

ELEMENTI DI STABILITA'

Stabilità

Per stabilità di una nave si intende, in generale, la facoltà di conservare la sua posizione di equilibrio, cioè la sua attitudine a resistere alle forze che tendono a inclinarla e la capacità di raddrizzarsi spontaneamente quando cessa l'azione di queste. La stabilità di una stessa nave può variare notevolmente, poiché il suo valore dipende anche dalla posizione in cui vengono disposti i pesi di volta in volta imbarcati.

Definizioni

Volume di carena: è il volume immerso dello scafo.

Centro di carena (C): è il baricentro del volume di carena.

Baricentro (G): è il punto geometrico ideale dove si applica la risultante D di tutte le forze peso della nave.

Isocarene: sono carene di uguale volume appartenenti ad un medesimo galleggiante.

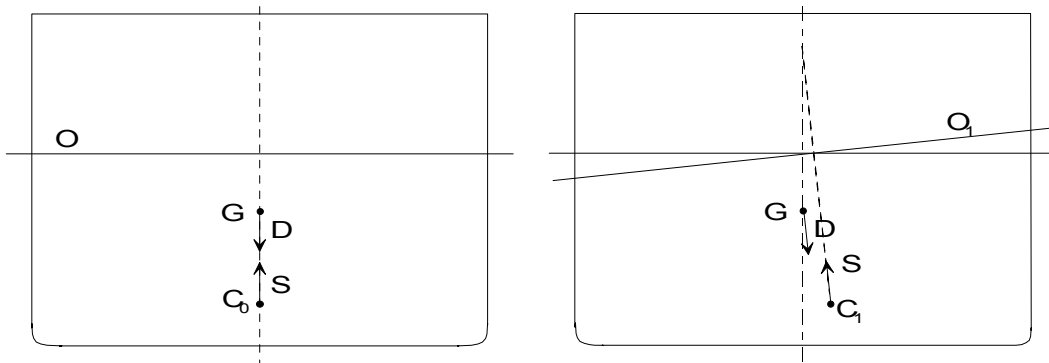
Centro di spinta: è il punto di applicazione della spinta idrostatica S risultante di tutte le pressioni esercitate dal liquido su ogni elemento della superficie di carena. Poiché la retta d'azione della spinta passa sempre per il centro di carena, in Teoria della nave si considera quest'ultimo come punto di applicazione della spinta idrostatica.

Stabilità statica trasversale

Si consideri una nave liberamente galleggiante in acqua calma e con ponti orizzontali.

In queste condizioni il peso D e la spinta S risultano allineati nel diametrale.

Quando una causa esterna, vento o mare, fa sbandare la nave, mentre il G resta fermo, il C si sposta verso il lato più immerso e la spinta S diventa parallela al D formando con esso una coppia di forze il cui momento misura, in T per m, la stabilità statica trasversale.



Evoluta metacentrica

Come scritto già sopra, se una nave liberamente galleggiante trasversalmente dritta è sottoposta all'azione di una causa esterna che non apporti variazioni o spostamenti di carico di bordo, essa si inclina nel piano trasversale in modo da assumere successivi galleggiamenti isocarenici; l'insieme di tutti i Centri di carena formano la *curva dei centri isocarenici di carena*. Questa ha un andamento molto irregolare causa le forme non regolari della carena.

Se l'angolo di sbandamento è piccolo (entro 10°-12°) si può ritenere questa curva ad andamento circolare confondendo, per un piccolo arco, la curva effettiva con il cerchio tangente ad essa in C₀ a nave dritta.

Ne consegue che il punto d'intersezione della retta d'azione della spinta, a nave sbandata di piccolo angolo, diventa il centro fisso di questo archetto di cerchio prendendo il nome di *metacentro trasversale iniziale (M)*.

Le distanze MC₀ = MC₁ diventano il raggio costante di questo archetto con il nome di *raggio metacentrico trasversale iniziale (r)*.

Da cui è facile ricavare il momento di stabilità statica trasversale iniziale. Si vede subito che:

$$M_s = D \cdot GH$$

Essendo che:

$$GH = MG \cdot \sin \varphi$$

Ne segue pertanto che:

$$M_s = D \cdot MG \cdot \sin \varphi$$

Infine, poiché:

$$MG = (r - a)$$

Si conclude:

$$M_s = D \cdot (r - a) \cdot \sin \varphi$$

Dove:

D = dislocamento istantaneo

r = raggio metacentrico

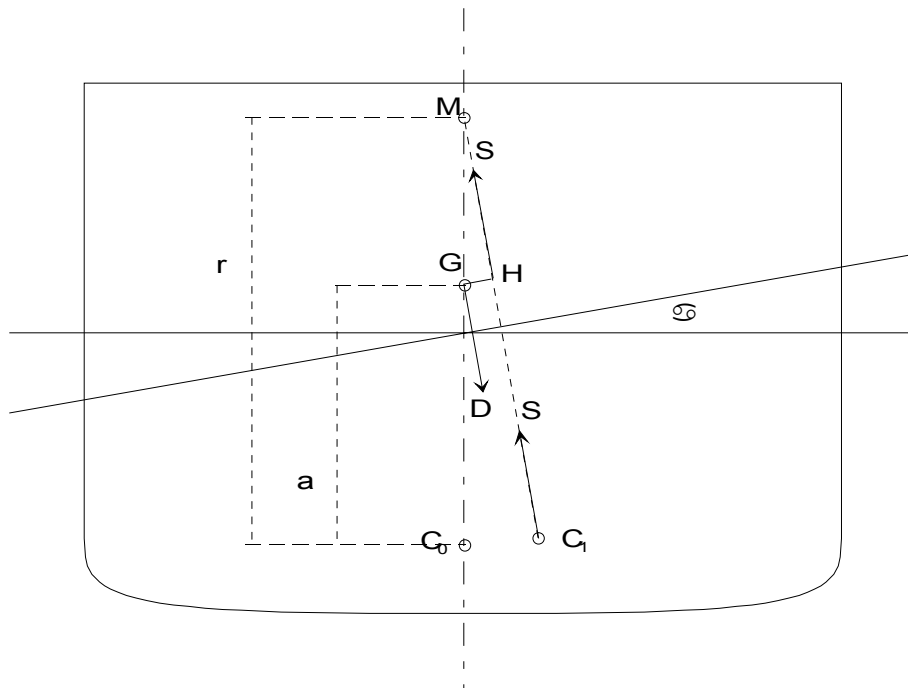
a = distanza verticale tra G e C

φ = angolo di sbandamento minore di 10°-12°

(r - a) = altezza metacentrica trasversale

L'altezza metacentrica trasversale rappresenta la distanza verticale tra M e G.

ELEMENTI DI STABILITA'



Il segno del momento di stabilità dipende dalla $(r - a)$ e si possono avere tre casi:

- | | | | | |
|--------------|----------------------|---------|-----------|----------------|
| 1] $M_s > 0$ | quando $(r - a) > 0$ | $r > a$ | M sopra G | (stabile) |
| 2] $M_s = 0$ | quando $(r - a) = 0$ | $r = a$ | M = G | (indifferente) |
| 3] $M_s < 0$ | quando $(r - a) < 0$ | $r < a$ | M sotto G | (instabile) |

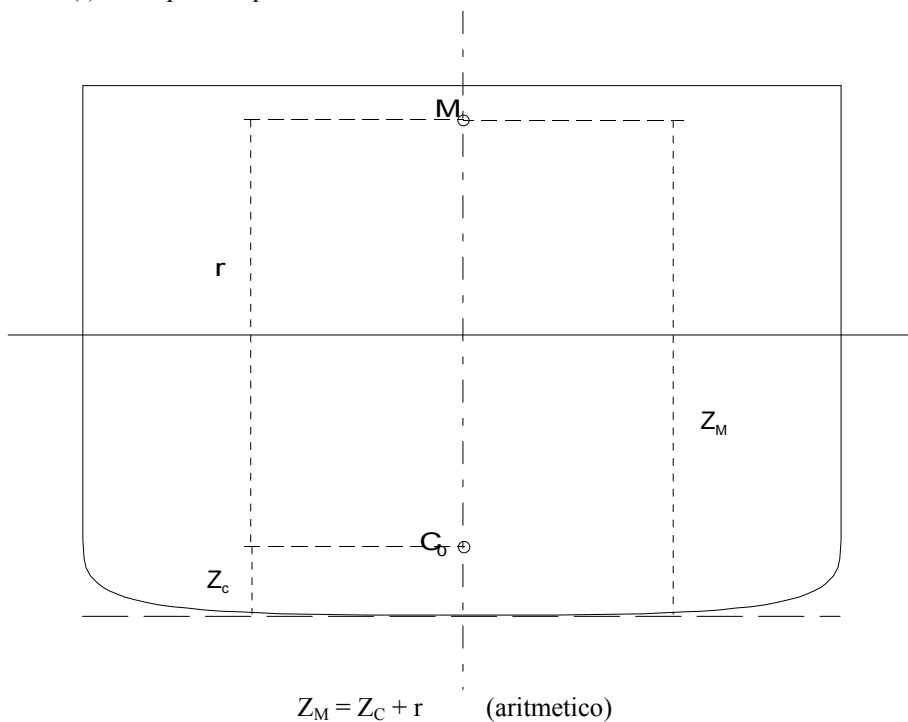
Per ottenere la prima soluzione, bisogna indagare sui parametri da cui dipendono le grandezze (r) e (a) .
 Se si risolve l'espressione $M_s = D (r - a) \text{sen } \varphi$ si ottiene:

$$M_s = D r \text{sen } \varphi - D a \text{sen } \varphi$$

Momento di stabilità di forma per piccoli angoli ($Dr \text{sen } \varphi$)

Il nome del momento dipende da (r) ; infatti esso è uguale a I_x/V dove I_x è il momento d'inerzia della figura di galleggiamento diritta all'immersione considerata rispetto al proprio asse x baricentrico longitudinale, mentre V è il volume di carena sottostante al suddetto galleggiamento. Per cui per ottenere un buon valore numerico di (r) le forme della nave sono molto importanti: esso cresce con l'aumentare dell'area di galleggiamento, mentre è inversamente proporzionale al volume di carena.

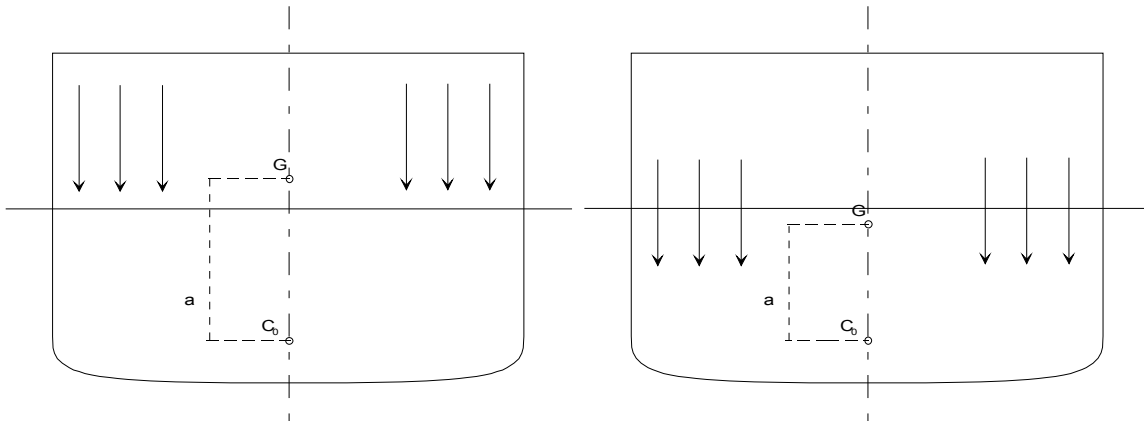
Il valore di (r) è dato nelle "carene diritte" nella "curva dei raggi metacentrici trasversali" per ogni metro d'immersione. Frequentemente al posto di (r) si adopera la quota Z_m del metacentro trasversale iniziale sulla L.C. all'immersione considerata.



ELEMENTI DI STABILITA'

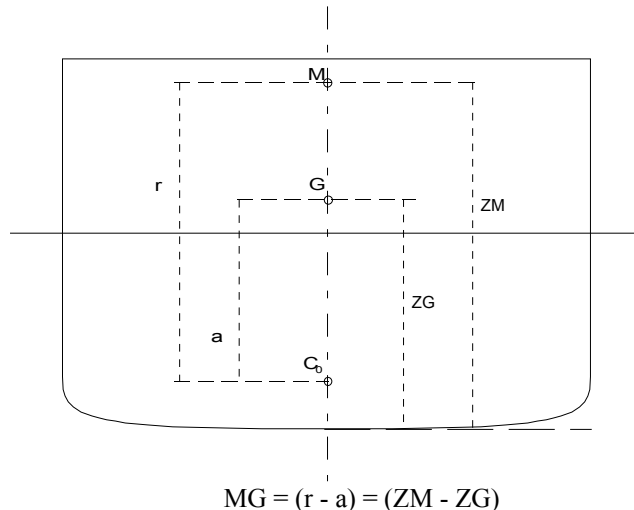
Momento di stabilità di peso (D a sen ϕ)

Il nome del momento dipende da (a) che è in funzione della distribuzione verticale dei pesi.



Conclusion

L'altezza metacentrica si può esprimere in due modi:



$$MG = (r - a) = (ZM - ZG)$$

In pratica per ottenere un valore accettabile di (r - a) bisogna, per la forma che lo scafo sia più largo che alto di circa il doppio, e per il peso che il carico sia distribuito prevalentemente verso il basso.

Inoltre bisogna che (r - a) non sia eccessivamente grande, infatti il periodo di oscillazione della nave è inversamente proporzionale all'altezza metacentrica.

Nel caso che quest'ultima sia grande (nave dura) la nave può oscillare con un periodo sotto i 10 sec., e in caso di mare grosso, le strutture possono essere molto sollecitate, mentre la nave potrebbe entrare in sincronismo con il periodo di oscillazione del moto ondoso.

Per motivi inversi quando (r - a) è modesto il periodo di oscillazione è compreso da 20 a 30 sec. e la nave si dice dolce.

Momento di stabilità statica trasversale a grandi angoli di sbandamento

Quando la nave sbanda di un angolo non piccolo, non è più lecito ritenere costante il raggio (r) di curvatura dei centri isocarenici trasversali di carena. Infatti causa le forme di carena, questa curva è addirittura sghemba e diretta verso poppa a partire dal piano verticale trasversale che contiene C0 a nave diritta.

Per semplicità si considera la proiezione di questa curva sul piano verticale trasversale che contiene C0 a nave diritta, ottenendo una curva piana a curvatura variabile.

I centri di curvatura (metacentri) degli archetti C1C2, C2C3, C3C4, ... sono i punti M1, M2, M3, ... che danno origine ad una curva detta *evolva metacentrica*.

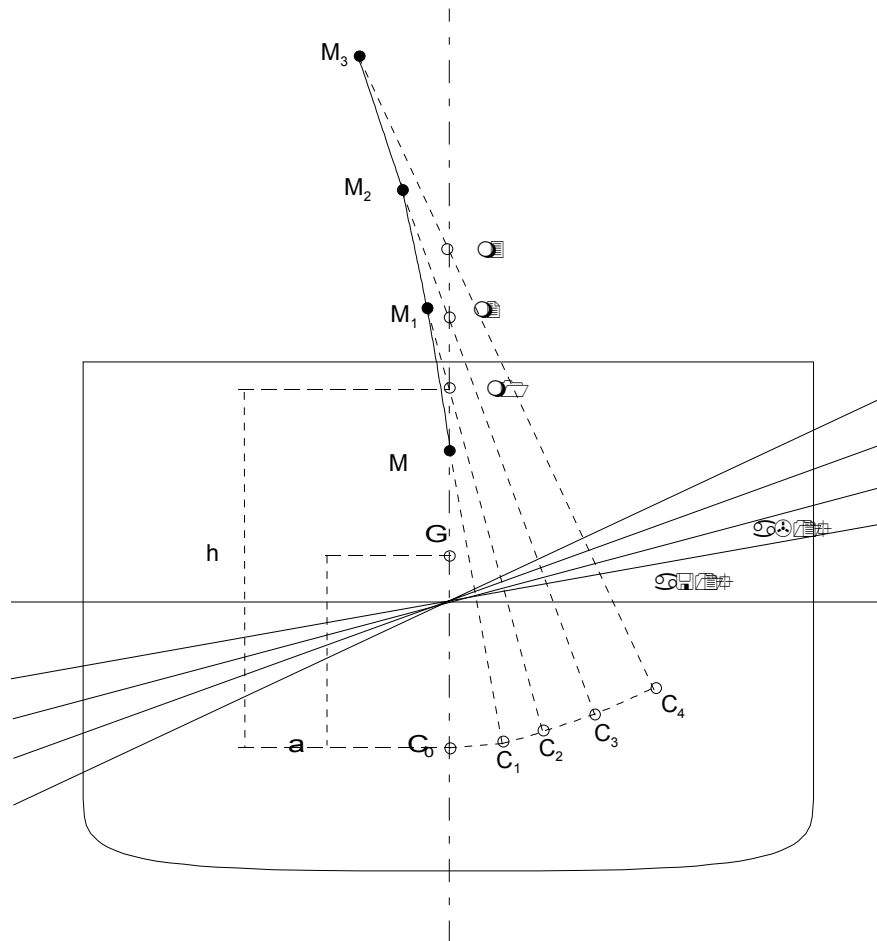
Le linee d'azione della spinta idrostatica intersecano la verticale del centro di carena iniziale C nei punti: O1, O2, O3, ... definiti *falsi metacentri* o *prometacentri* relativi ai centri di carena C2, C3, C4, ecc.

La forma dell'evolva metacentrica dipende da M, il quale, a sua volta, dipende dal valore del momento d'inerzia Ix dell'area di galleggiamento rispetto al proprio asse baricentrico; infatti:

- se con l'aumentare dell'inclinazione trasversale il momento d'inerzia Ix cresce, l'evolva metacentrica risulta a rami inizialmente ascendenti (prometacentri al disopra del metacentro trasversale M)
- se con l'aumentare dell'inclinazione trasversale Ix diminuisce, l'evolva metacentrica risulta a rami inizialmente discendenti (prometacentri al disotto del metacentro trasversale M)
- se con l'aumentare dell'inclinazione trasversale Ix si mantiene costante, l'evolva metacentrica si riduce ad un punto: il

ELEMENTI DI STABILITA'

metacentro trasversale M.



Per ottenere la prima condizione basta costruire le murate della nave a sviluppo rettilineo generalmente verticale, in maniera che quando la nave si inclina, mentre il volume di carena (V) rimane costante, l'area di galleggiamento aumenta, e per la formula $r = Ix/V$ ne consegue che i metacentri istantanei si trovano al di sopra del metacentro iniziale.

Se inclinazione trasversale dovesse continuare, quando l'acqua arriverà al trincarino (sopra) - al ginocchio (sotto), e montare in coperta, l'area di galleggiamento inizierà a diminuire mentre il volume di carena (V) rimane costante, per cui r incomincerà a diminuire. Ad un certo punto il prometacentro coinciderà con il G, in quel momento la nave si troverà in capovolgimento statico (α compreso tra $70^\circ - 80^\circ$).

Calcolo di un momento di stabilità trasversale ad un grande angolo di sbandamento

Siano:

KN = distanza tra il piede del diametrale e la retta di azione della spinta.

ZG = altezza di G dalla Linea di Costruzione.

h = distanza tra G e O (prometacentro o falso metacentro).

Risulta allora che:

$$M_s = D GH$$

$$M_s = D TN$$

$$M_s = D (KN - KT)$$

$$M_s = D (KN - ZG \sin \alpha)$$

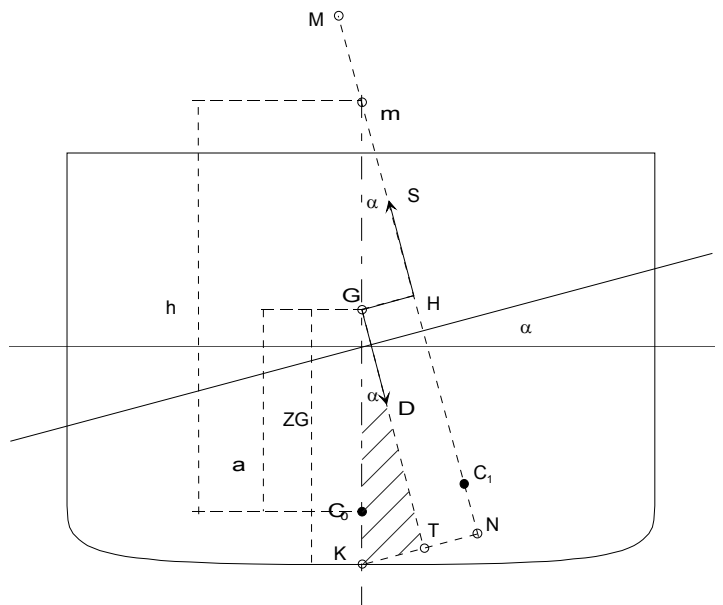
KN è dato, angolo per angolo ogni 10° nelle "Carene inclinate trasversalmente", mentre ZG si calcola con il teorema dei momenti, partendo da quello della prova di stabilità.

Curva di stabilità della nave

Utilizzando per i piccoli angoli l'espressione:

$$M_s = D(r - a)\sin \alpha$$

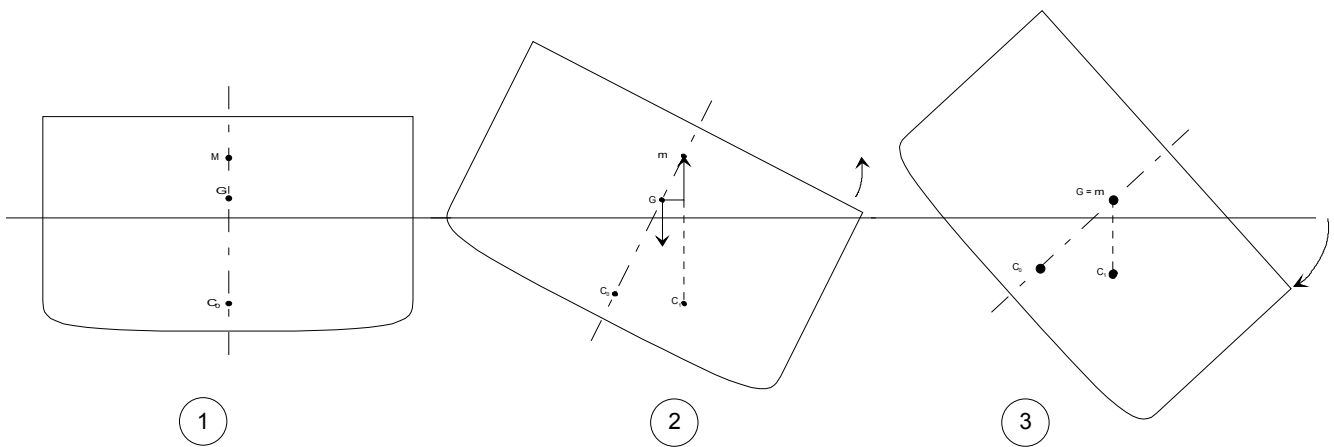
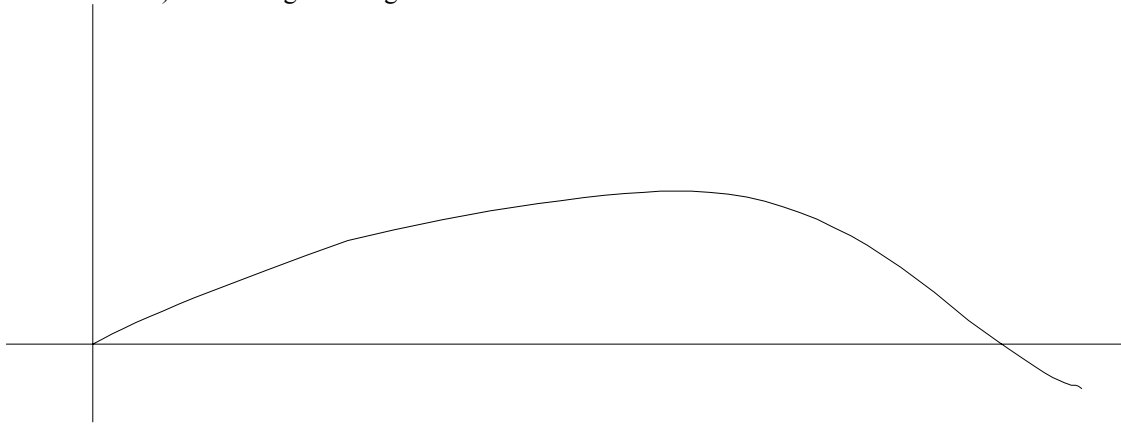
e per i grandi angoli l'espressione:



ELEMENTI DI STABILITA'

$$M_s = D (KN - ZG \sin \alpha)$$

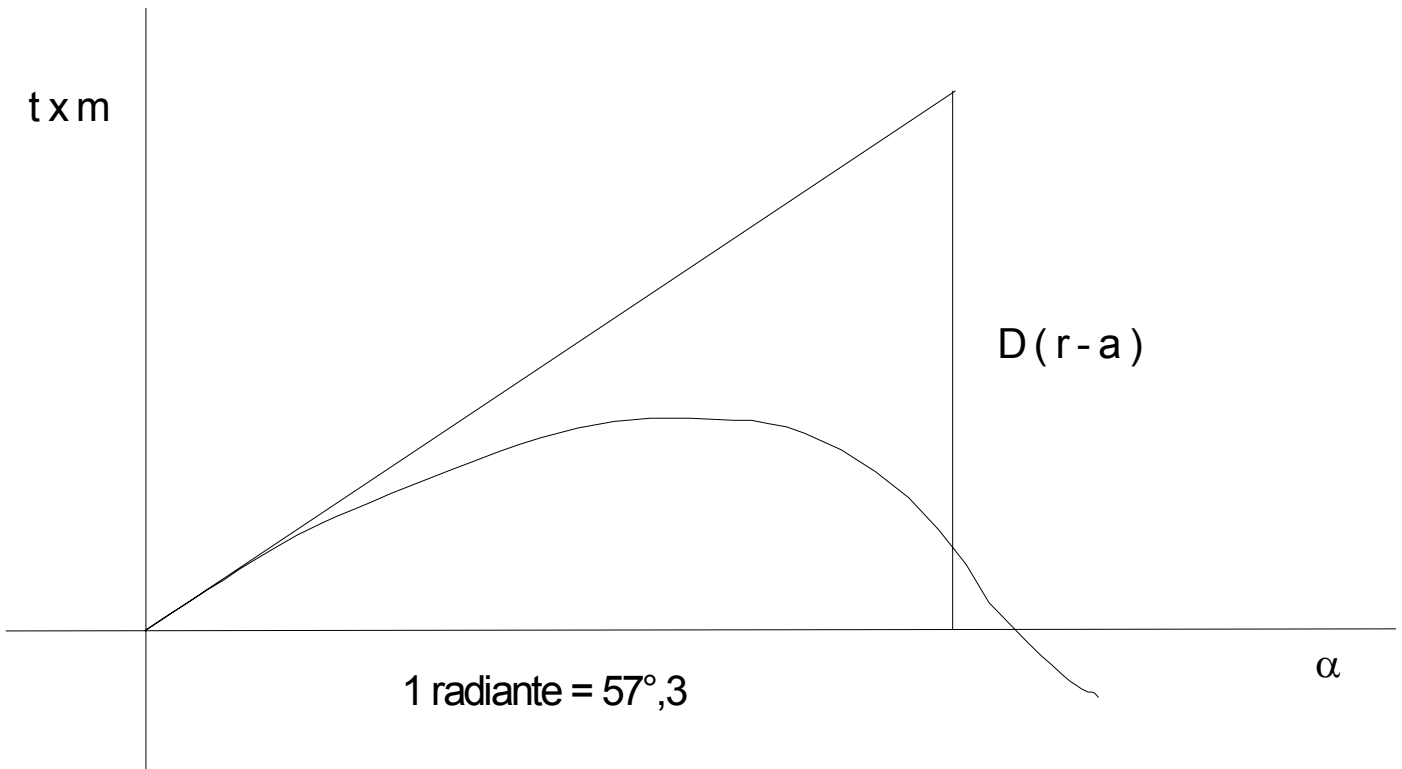
ripetutamente (a intervalli di 5°), si ottengono dei valori di momenti di stabilità che riportati in assi cartesiani (in ascissa gli angoli, in ordinata i momenti) danno luogo alla seguente curva:



Osservazione

Per la parte iniziale della curva di stabilità si può usare il seguente metodo:

Portare a 57°,3 (1 radiante) il valore $D (r - a)$. Si ottiene un segmento il cui estremo superiore si collega con l'origine degli assi. Il primo tratto di questo segmento d'unione è tangente all'origine della curva di stabilità, e come tale si confonde con esso per i primi 5°, 10°.

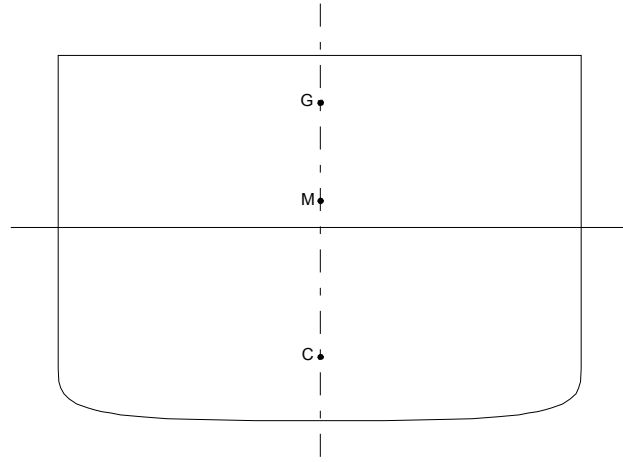


ELEMENTI DI STABILITA'

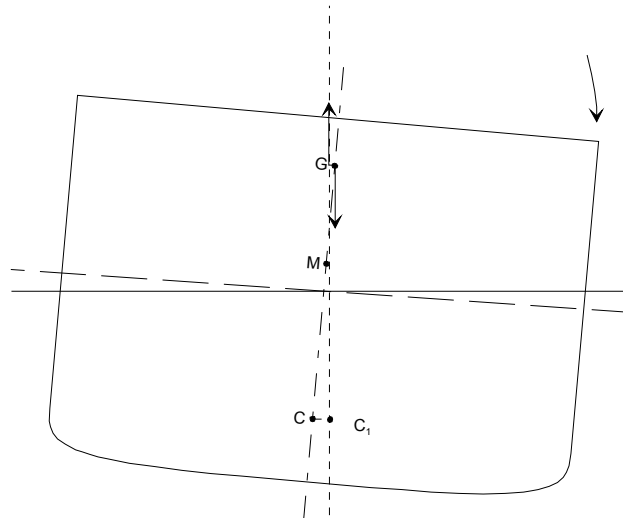
Nave ingavonata

Una nave si dice ingavonata quando essa assume una posizione di equilibrio stabile inclinato trasversalmente di un angolo α minore di 15° ; si dice abbattuta quando tale angolo risulta maggiore di 15° .

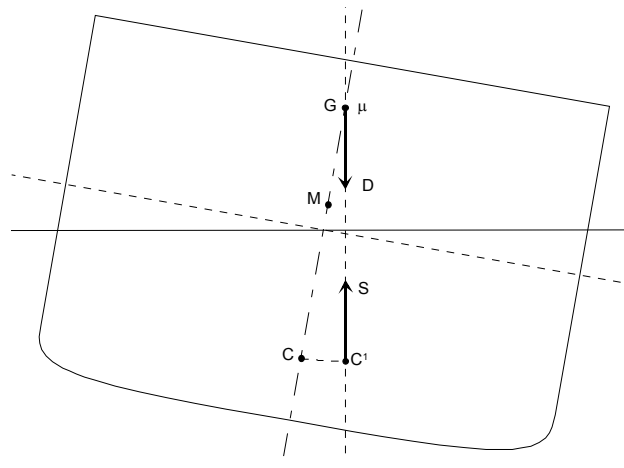
In una nave ingavonata il centro di gravità G coincide con il falso metacentro μ relativo al centro C^1 della carena inclinata e si trova al di sopra del metacentro iniziale.



Non appena si applica una forza sbandante esterna, la nave si inclina formando una coppia autosbandante che fa aumentare l'inclinamento della nave

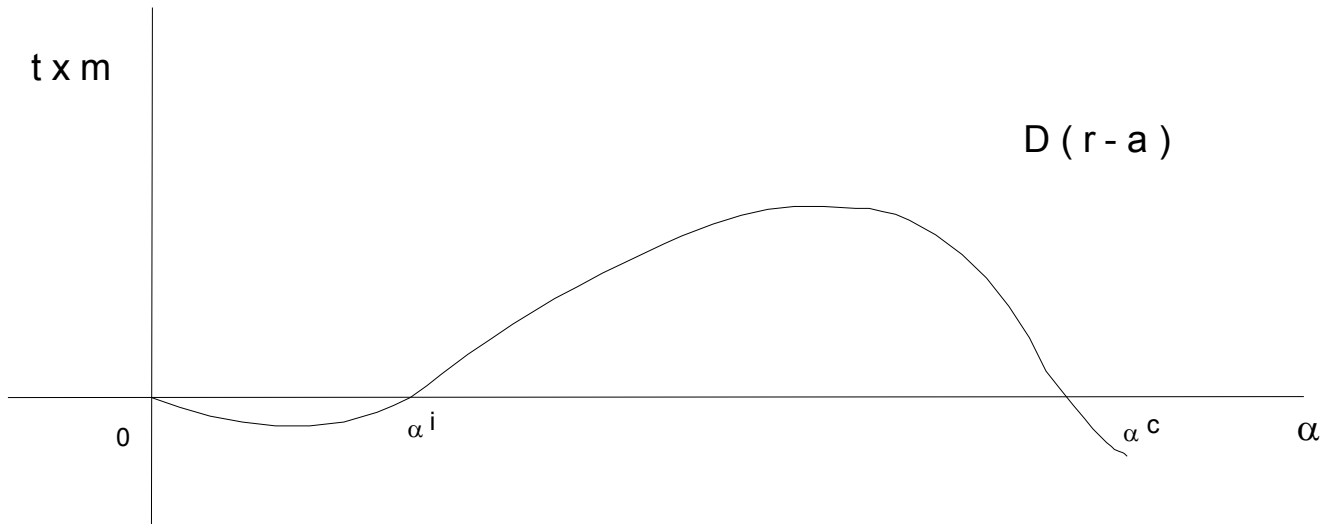


Quando la spinta passa di nuovo per G , cioè il G coincide con il μ , la nave ritorna in equilibrio stabile e si ferma. Naturalmente la condizione principale che questo succeda è che l'evolva metacentrica sia a rami inizialmente ascendenti, che si ottiene come già detto in precedenza con la forma delle murate rettilinea.



Nella nave ingavonata la curva del momento di stabilità risulterà inizialmente sotto l'asse dell'ascissa.

ELEMENTI DI STABILITA'



Inizialmente dal punto 0 al punto α^i la nave è instabile, oltrepassatolo essa diventa stabile fino al punto α^c , dopo di che la nave ritorna instabile.

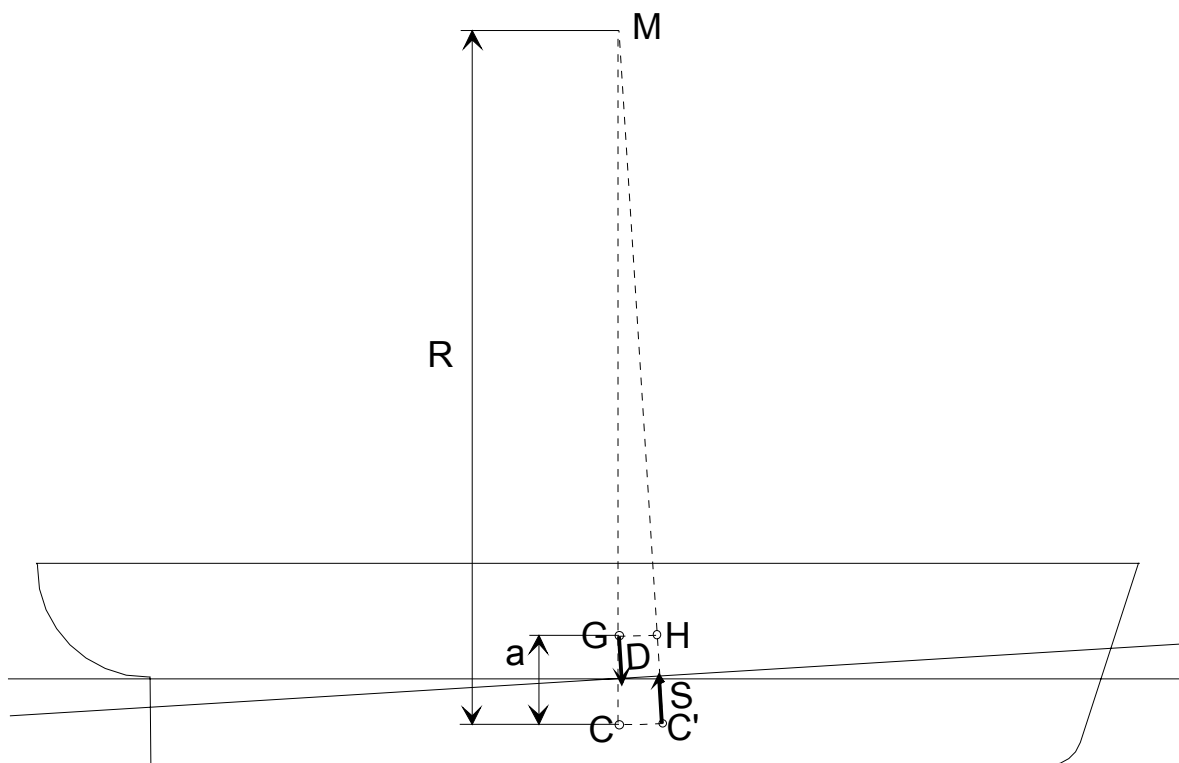
Per riportare una nave ingavonata ad una posizione d'equilibrio inizialmente stabile, è necessario provocare lo spostamento del suo centro di gravità in modo da portarlo al disotto del metacentro trasversale:

- 1) imbarcando pesi o zavorrando simmetricamente sul fondo;
- 2) sbarcando pesi o dezavorrando simmetricamente al disopra del centro di gravità;
- 3) spostamento dall'alto verso il basso di pesi.

Se per errore, in una nave ingavonata di 5° sulla dritta, si trasporta un peso sulla sinistra per eliminarlo, la nave sbanda a sinistra di 10° .

Stabilità longitudinale

Se per l'azione di una causa esterna una nave subisce un'inclinazione longitudinale, la *curva dei centri di carena* giace nel piano d'inclinazione, e per angoli d'inclinazione β minore di 10° - 12° l'arco CC' può ritenersi confuso con un arco di circonferenza di cui il punto M ne rappresenti il centro di curvatura, indicato perciò *metacentro longitudinale* o *grande metacentro*.



Al nuovo galleggiamento di equilibrio, il sistema di forze D ed S forma una coppia di momento:

$$M = D GH$$

cioè:

$$M = D (R - a) \text{ sen } \beta$$

ELEMENTI DI STABILITA'

che risulta sempre positivo per l'elevato valore di R rispetto ad a.

Infatti R è uguale a $R = I_y/V$ dove il V è il volume di carena, I_y è il momento d'inerzia della figura di galleggiamento dritta all'immersione considerata, rispetto al proprio asse y baricentrico trasversale.

Ne consegue un grande valore di I_y i cui bracci hanno la dimensione della semilunghezza nave; di solito R è compreso tra L e 2L.

Momento Unitario d'assetto

E' quel momento di coppia longitudinale che applicata alla nave ne fa variare l'assetto di 1 cm o di 1" (come assetto si intende la differenza tra il pescaggio poppiero e quello prodiero).

Questo momento è indicato con Mu e dato dall'espressione:

$$Mu = D R / 100 L$$

dove D è il dislocamento istantaneo, R è il raggio metacentrico longitudinale istantaneo, 1/100 è un cm. espresso in m., L la lunghezza fra le perpendicolari.

Impiego del Mu

Con il Mu si forma una semplice ed importante proporzione:

$$Mu : 1 = \Sigma px : \Delta I$$

Da cui si ricavano i due problemi fondamentali degli spostamenti longitudinali:

$$\Delta I = \Sigma px / Mu$$

oppure:

$$\Sigma px = \Delta I Mu$$

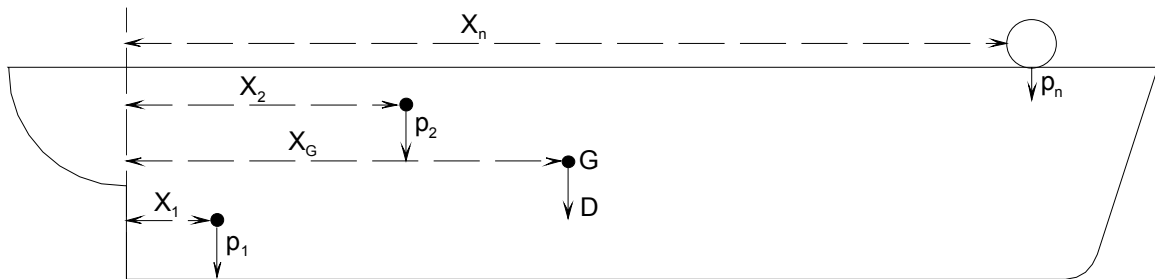
Spostamento di pesi

Quando si sposta un peso verso il basso o verso l'alto il G segue lo spostamento, alzandosi o abbassandosi nello stesso verso di una certa quantità e producendo o variazioni di stabilità e/o variazioni di assetto trasversale longitudinale.

Per il principio della sovrapposizione degli effetti, qualunque sia il tipo di spostamento, si possono studiare separatamente i singoli spostamenti componenti e poi sommarne gli effetti, purché si cominci da quello verticale se c'è.

In seguito allo spostamento di un peso p per una distanza d il centro di gravità della nave (G) si sposta parallelamente e nello stesso senso dello spostamento effettuato per una distanza:

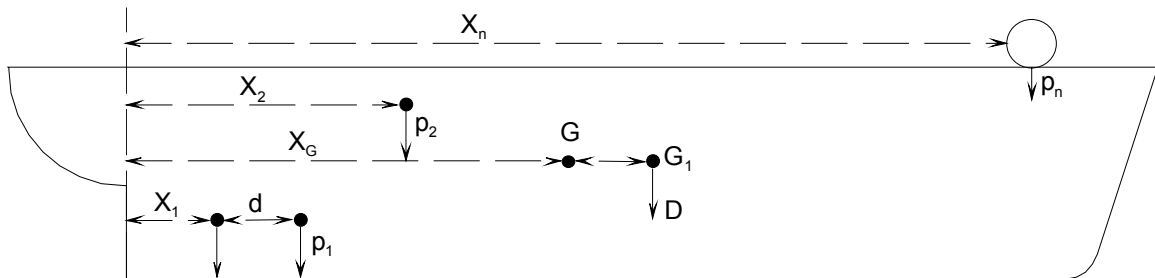
$$GG' = p d / D$$



Per il Teorema dei Momenti, prima dello spostamento dei pesi, la distribuzione dei pesi a bordo sarà:

$$D \cdot X_G = p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_n x_n$$

Dopo lo spostamento di un peso si avrà:

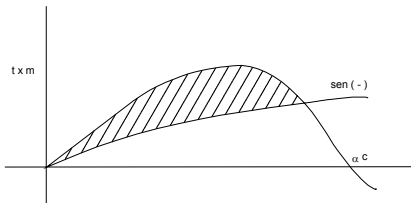


$$D X_{G'} = p_1 (x_1 + d) + p_2 x_2 + \dots + p_n x_n$$

Sottraendo la prima espressione dalla seconda si avrà:

$$D \cdot X_{G'} - D X_G = p_1 (x_1 + d) - p_1 x_1$$

ELEMENTI DI STABILITA'



$$D \cdot (X_{G'} - X_G) = p_1 x_1 + p_1 \cdot d - p_1 x_1$$

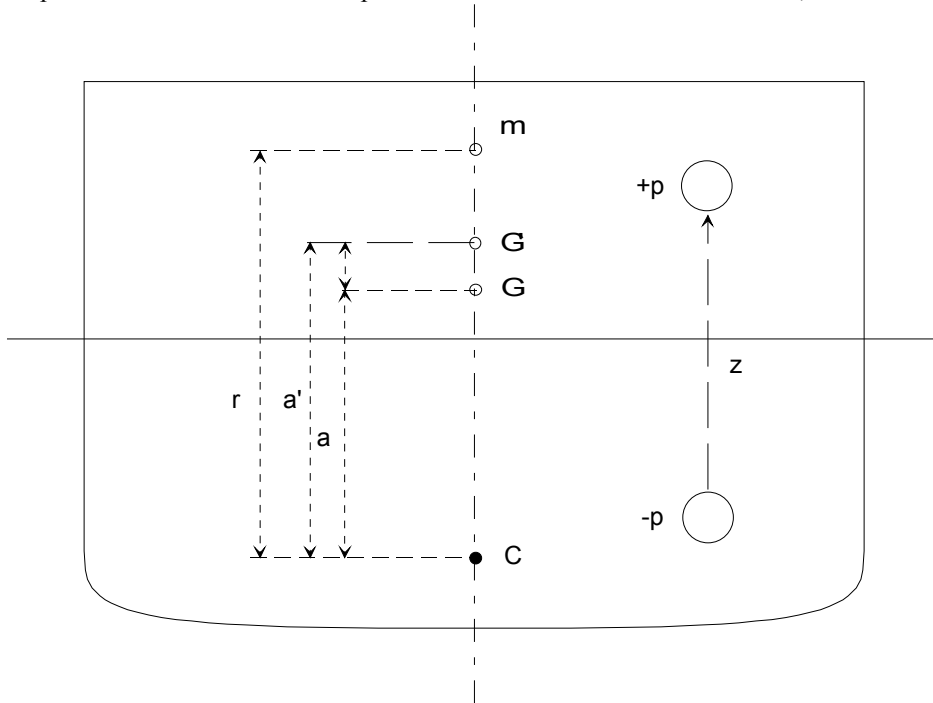
$$D GG' = p_1 d$$

$$GG' = p d / D$$

cioè:

Spostamento verticale verso l'alto

In seguito a questo spostamento Il G subisce uno spostamento verticale avvicinandosi ad M, diminuendo così la stabilità.



La nuova altezza metacentrica sarà uguale a:

$$(r - a') = r - (a + GG')$$

essendo:

$$GG' = pz/D$$

avremo:

$$(r - a') = (r - a - pz/d)$$

Da notare che:

- 1] la stabilità di forma (r) è rimasta inalterata, perché non si sono mossi ne (C) ne (m)
- 2] in caso di spostamento verso l'alto il segno va invertito.

Naturalmente anche la curva di stabilità si modifica. In pratica si applicano due momenti alla nave, uno di stabilità, e l'altro riducente in seno.

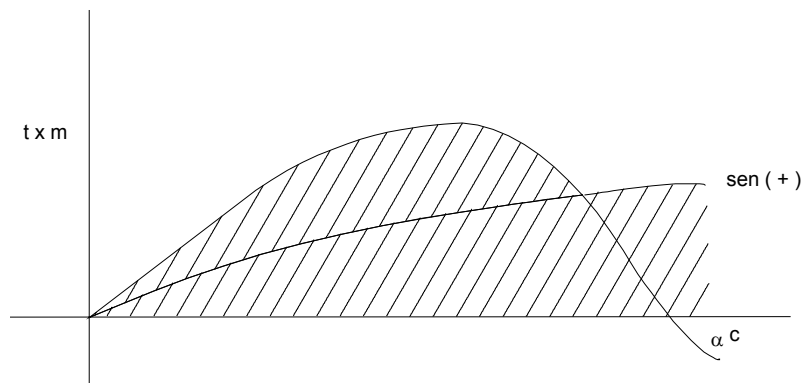
Moltiplicando la nuova MG per D sen α si ottiene:

$$Ms = D (r - a') \text{ sen } \alpha$$

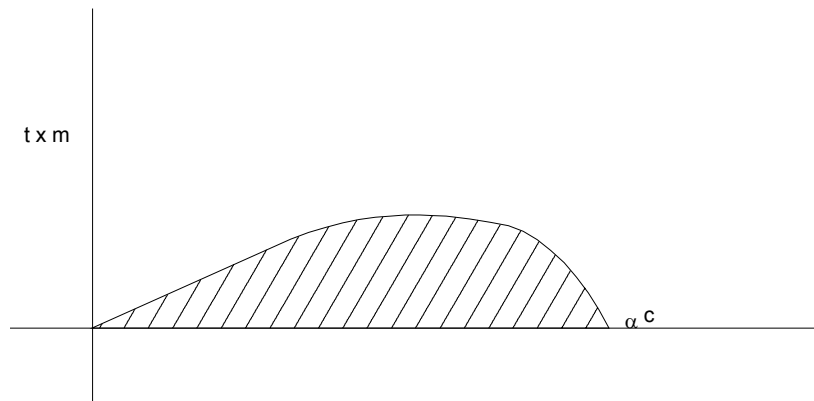
da cui:

$$D (r - a) \text{ sen } \alpha - pz \text{ sen } \alpha$$

Il nuovo diagramma sarà la somma algebrica delle curve dei due momenti, riportando quello negativo in seno, per comodità, al disopra dell'asse delle ascisse.



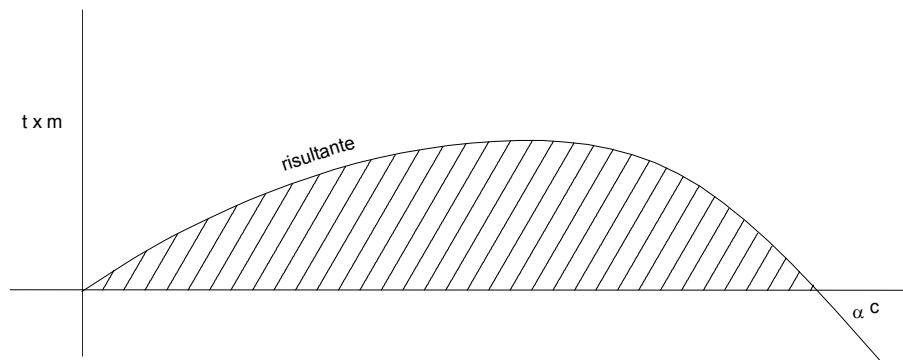
ELEMENTI DI STABILITA'



Spostando il peso in basso si avrà:

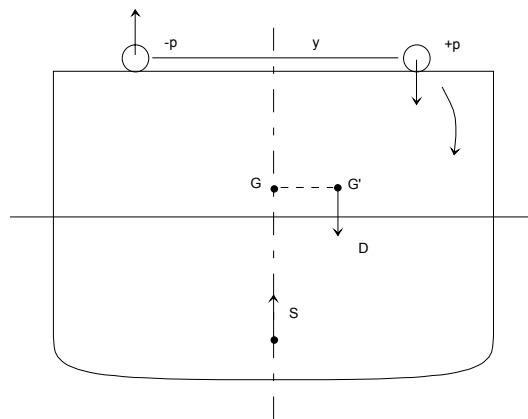
$$(r - a') = (r - a + pz/D)$$

Il diagramma della curva di stabilità si modificherà di conseguenza:

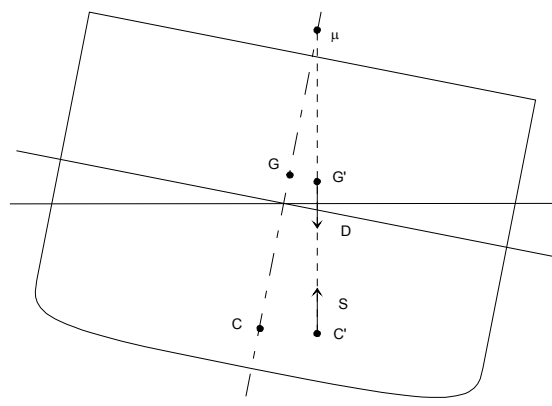


Spostamento trasversale di un peso I: esame statico

A seguito allo spostamento laterale di un peso, il G esce dal diametrale e per un istante il D forma con la S una coppia sbandante.



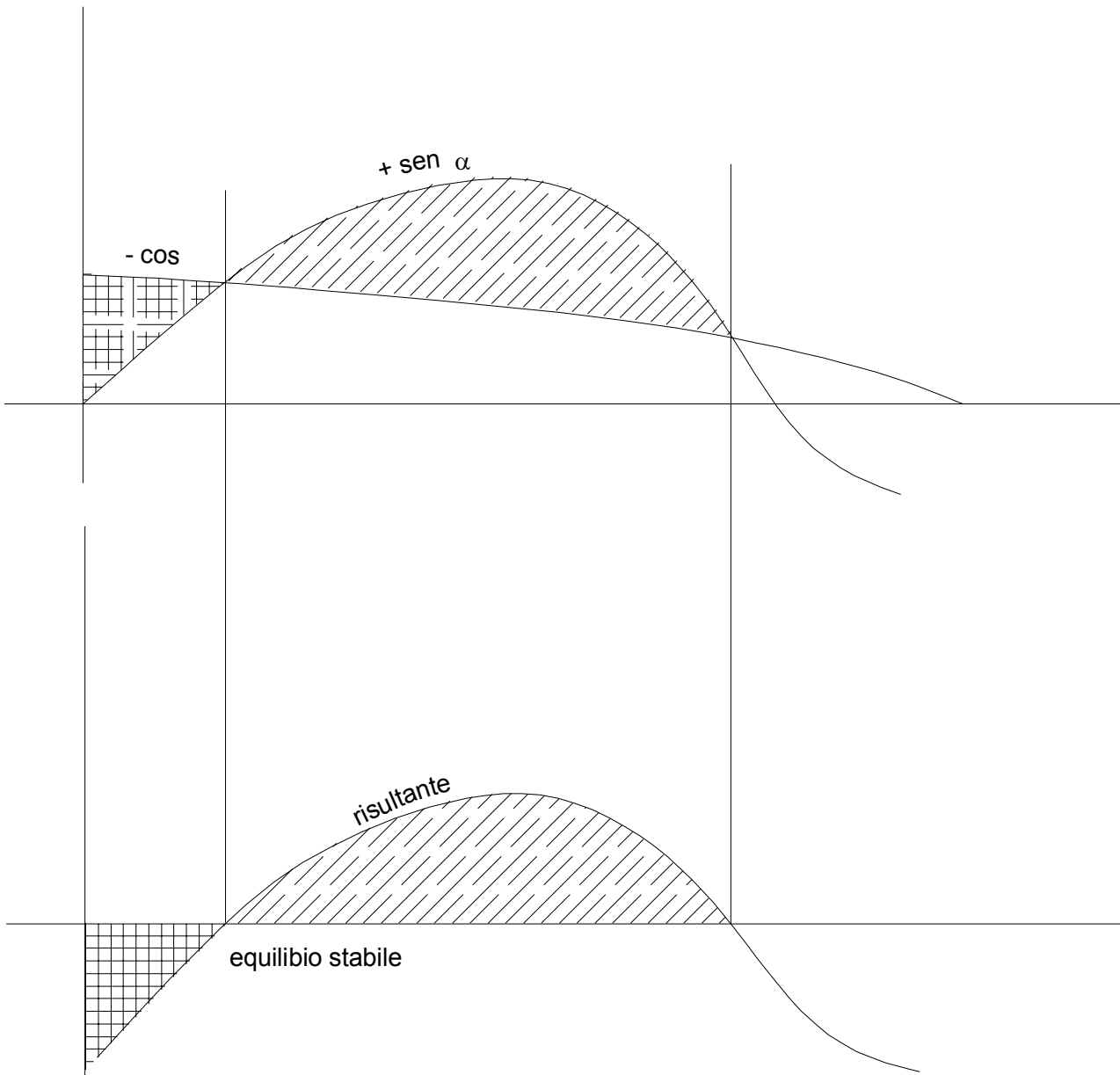
La nave sbanda finché la spinta S non passa per la nuova posizione del G



ELEMENTI DI STABILITA'

Per trovare l'angolo α s di equilibrio statico conviene adoperare il metodo matematico delle coppie coesistenti lasciando il G fermo e tenendo conto della coppia sbandante del peso spostato che ha momento sbandante in cos.

Uguagliando, all'equilibrio i momenti delle due coppie risulta:



$$D (r - a) \text{ sen } \alpha s = p y \text{ cos } \alpha s$$

$$\text{tg } \alpha s = p y / D (r - a)$$

Si vede che l'angolo di sbandamento statico α s è direttamente proporzionale al momento abbattente ed inversamente proporzionale al $D (r - a)$.

Per questo motivo è detto "coefficiente di resistenza alle inclinazioni trasversali".

Alla stessa maniera dei precedenti casi la curva di stabilità si modificherà e sarà data dalla sovrapposizione della curva del momento di stabilità prima dello spostamento con quella abbattente in cos., che viene riportata al di sopra dell'asse delle ascisse per comodità.

Spostamento trasversale di un peso II: esame dinamico

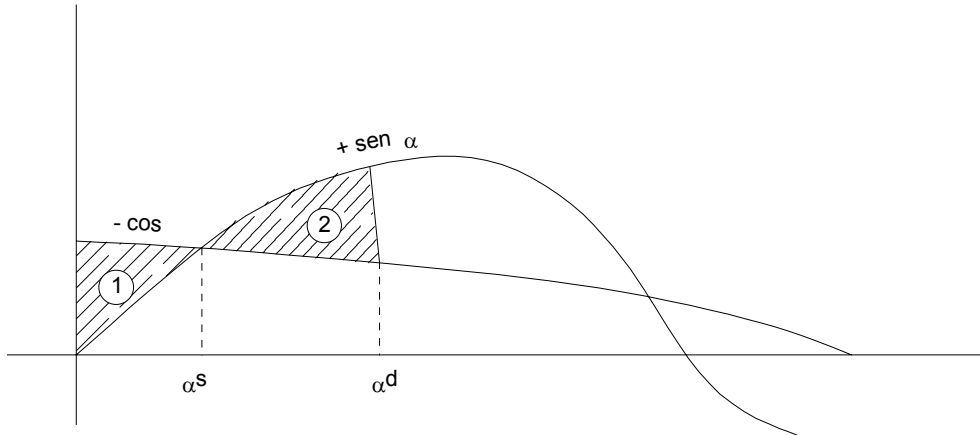
L'area racchiusa dalla curva di un momento statico di forze è il lavoro che compie questa coppia tra 0° e l'angolo α considerato. Le dimensioni di quest'area sono rispettivamente un momento statico di forze e un angolo, e il loro prodotto rappresenta un lavoro.

L'area racchiusa dalla curva del momento di stabilità si chiama *lavoro resistente* ed è quello che bisogna vincere per capovolgere la nave, mentre l'area racchiusa dalla curva del momento abbattente in coseno prende il nome di *lavoro abbattente*.

Finché c'è l'eccesso di *lavoro abbattente* la nave sbanderà. Raggiunto l'angolo α s di equilibri statico essa non si fermerà

ELEMENTI DI STABILITA'

ma lo oltrepasserà fino a raggiungere l'angolo ad dove l'eccesso di *lavoro resistente* eguaglierà quella di *lavoro abbattente* iniziale.



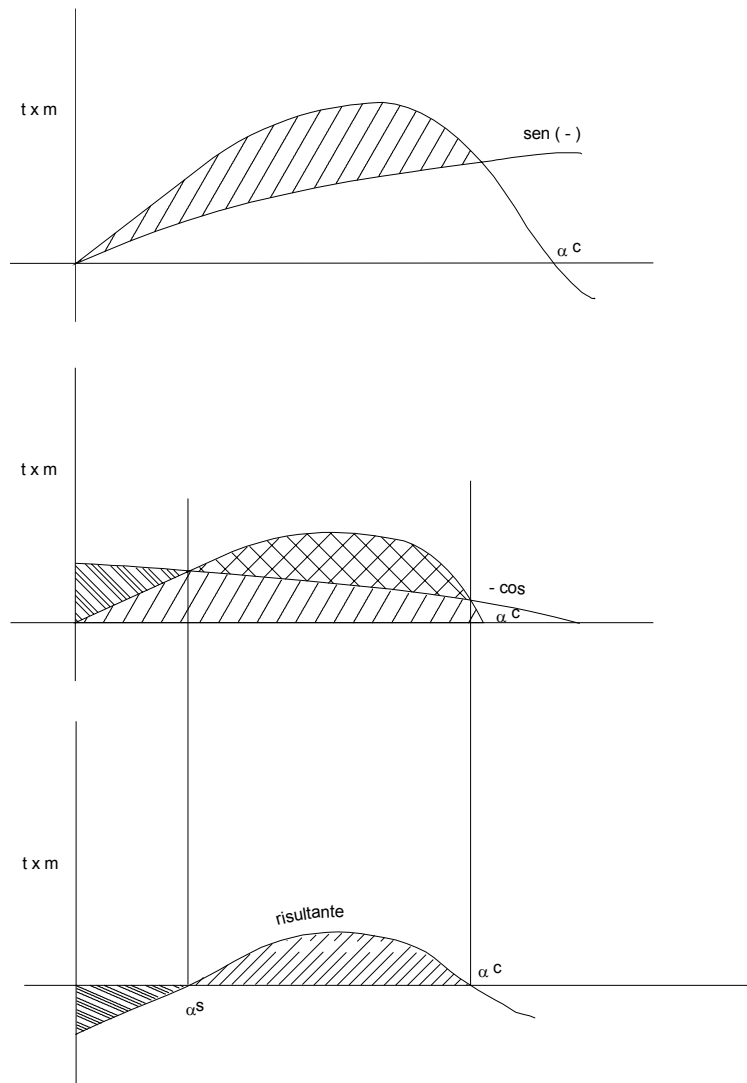
Spostamento obliquo di un peso

L'effetto di uno spostamento obliquo è la somma degli effetti dovuti allo spostamento verticale e quello trasversale. L'assetto trasversale risulta:

$$tg a = py / D [r - a + - (pz/D)]$$

con il segno (+) se lo spostamento verticale è verso il basso, con il segno (-) se lo spostamento è verso l'alto.

Il diagramma di stabilità si modifica due volte, e nel caso di spostamento verticale componente verso l'alto si ottiene:



Riferimenti Bibliografici

- ❑ Rapacciuolo "Elementi di Teoria della Nave" Ed. Tipografia Moderna, La Spezia
- ❑ Lloyd Triestino/Evergreen "Appunti di Stabilità"