (I) - Estate (E) - Estate Mari Tropicali (ET) - Acqua Dolce (AD) - Acqua Dolce Tropicale (ADT), queste sono le marche di Bordo Libero che le successive conferenze internazionali del 1930 e 1966 stabilirono definitivamente

Secondo la Load Line Convention del 1966 la differenza (Delta I cm.) tra la linea di galleggiamento **estivo** e la linea di galleggiamento in **acqua dolce** è stabilita dall'espressione **D / 40 Du** dove (D) rappresenta il dislocamento della nave e (Du) il suo dislocamento unitario. La norma è basata sulla formula matematica :

$$\text{Delta I (cm)} = \frac{D}{[(f/f' - 1) - 1] Du} \quad \text{dove } f = 1,025 \text{ densità acqua mare} \\ f' = 1,000 \quad \text{“ “ dolce}$$

Infatti essendo [(1,025/1,025-1,000)-1] = 40 avremo Delta I (Fresh water allowance) = D / 40 d unitario.

La formula permette anche di calcolare l'aumento di pescaggio che la nave subisce nel passare dal galleggiamento in acqua di mare (f = 1,025) a quello in acque meno dense (f'), e viceversa.(*)

Il Bordo Libero è assegnato, per ogni nave, dalle Società di Classificazione le cui iniziali sono incise ai lati dell'occhio di Plimsoll. (A----B = American Bureau) (L----R = Lloyd's Register) (R ---- I = Registro Italiano) ecc.

CALCOLO DELLA POSIZIONE DEL CENTRO DI GRAVITA' (G) DI UNA NAVE

In seguito all'imbarco o allo sbarco di grandi pesi.

Sulla sezione maestra della nave vengono individuati i tre punti fondamentali per il problema della stabilità iniziale della nave.

Viene inoltre specificata la loro distanza verticale rispetto alla linea di sottochiglia (K):

1) Il Metacentro trasversale (M), individuato dall'intersezioni delle linee verticali passanti rispettivamente per il centro di galleggiamento (B) a nave dritta e per quello (B') in cui la nave risulta leggermente inclinata.

Indichiamo con KM la distanza verticale tra il Metacentro (M) e la linea di sottochiglia (K).
 Il valore di KM dipende dalle forme della carena immersa e si ricava dai diagrammi delle carene diritte, fornito dai cantieri di costruzione, in funzione del pescaggio della nave (i).

2) Il Centro di Galleggiamento (B) della carena immersa.

Indichiamo con KB la distanza verticale tra il centro di galleggiamento (B) e la linea di sottochiglia (K).

Il valore di KB dipende dalle forme della carena immersa e si ricava dai diagrammi delle carene diritte in funzione del pescaggio (i)

Normalmente $KB = 0,5 \times i$ (box shaped ships)

3) Il Centro di Gravità (G) della nave.

Indichiamo con KG la distanza verticale tra il centro di gravità (G) e la linea di sottochiglia (K),
Per tutte le navi i valori di KM e di KB dipendono dalle forme della carena immersa (stabilità di forma)

mentre il valore di KG dipende dalla disposizione dei pesi presenti a bordo della nave (stabilità di peso).

La conoscenza di KG è essenziale per la determinazione del coefficiente di stabilità iniziale della nave:

$$GZ = (r - a) \sin \text{Alfa}$$

Infatti:

$$KM - KB = r \text{ (raggio metacentrico trasversale della nave)}$$

$$KM - KG = a \text{ [distanza verticale tra il centro di gravità (G) e il metacentro (M)]}$$

NOTA:

Oltre che dal diagramma delle carene diritte, il valore del raggio metacentrico $r = KM - KB$, può essere ricavato dal rapporto

$$r = I / V$$

dove:

I = Momento di inerzia del piano di galleggiamento rispetto all'asse longitudinale della nave.

V = Volume della carena corrispondente a quella immersione.

Vi sono inoltre formule pratiche che consentono il calcolo di ($r = KM - KB$) con buona approssimazione.

In genere:

Per una nave a forma di "scatola" (box shape)

$$r = BM = \frac{I}{12 \cdot i}$$

dove (I) = larghezza massima della nave

" (i) = immersione media di riferimento

Per una nave a forma di "nave" (ship shape)

$$r = BM = \frac{C_w^2 \cdot I}{12 \cdot i \cdot C_b}$$

dove (I) = Larghezza massima della nave
 " (i) = Immersione media di riferimento
 " (C_w)= Coefficiente di finezza dell'area del piano di galleggiamento relativa a quella immersione
 " (C_b) = Coefficiente di finezza totale.

I valori che si ottengono con questi o altri metodi vengono inseriti in un diagramma di assi cartesiani da cui è possibile ricavare l'andamento della curva dei metacentri (M) e della linea dei centri di galleggiamento (B) in relazione al pescaggio (i) che la nave assume nelle varie condizioni di carico.

Sia per le navi "box shaped" che per quelle "ship shaped" la curva dei metacentri (M) è rappresentata da una parabolica.

Per le stesse navi il diagramma dei centri di galleggiamento (B) mostra una linea retta.

In tutti e due i tipi di navi il raggio metacentrico (r = BM = KM - KB), diminuisce con l'aumentare del pescaggio.

APPLICAZIONE DEL TEOREMA DEI MOMENTI

Riferendo tutti i momenti (peso x braccio) alla linea di sottochiglia (K) della nave avremo che:

$$D' \times KG' = D \times KG + p'h' + p''h'' - p'''h''' \text{ ecc.}$$

Vale a dire che il prodotto tra il nuovo dislocamento della nave (D') e la distanza verticale del nuovo centro di gravità (KG'), modificati in seguito a sbarco e/o imbarco di grandi pesi, è eguale al prodotto del dislocamento iniziale (D) per il valore iniziale (KG) più il valore dei prodotti di ciascun peso imbarcato (+ p) o sbarcato (- p) per l'altezza (h) del loro centro di gravità dalla linea di sottochiglia.

Ciò consente di ricavare il nuovo valore di KG' essendo noti tutti gli altri elementi di calcolo.

Infatti:

$$KG' = \frac{(D \times KG) + p'h' + p''h'' - p'''h''' \text{ ecc.}}{D + p' + p'' - p''' \text{ ecc.}}$$

Vale a dire .

$$KG' = \frac{\text{Somma algebrica dei momenti}}{\text{Somma algebrica dei pesi}}$$

Il valore iniziale di KG ,assieme a quello del dislocamento (D) a nave vuota (Light Ship), è normalmente fornito dal cantiere di costruzione.

E' pertanto possibile adottare uno schema di calcolo che consenta, per qualsiasi tipo di nave, di determinare il nuovo valore KG' relativo a qualsiasi condizione di carico, applicando il citato sistema dei momenti.

Lo schema comprende di norma i dati relativi al dislocamento iniziale (D) e alla distanza iniziale del centro di gravità dalla linea di sottochiglia (KG).Successivamente vengono specificati la posizione dei centri di gravità e la capacità dei vari depositi e doppi fondi adibiti all'acqua di zavorra, al combustibile, all'acqua dolce, ecc.

Viene inoltre indicata l'ubicazione delle stive e dei corridoi di carico delle merci e la loro capacità (in grano e in balle).

Per i maggiori depositi liquidi viene precalcolato il momento di inerzia della superficie liquida libera di oscillare nel caso essi risultino parzialmente pieni.

DIAGRAMMA DEI METACENTRI (M) E DEI CENTRI DI CARENA (B) DI UNA NAVE TIPO "LIBERTY".

Prendiamo in esame lo scafo di una nave tipo "Liberty" di cui si conoscono i seguenti dati ricavati dal diagramma delle carene diritte :

-Dislocamento a nave vuota (light weight) = 3300 Long tons = 3.353 t.metriche

-Volume di carena corrispondente (V) = 3.353 : 1,025 = 3.271 mc.

-Lpp a nave vuota (L) = 124 m.

-Larghezza massima (l) = 17 m.

-Immersione media a nave vuota (i) = 2,34 m. (Iav = 0,82 m. ; Iad = 3,86 m.)

-KB a nave vuota = 1,28 m.

-Superficie al galleggiamento a nave vuota = 1610 metri quadrati

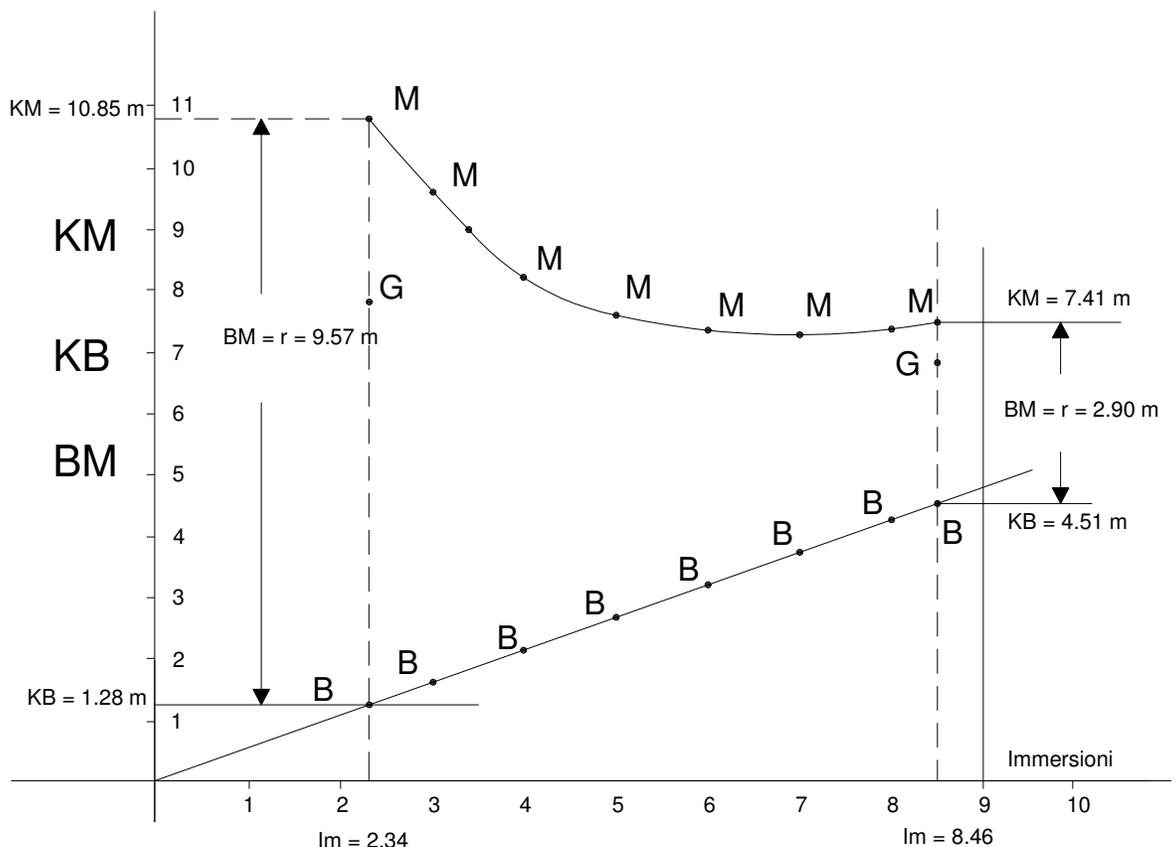
-Momento di inerzia della superficie di galleggiamento a nave vuota (I yy) = 31.303 metri alla quarta.

Il valore (I yy), si calcola con il metodo Simpson conoscendo la forma della superficie della figura di galleggiamento a nave vuota ricavate dai piani di costruzione della nave.

-Raggio metacentrico a nave vuota (r) = $BM = KM - KB = I yy / V = 31.303 / 3.271 = 9,57$ m.

Il valore del raggio metacentrico (r), è identico a quello ricavato direttamente dal diagramma delle carene diritte della nave tipo "Liberty".

Ne deriva che : $KM (a nave vuota) = KB + BM = 1,28 + 9,57 = 10,85$ m



Il diagramma indica l'andamento della curva dei metacentri (M) e dei centri di galleggiamento (B) al variare dell'immersione.

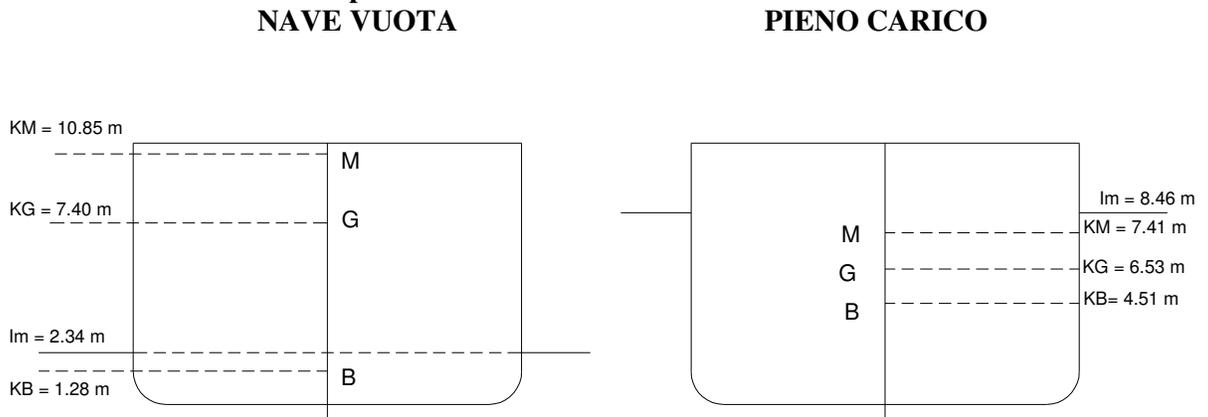
Come si può notare il raggio metacentrico ($r = BM$) diminuisce con l'aumentare dell'immersione passando da 9,57 m. (nave vuota) a 2,93 m. (nave a pieno carico).

Anche la distanza KM (tra la linea di sottochiglia ed il metacentro M) diminuisce con l'aumentare dell'immersione.

La distanza KB (tra la linea di sottochiglia ed il centro della carena immersa B) aumenta con l'aumentare dell'immersione.

Affinché la nave sia inizialmente stabile è necessario che la distanza del centro di gravità dalla linea di sottochiglia (KG) sia sempre inferiore a KM in qualsiasi condizione di carico.

Posizione del metacentro (M) e del centro di carena immersa (B) di una nave tipo "Liberty" in condizione di nave vuota e di pieno carico.



La posizione del centro di gravità (G) del nostro Liberty, a nave vuota (light weight), è indicata dal Cantiere di Costruzione e si trova, rispetto alla linea di sottochiglia, ad una altezza pari a :

$$\underline{KG = 7,40 \text{ m.}}$$

Il metacentro della carena immersa, a nave vuota, si trova, rispetto alla predetta linea, ad una distanza pari a :

$$\underline{KM = 10,85 \text{ m.}}$$

Pertanto l'altezza metacentrica iniziale ($r - a$) = $GM = KM - KG = 10,85 - 7,40 = 3,45 \text{ m.}$

Partendo da questi dati iniziali :

$$D = 3.353 \text{ t.} \quad KG = 7,40 \text{ m.}$$

possiamo stabilire uno schema di calcolo che ci consenta trovare il valore di KG e quindi dell'altezza metacentrica iniziale ($r - a$) in qualsiasi altra condizione di carico.

NAVE TIPO LIBERTY - ESEMPIO DI CALCOLO DI STABILITA' E ASSETTO

Nota storica:

Le navi tipo "Liberty" furono costruite durante la Seconda Guerra Mondiale. Ne furono allestite più di 2.700 in vari cantieri navali degli USA, utilizzando sistemi di prefabbricazione, innovativi a quel tempo, e raggiungendo tempi di costruzione più allestimento impensabili: il record fu di 10 giorni, dall'impostazione della chiglia alla partenza. Molte di queste navi sopravvissero al conflitto; buona parte fu ceduta alle più svariate bandiere espletando un più che onorevole servizio commerciale per diversi anni; le rimanenti vennero messe in disarmo e conservate in luoghi diversi degli USA per essere eventualmente riutilizzate in caso di necessità (l'espressione in lingua inglese era "mothballed" e cioè "messe in naftalina").

Oggi ne rimangono in attività soltanto due : la S/S "John W. Brown" ormeggiata a Baltimora e la S/S "Jeremiah O'Brien", ormeggiata a San Francisco.

Sono mantenute in perfetta efficienza, possono essere visitate dal pubblico ed effettuano brevi crociere durante la stagione primavera/estate.

Nel 1994 la "Jeremiah O'Brien" dopo un viaggio di 18.000 miglia partecipò alle cerimonie per il 50° anniversario del D-Day davanti alle spiagge della Normandia raggiungendo quindi anche il porto di Londra, prima nave di questo tipo a transitare per il Tower-Bridge.

CALCOLO DELL'ALTEZZA METACENTRICA (r - a) A PIENO CARICO

La nave vuota (light weight) presenta i seguenti dati:

Dislocamento (D) = 3.353 t.metriche

Im = 2,34 m. (Iav = 0,65 m. - Iad = 4,03 m.)

KG = 7,40 m. (Indicato dal Cantiere di costruzione)

KM = 10,85 m. (Fornito dal diagramma delle carene diritte)

(r - a) = 10,85 - 7,40 = 3,45 m.

La nave a pieno carico presenta i seguenti dati:

Dislocamento (D) = 14.473 t.metriche

(Im)= 8,46 m.

SCHEMA DI CALCOLO

DENOMINAZIONE	PESO (t.metriche)	KG o V.C.G. (vertical center of gravity) (metri)	MOMENTO (tonn-metri)
<u>NAVE VUOTA (light weight)</u>	3.353	7,40	24.812,2
Provviste	30	11,58	347,4
<u>ACQUA ZAVORRA (d = 1,025)</u>			
Gavone di prora	-----	5,65	-----
Gavone di poppa	-----	8,32	-----
<u>COMBUSTIBILE (d = 0,960)</u>			
Doppi Fondi (completi)	1.065	0,58	617,7
Casse di consumo	100	3,81	381,0
<u>ACQUA DOLCE</u>			
Casse di consumo	61	10,66	650,3
Casse di riserva	132	0,58	76,6

Controllo parziale $D' = 4.741$ $M' = 26.885,2$

$KG' = 26.885,2 / 4.741 = 5,67$ m

$KM' = 9,26$ m. (Carene diritte) $(r - a)' = 9,26 - 5,67 = 3,59$ m.

CARICO

Carico sopra coperta ----- 13,70 -----

Carico liquido: Olio di Soia (d = 0,926)

Deep tank n.1 (Dr. e Sn.)	217	2,83	614,1
Deep tank n.2 (Dr e Sn.)	395	2,74	1.082,3
Deep tank n.3 (Dr e Sn.)	658	5,18	3.408,4

Controllo parziale $D'' = 6.011$ $M'' = 31.990,0$

$KG'' = 31.990,0 / 6.011 = 5,32$ m.

$KM'' = 8,32$ m. (Carene diritte) $(r - a)'' = 8,32 - 5,32 = 3,00$ m.

Grano in sacchi (cubaggio 1,60)

Stiva n. 1	630	6,52	4.107,6
Stiva n.2	1.605	4,88	7.832,4
Stiva n.3	1.046	4,88	5.104,5
Stiva n.4	925	5,18	4.791,5
Stiva n. 5	904	5,79	5.234,2

Controllo parziale $D''' = 11.121$ $M''' = 59.060,2$

$KG''' = 59.060,2 / 11.121 = 5,31$ m.

$KM''' = 7,19$ m. (Carene diritte) $(r - a)''' = 7,19 - 5,31 = 1,88$ m.

Corridoio stiva n.1	701	10,76	7.542,8
Corridoio stiva n.2	742	10,30	7.642,6
Corridoio stiva n.3	542	10,06	5.452,5
Corridoio stiva n.4	518	10,36	5.366,5
Corridoio stiva n.5	538	10,67	5.740,5

TOTALE $D = 14.162$ $M = 90.805,1$

$KG = M / D = 90.805,1 / 14.162 = 6,41$ m.

$Im = 8,32$ m. (Diagramma carene diritte)

$KM = 7,38$ m. (Diagramma carene diritte)

$KG = 6,41$ m. (Dal calcolo)

$(r - a) = 7,38 - 6,41 = 0,97$ m.

I risultati del calcolo, in assenza di superfici liquide libere di oscillare o per l'esiguità della loro influenza totale, indicheranno pertanto una altezza metacentrica iniziale effettiva pari a 0,97 m.

Dal calcolo dell'assetto finale, che esamineremo più avanti, risulta che per ottenere quello ottimale è necessario riempire il Gavone di Poppa, quindi, proseguendo con il nostro schema:

Denominazione	peso	KG	momento
Gavone Poppa	154	8,32	1.281,3

Totale Finale $D = 14.316$ $M = 92.086,4$

$$\underline{KG = M / D = 92.086,4 / 14.316 = 6,43 \text{ m.}}$$

Im = 8,37 m. (Diagramma carene diritte)
 KM = 7,39 m. (Diagramma carene diritte)
 KG = 6,43 m. (Dal calcolo)

$$\underline{(r - a) = 7,39 - 6,43 = 0,96 \text{ m.}}$$

Supponiamo ora di avere della merce da stivare sopra coperta onde completare la caricazione e raggiungere il dislocamento di pieno carico ($D = 14.473 \text{ t.}$).

A questo scopo è necessario imbarcare sopra coperta altre 157 t. il cui baricentro è individuato a 1,50 m. sopra la media boccaporte (13,70 m.)

Avremo:

Denominazione	Peso	KG	momento
Carico Sopra Coperta	157	15,20	2.386,4
Totale Finale	$D = 14.473$		$M = 94.472,8$

$$\underline{KG = M / D = 94.472,8 / 14.473 = 6,53 \text{ m.}}$$

Im = 8,46 m. (Diagramma carene diritte)
 KM = 7,41 m. (Diagramma carene diritte)
 KG = 6,53 m. (Dal calcolo)

$$\underline{(r - a) = 7,41 - 6,53 = 0,88 \text{ m.}}$$

Esempio di diminuzione dell'altezza metacentrica iniziale (r - a) a causa di uno specchio liquido libero di oscillare:

Supponiamo che il Doppiofondo N.2 (Dr. e Sn.), presenti due specchi liberi di oscillare in seguito al consumo di 43 t. di combustibile.

Calcolare la diminuzione dell'altezza metacentrica iniziale (r-a) o (GM) sapendo che le dimensioni di ciascuno dei due specchi sono:

Lunghezza (L) = 22 m.

Larghezza (b) = 8,63 m.

Secondo il metodo di calcolo classico la diminuzione viene calcolata con la formula:

$$GG' = \frac{I_y \times d}{D}$$

Dove I_y (Momento di inerzia della superficie libera di oscillare rispetto all'asse longitudinale y) pari a:

$$I_y = \frac{1}{12} \times L^3 \times b = 1.178 \text{ metri alla quarta}$$

d = 0,96
 D = 14.430 t.

Avremo : $GG' = 1.178 \times 0,96 / 14.430 = 0,08 \times 2 = 0,16 \text{ m.}$

Nota:

Durante le operazioni di caricazione della nave le posizioni del metacentro (KM) e del centro della carena immersa (KB) variano in funzione del pescaggio medio relativo ai vari dislocamenti come risulta dal diagramma riprodotto a pagine 44.

Ciò si deve al fatto che questi due elementi (KM e KB) dipendono unicamente dalle forme della carena immersa.

Il valore (KG), ossia la posizione del centro di gravità della nave rispetto alla linea di sottochiglia, varia invece a seconda delle modalità di caricazione e nel corso della caricazione stessa, come si può evincere dallo schema di calcolo precedente.

Esso passa infatti dal valore 7,40 m. a nave vuota a quello di 6,53 m. a nave carica attraverso successivi valori, con andamento discontinuo, che seguono le operazioni di carico.

E' essenziale, ai fini della stabilità iniziale, che il centro di gravità della nave (G), durante le fasi di caricazione, si mantenga sempre al disotto della curva dei metacentri.

ASSETTO DELLA NAVE

E' bene precisare che nel corretto linguaggio marinairesco la parola "assetto" riguarda **la condizione di sbandamento sia trasversale sia longitudinale (o mista)** in cui la nave si può venire a trovare al termine delle operazioni commerciali (sbarco o imbarco).

Abbiamo visto come sia necessario intervenire, avendo a disposizione doppifondi, casse di zavorra o gavoni, per correggere eventuali sbandamenti in modo da mantenere la nave dritta e nelle migliori condizioni di stabilità per affrontare il mare.

Anche **l'assetto longitudinale** della nave riveste grande importanza già in fase di costruzione per conformarsi alle imprescindibili esigenze della navigazione.

Per esempio ogni tipo di nave ha un suo assetto longitudinale ottimale che le consente la migliore stabilità di rotta, limita al massimo la resistenza al moto e quindi i consumi, ecc.

Lo studio dell'assetto longitudinale consente inoltre di conoscere le problematiche legate alle condizioni di falla, incaglio, arenamento, ecc.

ASSETTO LONGITUDINALE (*)

Quando lo scafo si inclina rispetto all'asse longitudinale (sbandamento) l'entità di questa inclinazione viene misurata in gradi (inclinometro di bordo).

Quando invece lo scafo si inclina rispetto all'asse trasversale si parla, in genere, di assetto longitudinale, che viene misurato attraverso la lettura dei pescaggi a poppa e a prora.

In inglese, la parola "trim" indica la differenza tra i pescaggi di poppa e di prora ($I_{ad} - I_{av}$).

Per quanto riguarda l'assetto longitudinale la nave può venirsi a trovare in tre condizioni:

- a) "even keel" quando i pescaggi a poppa e a prora sono identici ($I_{ad} = I_{av}$)
- b) "appoppata" quando il pescaggio a poppa è maggiore di quello a prora ($I_{ad} > I_{av}$)
- c) "appruata" quando il pescaggio a poppa è inferiore di quello a prora ($I_{ad} < I_{av}$)

(a) e (b) rappresentano le normali condizioni di assetto in navigazione, mentre la condizione (c – nave appruata), è anomala e quasi sempre dovuta a particolari emergenze o a errori di caricazione.

Come abbiamo già sottolineato per la stabilità, anche per quanto riguarda il corretto assetto della nave è necessario che questo sia raggiunto prima di tutto con una buona distribuzione del carico, senza dover ricorrere, se non per modeste correzioni, ai depositi di zavorra.

Raggio metacentrico longitudinale (R) (*)

Come abbiamo già visto, studiando la stabilità statica trasversale, il valore del raggio metacentrico è dato dall'espressione:

$$r = I_{yy} / V$$

Dove I_{yy} rappresenta il momento di inerzia della superficie dell'area di galleggiamento rispetto all'asse longitudinale yy e V rappresenta il volume della carena immersa.

Abbiamo messo in evidenza che questo valore è il più piccolo di tutti i valori che si possono riscontrare rispetto a qualsiasi asse di riferimento intorno al quale la nave potrebbe oscillare.

Il valore più grande (R) è quello relativo all'asse trasversale (xx) ed è dato dall'espressione:

$$R = \frac{I_{xx}}{V}$$

Dove I_{xx} rappresenta il momento di inerzia della superficie dell'area di galleggiamento rispetto all'asse trasversale xx e V rappresenta il volume della carena immersa.

In generale il Raggio Metacentrico Longitudinale ha un valore superiore alla lunghezza tra le perpendicolari delle navi.

Esempio: Determinare il valore di R su una nave che presenta un momento di inerzia (I_{xx}) pari a 1.120.000 m⁴ (alla quarta) e un dislocamento (D) pari a 10.000 T.

$$R = 1.120.000 / 10.000 \times 0,975 = 114,9 \text{ m.}$$

Esiste una semplice formula che dà un valore approssimato, ma utile per i calcoli, del Raggio Metacentrico Longitudinale :

$$R = 0,07 \times L_{pp} / I \quad \text{dove } I \text{ rappresenta l'immersione della nave}$$

Da questa espressione approssimata appare evidente che il Raggio Metacentrico Longitudinale raggiunge il valore massimo a nave vuota e minimo a nave carica.

Come per la stabilità statica trasversale è stato necessario introdurre nei calcoli il valore dell'altezza metacentrica trasversale ($r - a$), così, per i problemi di assetto, sarebbe necessario adottare nei calcoli il valore dell'altezza metacentrica longitudinale ($R - a$).

Poiché il valore di (a) è trascurabile rispetto a (R), soltanto quest'ultimo viene assunto in pratica come elemento di calcolo nei problemi che riguardano l'assetto.

Calcolo delle variazioni di assetto di una nave

Supponiamo che su una nave in condizioni di assetto "even keel" ($I_{ad} = I_{av}$) il centro di gravità di un peso (p) piccolo rispetto al dislocamento (D) venga spostato longitudinalmente per una distanza (y) dalla sua posizione precedente (dal punto A al punto B).

Ciò determina la creazione di una coppia di variazione di assetto longitudinale il cui valore è dato dalla espressione: $p \cdot y \cos \alpha$.

A questa azione inclinante la nave reagisce con il suo momento di stabilità statica longitudinale dato dall'espressione: $D \times R \sin \alpha$.

Spostamento longitudinale di un peso – assetto

Calcolare la variazione di assetto subita da una nave a causa dello spostamento longitudinale di un peso.

Si conoscono i seguenti dati:

- Dislocamento(D) = 40.000 T.
- Lpp..... = 160 m.
- R..... = 200 m.
- (immersione media)..... = (9 m.)
- peso spostato(p) = 320 T.
- spostamento longit. (y) = 40 m.
- Momento unit.....(Mu) = 500 Tm.

avremo:

$$\text{Var. I} = 320 \times 40 \times 160 / 40.000 \times 200 = 0,26 \text{ m.}$$

oppure, usando il momento unitario di assetto (Mu)

Var. I = p y / Mu = 320 x 40 / 500 = 26 cm.

Nota : Quando una nave subisce una variazione di assetto longitudinale – **senza variare il suo dislocamento** – quindi per il solo spostamento longitudinale di un peso già presente a bordo, la nuova linea di galleggiamento interseca quella precedente nel centro della figura di galleggiamento (F).

Se il piano trasversale in cui si trova questo punto (F) coincide con quello del centro dello scafo (C) equidistante dalle perpendicolari avanti e addietro, allora la variazione complessiva di pescaggio (Var. I) si divide in due parti uguali. (*)

Richiamandoci all’esempio precedente, **e supponendo che lo spostamento del peso sia avvenuto verso poppavia**, la variazione complessiva di assetto di 26 cm determinerà un aumento di immersione di 13 cm. a poppa e una diminuzione di immersione di 13 cm. a prora.

Se il punto (F) non coincide con il centro dello scafo (C) le variazioni di pescaggio a poppa e a prora non saranno eguali ma proporzionali alle distanze (L’ e L’’) comprese tra il punto (F) e le perpendicolari addietro e avanti.

fermo restando che $L' + L'' = L_{pp}$ e che $\text{Var. I}_{ad} + \text{Var. I}_{av} = \text{Var. I}$ (valore assoluto) avremo :

$$\text{Var. I}_{ad} = \text{Var. I} \times \frac{L''}{L_{pp}} \qquad \text{Var. I}_{av} = \text{Var. I} \times \frac{L'}{L_{pp}}$$

Richiamandoci all’esempio precedente, supponendo che il punto (F) si trovi 10 metri a poppavia rispetto al punto (C), avremo:

$$L' = 160 : 2 - 10 = 70 \text{ metri}$$

$$L'' = 160 : 2 + 10 = 90 \text{ metri} \qquad \text{dove } 70 + 90 = 160 \text{ metri}$$

$$\text{Var. I}_{ad} = 26 \times 70 : 160 = 11,4 \text{ cm.}(+)$$

$$\text{Var. I}_{av} = 26 \times 90 : 160 = 14,6 \text{ cm.}(-) \qquad \text{dove } 11,4 + 14,6 = 26 \text{ cm. (valore assoluto)}$$

Bisogna sempre specificare se le variazioni di pescaggio avvengono verso poppa o verso prora. Convenzionalmente si attribuisce segno positivo ad un aumento di immersione a poppa e segno negativo ad una sua diminuzione.

Corretta valutazione del pescaggio medio (Im) della nave.

Il pescaggio medio della nave (Im) è un elemento molto importante poiché da esso viene ricavato, in base alla scala o curva dei dislocamenti, il corrispondente dislocamento (D) della nave.

Se la nave si trova nella condizione di “even keel” (dove Iav = Iad) il pescaggio medio (Im) è certamente eguale a (Iav + Iad) : 2.

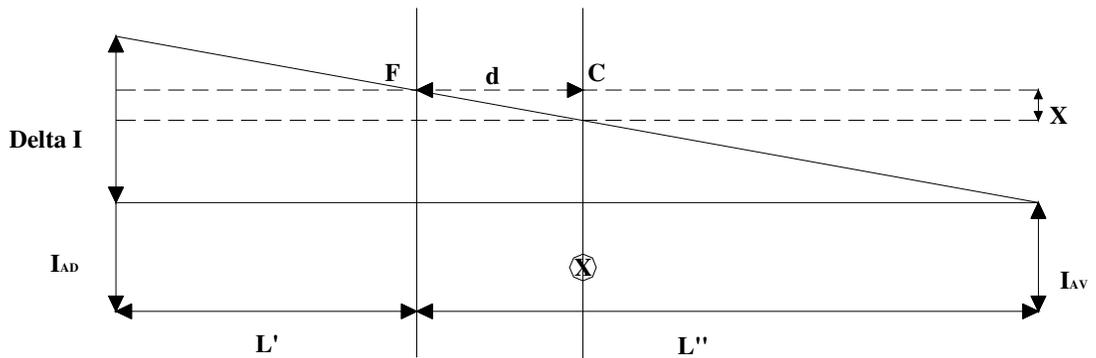
Se la nave presenta una differenza di immersione tra prua e poppa (ad esempio I ad > I av) e il centro della figura di galleggiamento (F) giace sullo stesso piano trasversale che contiene il centro nave (C) equidistante dalle perpendicolari avanti e addietro, possiamo nuovamente affermare che il valore del pescaggio medio (Im) è eguale a (Iav + Iad) : 2.

Le cose si complicano quando la nave presenta una differenza di immersione (ad esempio Iad > Iav) e il predetto punto (F) non coincide con il centro nave (C) ma si trova spostato verso poppa o verso prora.

In questo caso dovremo apportare una correzione (x) al pescaggio medio ottenuto semplicemente sommando il pescaggio di poppa a quello di prora e dividendo per due.

Questa correzione, che ha un valore non trascurabile, potrà essere positiva o negativa a seconda delle circostanze che andiamo a specificare.

La posizione relativa tra il punto F (centro dell’area della figura di galleggiamento) e il punto C (punto di mezza nave, equidistante dalle perpendicolari avanti e addietro) è indicata sui grafici di costruzione della nave.



Dalla proporzione $x : \text{Delta I} = d : Lpp$ si ricava il valore della correzione (x) da apportare al pescaggio medio (Im) ottenuto sommando il pescaggio addietro al pescaggio avanti e dividendo per due [$I m = (Iad + Iav) : 2$] che è dato dall’espressione:

$$x = \frac{\text{Delta I} \times d}{Lpp}$$

dove Delta I rappresenta la differenza tra le due immersioni di poppa e di prora e (d) rappresenta la distanza del punto (F) dal punto (C)

Esempio:

- Lpp = 160 m.
- Du = 35,9 T PC (tonnellate per centimetro)
- Iad = 8,57 m.

Iav..... = 7,30 m.
 d..... = 10,5 m. verso poppa

Calcolare il pescaggio medio della nave:

$$x = \Delta I \times d / L_{pp} = (8,57 - 7,30) \times 10,5 / 160 = 1,27 \times 10,5 / 160 = \mathbf{0,08 \text{ m.}}$$

$$\mathbf{Im} = (I_{av} + I_{ad}) : 2 + x = (8,57 + 7,30) : 2 + 0,08 = \mathbf{7,93 + 0,08 = 8,01 \text{ m.}}$$

Il valore esatto dell'immersione media non è 7,93 m. ma 8,01 m.

Considerando il valore del dislocamento unitario ($D_u = 35,9 \text{ TPC}$) se avessimo trascurato il valore della sovraimmersione (x) avremmo commesso un errore di ben 287,2 T. nel calcolo del dislocamento e quindi, ad esempio, nel peso del carico imbarcato.

La correzione dell'immersione media non è sempre positiva ma si possono verificare quattro casi

Nave appoppata (F) a poppavia di (C).....correzione **positiva**
 Nave appoppata (F) a proravia di (C)correzione **negativa**

Nave appruata(F) a poppavia di (C).....correzione **negativa**
 Nave appruata(F) a proravia di (C) correzione **positiva**

IMBARCO PESO – PESCAGGI – ASSETTO

Sulla nostra nave di cui conosciamo i seguenti dati:

Lpp.....= 160 m.

Iav.....= 7,30 m.

Iad.....= 8,57 m.

Du..... = 35,9 TPC

M unitario di assetto.....= 500 Tm

Distanza (L') del baricentro della figura di galleggiamento (F) dalla pp.Ad = 70 m.

Distanza (L") “ “ “ dalla pp.Av = 90 m.

Assetto (Iad – Iav) = 8,57 – 7,30 = 1,27 m. (nave appoppata)

Si deve imbarcare un peso (p) = 180 T. in un punto posto a una distanza (y) = 60 m. a proravia del baricentro della figura di galleggiamento (F).

Si domanda il valore dei pescaggi di prora e di poppa a imbarco avvenuto.

I valori ottenuti sono approssimati al centimetro.

Calcolo della differenza di pescaggio medio (Delta Im) supponendo di imbarcare il peso sul punto (F):

$$\mathbf{\Delta Im = p / Du = 180 / 35,9 = 5 \text{ cm.}}$$

Calcolo della variazione complessiva di assetto dovuta allo spostamento del peso dal punto (F) al punto situato 60 m. a proravia di (F).

$$\mathbf{Var.I = p \cdot y / Mu = 180 \times 60 / 500 = 21,6 \text{ cm. (appruante)}}$$

Calcolo della variazione di assetto a poppa:

$$\mathbf{Var. Iad = Var. I \times L' / Lpp = 21,6 \times 70 / 160 = - 9,5 \text{ cm}}$$

Calcolo della variazione di assetto a prora:

$$\text{Var. Iav} = \text{Var. I} \times L'' / L_{pp} = 21,6 \times 90 / 160 = +12,2 \text{ cm}$$

Calcolo del pescaggio finale a poppa:

$$\underline{I'ad} = Iad + \text{Delta Im} + \text{Var. Iad} = 8,57 + 0,05 - 0,09 = \underline{8,53 \text{ m.}}$$

Calcolo del pescaggio finale a prora:

$$\underline{I'av} = Iav + \text{Delta Im} + \text{Var. Iav} = 7,30 + 0,05 + 0,12 = \underline{7,47 \text{ m.}}$$

Nuovo assetto:

$$\underline{I'ad - I'av} = 8,53 - 7,47 = \underline{1,06 \text{ m (nave appoppata)}}$$

Poiché il baricentro della figura di galleggiamento (F) si trova a poppavia del centro nave (C) dobbiamo calcolare il pescaggio medio della nave prima e dopo l' imbarco del peso (p) = 180 T. Sappiamo che:

$$I_m = \frac{Iav + Iad}{2} + x \quad \text{dove } x = \frac{\text{Delta I} \times d}{L_{pp}} \quad \text{dove (d) = 10 m - distanza tra il punto centrale dello scafo © ed il punto (F). dove (Delta I) = Assetto originale = 1,27 m.}$$

da cui:

$$I_m = \frac{8,57 + 7,30}{2} + \frac{1,27 \times 10}{160} = 7,94 + 0,08 = \underline{8,02 \text{ m.}}$$

$$I'm = \frac{8,52 + 7,47}{2} + \frac{1,06 \times 10}{160} = 8,00 + 0,07 = \underline{8,07 \text{ m.}}$$

$$\text{Delta Im} = I'm - I_m = 8,07 - 8,02 = \underline{5 \text{ cm.}}$$

Da notare che la differenza tra le immersioni medie pari a 5 cm. corrisponde alla sovraimmersione dovuta all'imbarco di un peso di 180 tonnellate.

Infatti (Du x Delta Im) = 35,9 x 5 = 179,5 t.

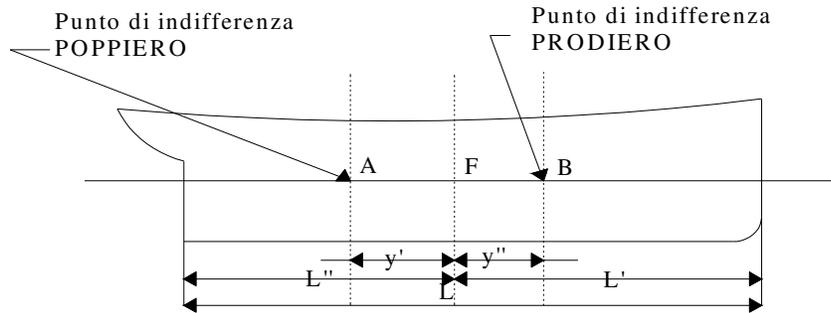
PUNTI DI INDIFFERENZA (*)

I punti di indifferenza , situati sull'asse diametrale longitudinale della nave, sono due: uno situato a proravia del baricentro della figura di galleggiamento (F) e l'altro a poppavia.

Imbarcando un peso (p) piccolo rispetto al dislocamento (D) della nave nel punto di indifferenza situato a proravia del baricentro della figura di galleggiamento (F), l'immersione poppiera non subisce nessuna variazione.

Viceversa imbarcando lo stesso peso (p) nel punto di indifferenza **poppiero**, sarà l'immersione **prodiera** a non subire alcuna variazione.

Considerando la figura sottostante, indicando con (A) il punto di indifferenza di poppa, distante (y') dal baricentro della figura di galleggiamento (F), e con (B) il punto di indifferenza di prora, distante



(y'') dal baricentro (F) della figura di galleggiamento, avremo che l'immersione misurata su una delle due estremità della nave resterà invariata quando:

Il valore positivo della sovraimmersione (ΔIm) dovuto all'imbarco del peso (p) sarà compensato dalla variazione negativa di assetto ($Var. Iad$ o $Var. Iav$) che si verificherà ad una estremità della nave a seconda che il peso sia imbarcato a proravia o a poppavia del baricentro (F) della figura di galleggiamento

Imbarcando per esempio il peso (p) sul punto di indifferenza di poppa (A) l'immersione a prora non cambierà. Ciò vuol dire che:

$$\frac{p}{Du} - L_1 \frac{p \cdot y'}{Mu \cdot Lpp} = 0 \quad \text{da cui} \quad \frac{p}{Du} = L_1 \frac{p \cdot y'}{Mu \cdot Lpp}$$

da cui $y' = \frac{Lpp}{L_1} \times \frac{Mu}{Du}$ **distanza del punto di indifferenza di poppa (A) dal punto (F)**

$$y'' = \frac{Lpp}{L_2} \times \frac{Mu}{Du}$$
 distanza del punto di indifferenza di prora (B) dal punto (F)

Dove:

- p peso imbarcato
- Dudislocamento unitario
- Lpplunghezza tra le perpendicolari
- L_1 distanza compresa tra il baricentro (F) e **la perpendicolare avanti.**
- MuMomento unitario di assetto
- L_2distanza compresa tra il baricentro (F) e **la perpendicolare addietro.**

I punti di indifferenza hanno grande importanza dal punto di vista ingegneristico poiché è nella parte di scafo compresa tra di essi che vengono normalmente installate le strutture più pesanti come la sala macchine, i depositi nafta, ecc. in modo tale da non influire eccessivamente sull'assetto della nave già in fase di costruzione.

Essi sono importanti anche per i problemi relativi all'incaglio in cui, mediante sbarco di pesi da una certa zona della nave, o imbarco in una zona opposta si può fare diminuire l'immersione nella zona di incaglio.

Esempio:

La nostra nave ha come sappiamo le seguenti caratteristiche:

Lpp.....= 160 m.
Du.....= 35,9 TPC (Tonnellate per centimetro)
L1.....= 90 m.
L2.....= 70 m.
Mu.....= 500 Tm (Tonnellate x metro)

In base a questi dati avremo:

Posizione del punto di indifferenza di poppa (A) rispetto al punto (F)

$$y' = Lpp / L_1 \times Mu / Du = 160/90 \times 500/ 35,9 = 1,78 \times 13,93 = \mathbf{24,8 \text{ m.}}$$

Posizione del punto di indifferenza di prora (B) rispetto al punto (F)

$$y'' = Lpp/ L_2 \times Mu / Du = 160/70 \times 500/ 35,9 = 2,29 \times 13,93 = \mathbf{31,9 \text{ m.}}$$

ESERCIZIO COMPLESSIVO

Sulla nostra nave che presenta le seguenti caratteristiche:

D (Dislocamento).....= 36.600 T (relativo al pescaggio medio indicato)

(r – a) (altezza metacentrica).....= 0,89 m.

Du (dislocamento unitario)...= 35,9 TPC (tonnellate per centimetro)

Lpp.....= 160 m.

distanza del baricentro della
figura di galleggiamento (F) dal
centro della nave.....= 10 m. (verso poppavia)

(L') distanza tra il punto (F) e
la pp. addietro.....= 70 m.

(L'') distanza tra il punto (F) e
la pp. avanti..... = 90 m.

Mu (Momento unitario di assetto)...= 500 Tm (tonnellate x metri)

Iad..... = 8,57 m.

Iav.....= 7,30 m.

Assetto (nave appoppata).....= 1,27 m.

$$\mathbf{Im. (immersione media) = (8,57 + 7,30) : 2 + 1,27 \times 10 / 160 = 7,93 + 0,08 = 8,01 \text{ m.}}$$

Viene imbarcato sul ponte di coperta un peso complessivo (p) di 100 T. il cui baricentro risulta situato (5 metri) al disopra (z) del piano di galleggiamento, (90 metri) a proravia (y) del baricentro della figura di galleggiamento (F) e (10 metri) a dritta (x) rispetto all'asse diametrale.

Calcolare i pescaggi e l'immersione media finale, lo sbandamento in gradi sulla dritta, il nuovo valore dell'altezza metacentrica (r - a).

Calcolo variazione del pescaggio medio a seguito dell'ipotetico imbarco del peso sul punto (F)

$$\mathbf{\Delta Im = p / Du = 3 \text{ cm} = 0,03 \text{ m.}}$$

Calcolo variazione complessiva di assetto verso prora dovuta a trasporto ipotetico del peso dal punto (F) al punto di imbarco reale:

$$\mathbf{Var. I = p \times 90 / Mu = 9.000 / 500 = 18 \text{ cm} = 0,18 \text{ m.}}$$

Calcolo variazione di assetto a proravia e a poppavia:

$$\mathbf{Var. Iav = 0,18 \times 90 / 160 = + 10 \text{ cm} = + 0,10 \text{ m}}$$

$$\mathbf{Var. Iad = 0,18 \times 70 / 160 = - 8 \text{ cm} = - 0,08 \text{ m.}}$$

Calcolo nuovi pescaggi:

$$\mathbf{I'ad = Iad + \Delta Im + Var. Iad = 8,57 + 0,03 - 0,08 = 8,52 \text{ m.}}$$

$$\mathbf{I'av = Iav + \Delta Im + Var. Iav = 7,30 + 0,03 + 0,10 = 7,43 \text{ m.}}$$

Calcolo nuovo assetto:

$$\mathbf{I'ad - I'av = 8,52 - 7,43 = 1,09 \text{ m (nave appoppata)}}$$

Calcolo nuovo pescaggio medio:

$$\mathbf{I'm = (8,52 + 7,43) : 2 + 1,09 \times 10 / 160 = 7,97 + 0,07 = 8,04 \text{ m.}}$$

Nota: la differenza tra i due pescaggi medi $I'm - Im = 8,04 - 8,01 = 3$ centimetri conferma, con le logiche approssimazioni, l'entità dell'imbarco del peso di 100 T. ($3 \times 35,9 = 108 \text{ T.}$)

Calcolo della diminuzione di altezza metacentrica:

$$p \times z / D' = 100 \times 5 / 36.700 = 0,01 \text{ m.}$$

Calcolo della nuova altezza metacentrica:

$$\mathbf{(r-a)' = (r-a) - 0,01 \text{ m.} = 0,89 - 0,01 = 0,88 \text{ m}}$$

Calcolo dello sbandamento dovuto all'imbarco del peso 10 metri (x) a dritta rispetto al piano diametrale longitudinale:

$$D' (r - a)' \text{ sen alfa} = p \cdot x \text{ cos alfa}$$

$$D' (r - a)' \text{ tang. alfa} = p \cdot x \text{ da cui } \text{tang. alfa} = p \cdot x / D' (r-a)' = 100 \times 10 / 36.700 \times 0,88 = 0,031$$

$$\text{Alfa} = 1^{\circ},8 \text{ (} 2^{\circ} \text{ di sbandamento a dritta)}$$

CALCOLO DELL'ASSETTO A PIENO CARICO

Conveniamo di assumere come positiva la differenza di pescaggio che si riscontra allorché la nave è appoppata e come negativa quella a nave appruata.

Conveniamo di assumere come positivi i momenti appoppanti e come negativi quelli appruanti.

Si conoscono i seguenti dati:

Dislocamento a nave vuota = 3.353 t. (Delta I = Iad - Iav = 4,03 - 0,65 = + 3,38 m.)

Dislocamento a nave carica = 14.473 t. (Im = 8,46 m.)

Portata Lorda = 11.120 t.

Momento Unitario di assetto a nave carica = 162,8 tonn.-metro/cm.

Dislocamento Unitario

Medio = 18,15 tonn./cm.

SCHEMA DI CALCOLO

Denominazione	Peso (t)	Distanza Longitudinale dei Centri di gravità (G) dal centro di gall. (C)	Momenti Appoppanti (+)	Momenti Appruanti (-)
Provviste	30	+ 6,64	+ 199,2	
<u>ACQUA ZAVORRA</u> (d = 1,025)				
Gavone di Prora	===	- 58,86		=====
Gavone di Poppa	===	+ 58,86	=====	
<u>COMBUSTIBILE</u> (d = 0,960)				
Doppio Fondo n.1	137	- 45,15		- 6.185,6
Doppio Fondo n.2 (Dr/Sn)	328	- 26,56		- 8.711,7
Doppio Fondo n.3 (Dr/Sn)	242	- 8,30		- 2.008,6
Doppio Fondo n.5(Dr/Sn)	244	+ 24,24	+ 5.914,6	
Doppio Fondo n.6	114	+ 42,00	+ 4.788,0	
Cassa Consumo	100	+ 2,39	+ 239,0	
<u>ACQUA DOLCE</u> (d = 1,000)				
Cassa Consumo	61	+ 16,43	+ 1.002,2	
Acqua alimento Caldaie (DF n. 4)	132	+ 10,13	+ 1.337,2	
<u>CARICO</u>				
Carico liquido (olio di Soia ---d = 0,926)				
Deep Tank n. 1 (Dr/Sn)	217	- 51,59		- 11.195,0

Deep Tank n.2 (Dr/Sn)	395	- 42,50		- 16.787,5
Deep Tank n.3 (Dr/Sn)	658	+ 17,59	+ 11.574,2	
Grano in sacchi (Cubatura = 1,60)				
Stiva n.1	630	- 45,80		- 28.854,0
Stiva n.2	1.605	- 27,22		- 43.688,1
Stiva n.3	1.046	- 8,30		- 8.681,8
Stiva n.4	925	+ 27,52	+ 25.456,0	
Stiva n.5	904	+ 43,50	+ 39.324,0	
Corridoio n.1	701	- 46,10		- 32.316,1
Corridoio n.2	742	- 26,29		- 19.507,2
Corridoio n.3	542	- 8,13		- 4.406,5
Corridoio n.4	518	+ 26,62	+ 13.789,2	
Corridoio n.5	538	+ 44,10	+ 23.725,8	
Carico sopra coperta				
Fusti di Olio	157	- 25,0		- 3.925,0
TOTALE PESI	10.966		PARZIALE MOMENTI + 127.349,4	- 186.267,1

MOMENTO FINALE = + 127.349,4 - 186.267,1 = - 58.917,7 (APPRUANTE)

Poichè Delta I = Totale Momenti / Momento unitario avremo che:

$$\text{Delta I}' - 58.917,7 : 162,8 = - 3,62 \text{ m da cui Delta Iav} = \text{Delta Iad} = (+ -) 1,81 \text{ m.}$$

Poichè Delta I' = - 3,62 m e Delta I = + 3,38 m avremo che Delta I' - Delta I = - 0,24

Ciò significa che la nave a fine caricazione risulterà appruata di m.0,24

Quali saranno i pescaggi a fine caricazione?

La differenza di immersione media (Delta Im) sarà data dal Totale dei Pesì imbarcati diviso il Dislocamento Unitario medio e pertanto avremo :

$$\text{Delta Im} = 10.966 : 18,15 = 6,04 \text{ m.}$$

$$\text{I'av} = \text{Iav} + \text{Delta Im} + \text{Delta I av} = 0,65 + 6,04 + 1,81 = 8,50 \text{ m.}$$

$$\text{I'ad} = \text{Iad} + \text{Delta Im} + \text{Delta I ad} = 4,03 + 6,04 - 1,81 = 8,26 \text{ m.}$$

Per ottenere un assetto ottimale, si decide di riempire il Gavone di Poppa (154 t.)

Proseguendo con il nostro schema avremo:

DENOMINAZIONE	PESO	CG	MOMENTO
Gavone di Poppa	154	+ 58,86	+ 9.064,44

$$\text{Delta I (cm)} = \text{MOMENTO} / \text{Mu}$$

$$\text{Delta I} = + 9.064,44 / 162,8 = 56 \text{ cm (Var.Ad} = + 28 \text{ cm. - Var.Av.} = - 28 \text{ cm.)}$$

$$\text{Delta Im (cm)} = 154 / 18,15 = 8 \text{ cm.}$$

$$\text{DISLOCAMENTO FINALE} = 3.353 + 10.966 + 154 = \underline{14.473} \text{ (NAVE A PIENO CARICO)}$$

$$\text{PESCAGGI FINALI} \quad \text{Iav} = 8,50 + 0,08 - 0,28 = \underline{8,30 \text{ m.}}$$

$$\text{Iad} = 8,26 + 0,08 + 0,28 = \underline{8,62 \text{ m.}}$$

$$\underline{\text{Im} = 8,46 \text{ m.}} \text{ (NAVE A PIENO CARICO)}$$

FINE