

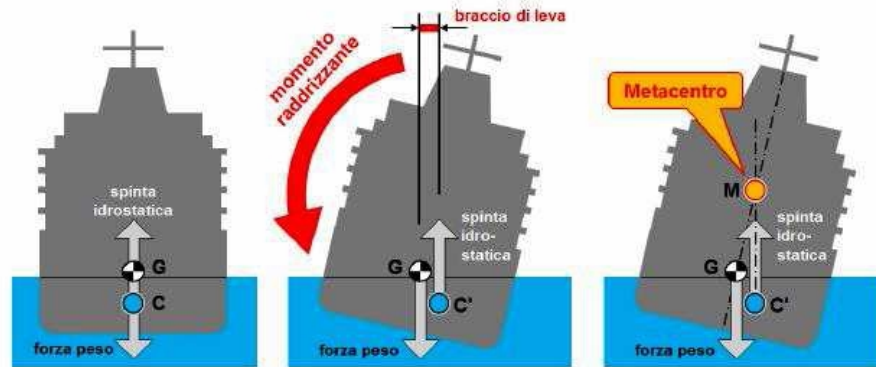
Ing. Sandro Rizzo



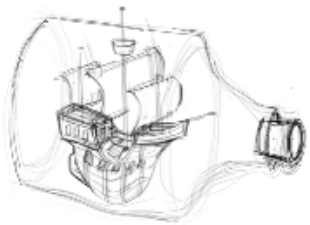
WL

WL

Appunti di STABILITÀ DELLA NAVE



Il presente e-book è stato realizzato senza fini di lucro; il suo contenuto può essere distribuito e usato liberamente per finalità didattiche e divulgative. Le immagini utilizzate sono, in gran parte, di pubblico dominio e disponibili in rete. Nel rispetto della vigente legislazione, non si intende violare alcun copyright. Eventuali marchi registrati sono di proprietà dei rispettivi titolari. È rigorosamente vietato l'uso e la diffusione a fini commerciali.



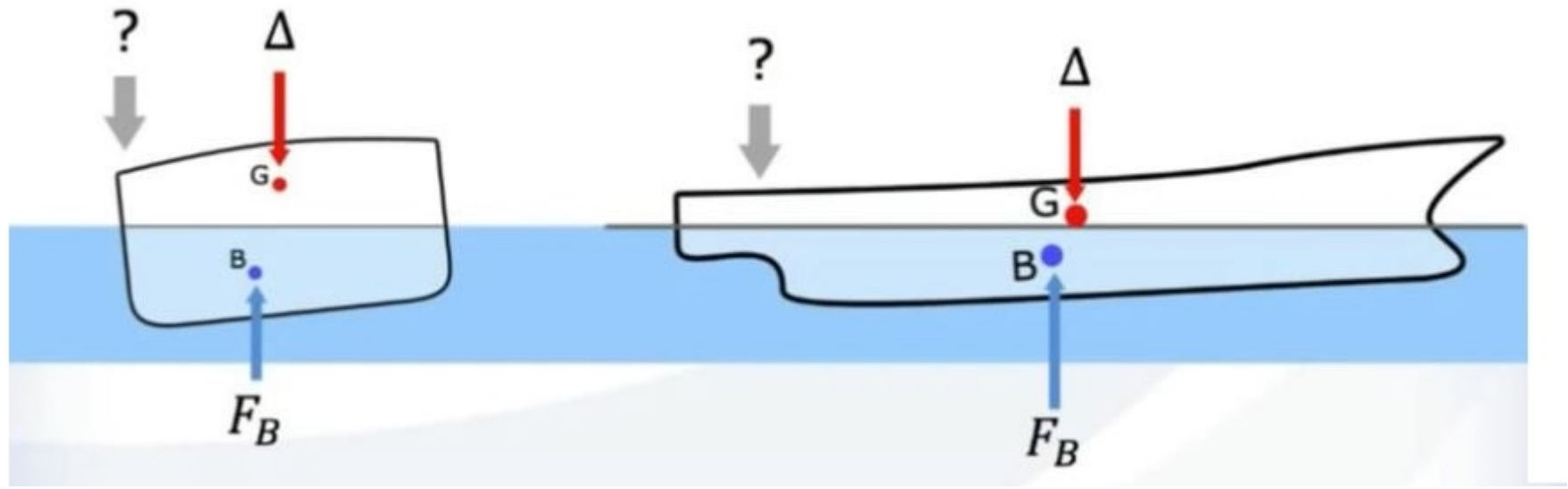
***“Se Pitagora avesse posto il copyright sulle sue tabelline non saremmo mai arrivati sulla Luna”
(Pelagusplus)***



Stabilità Statica della Nave

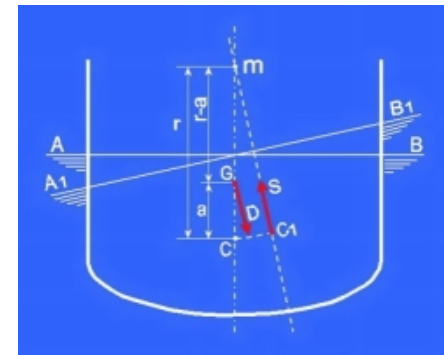
Stabilità

Cosa accade quando la nave si è inclinata?



Stabilità trasversale

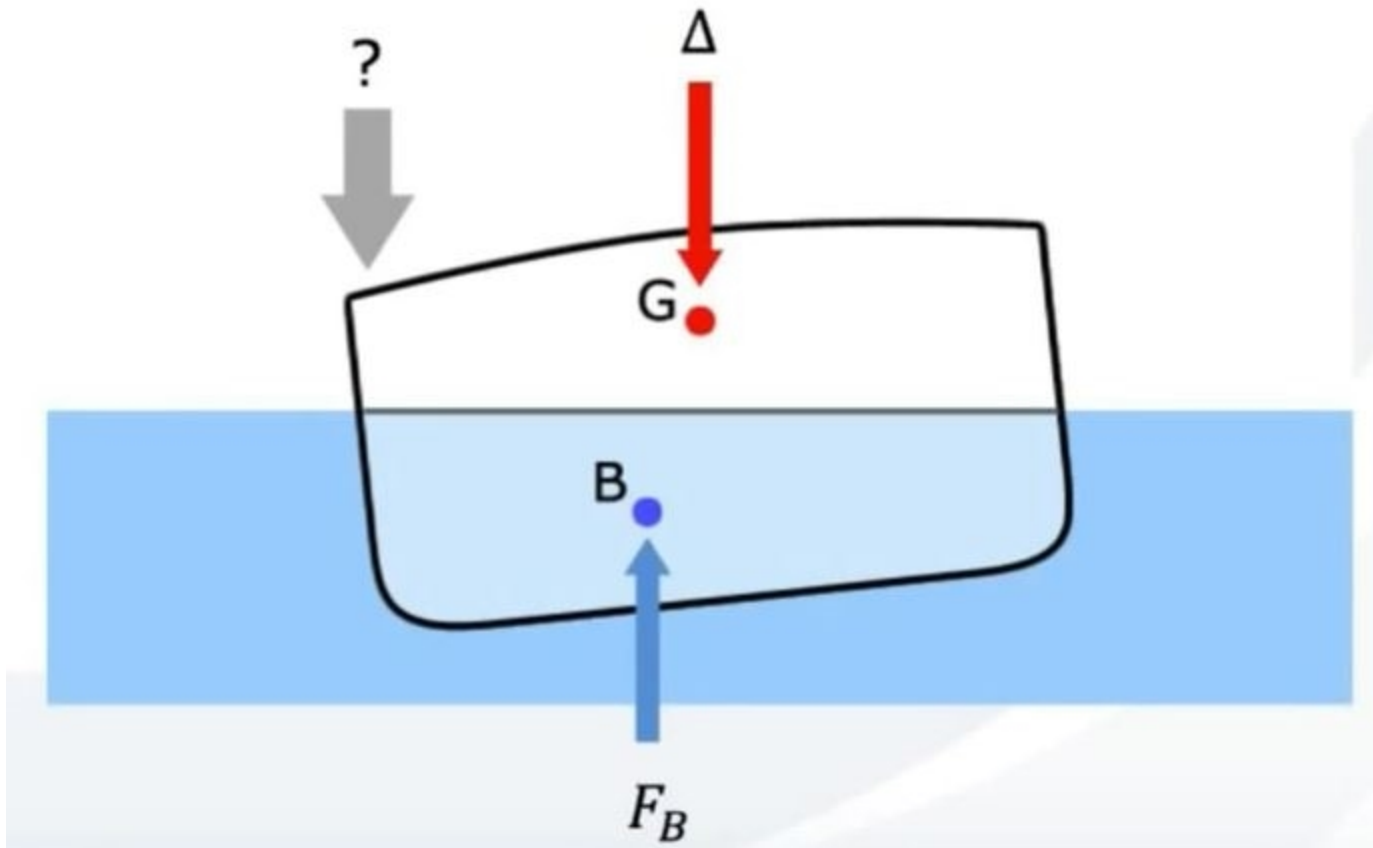
Stabilità longitudinale



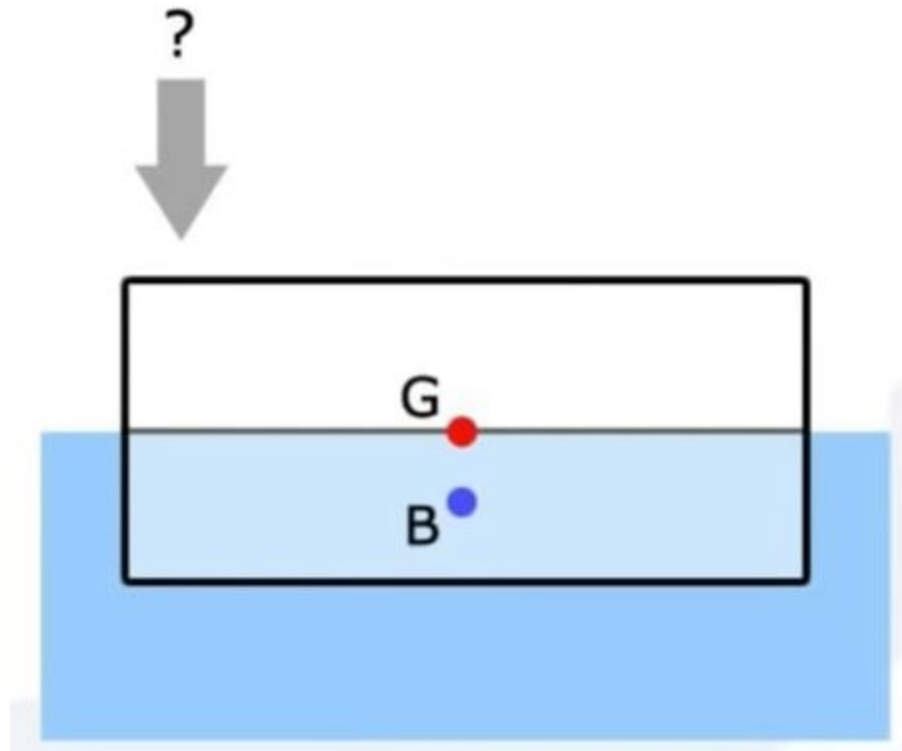
Stabilità Trasversale

Stabilità trasversale

cosa accade un volta che la nave è inclinata?

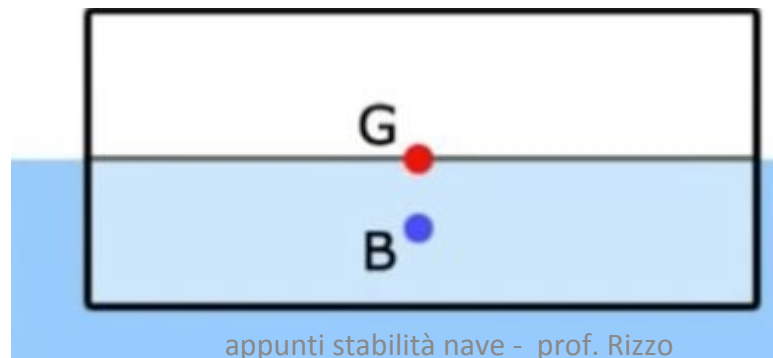
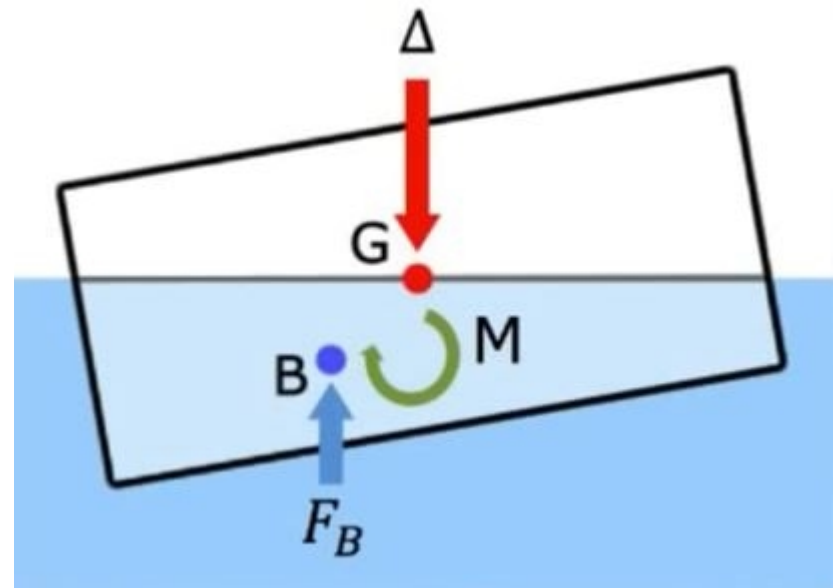
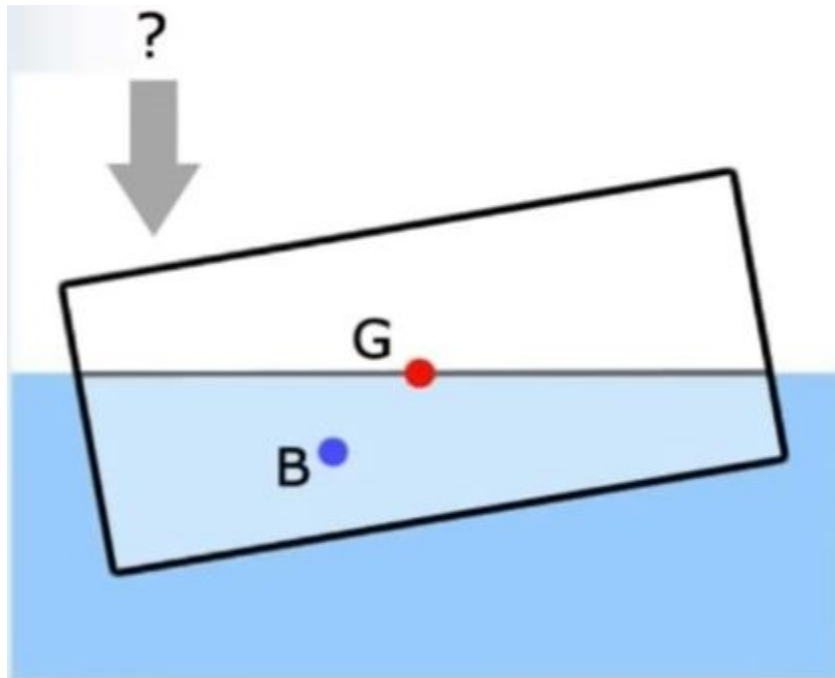


Controllo della Stabilità “blocchi semplici”



Controllo della Stabilità

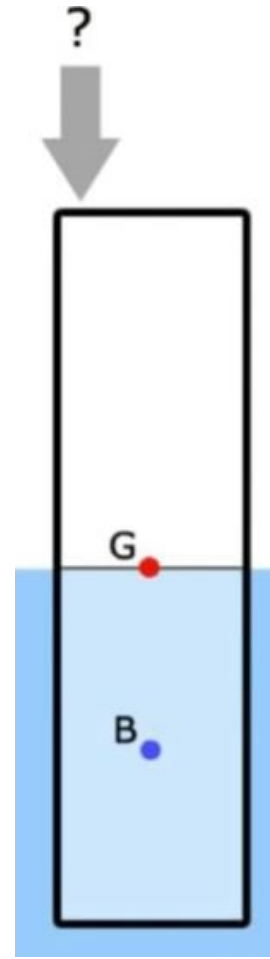
“blocchi semplici”



STABILE

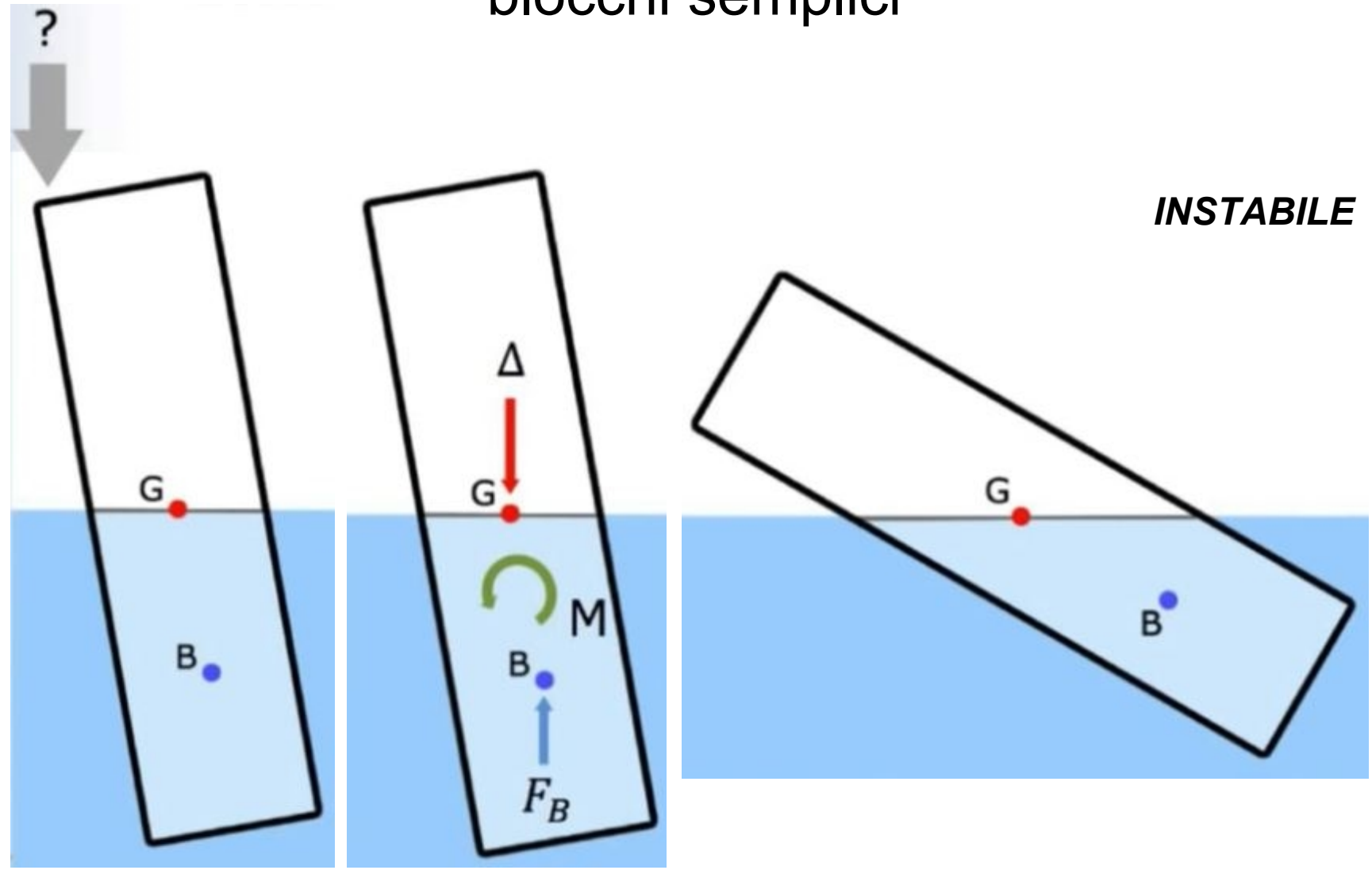
Controllo della Stabilità

“blocchi semplici”

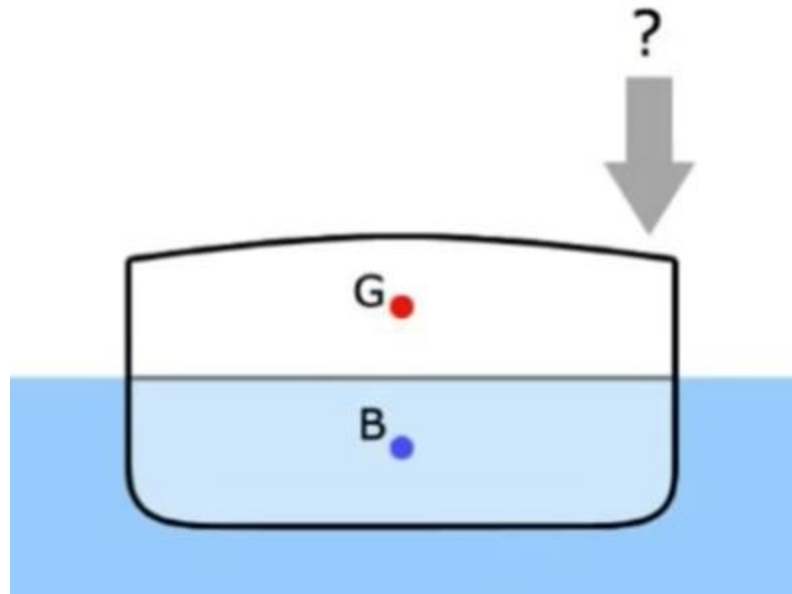


Controllo della Stabilità

“blocchi semplici”

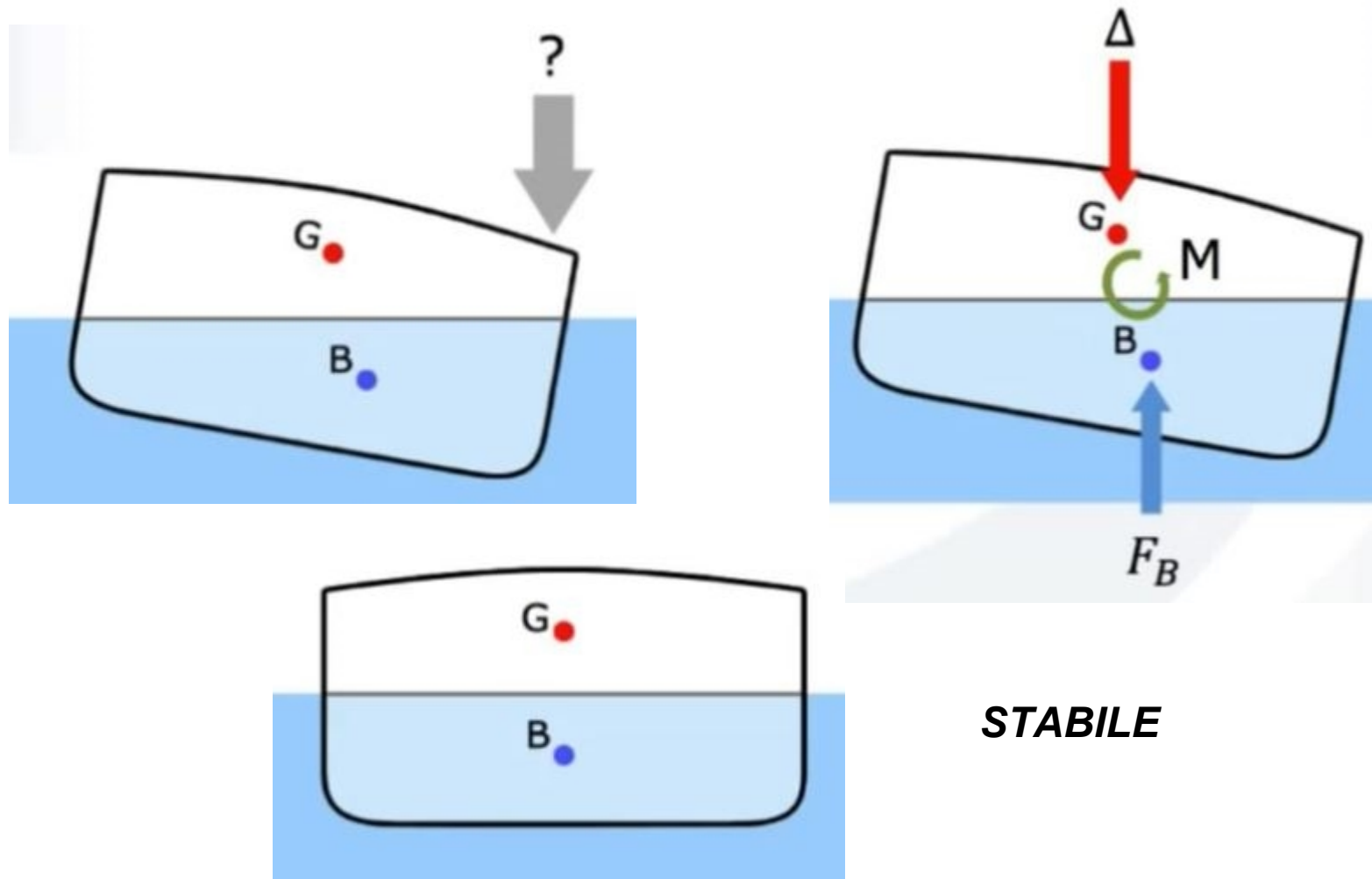


Controllo della Stabilità “la Nave”



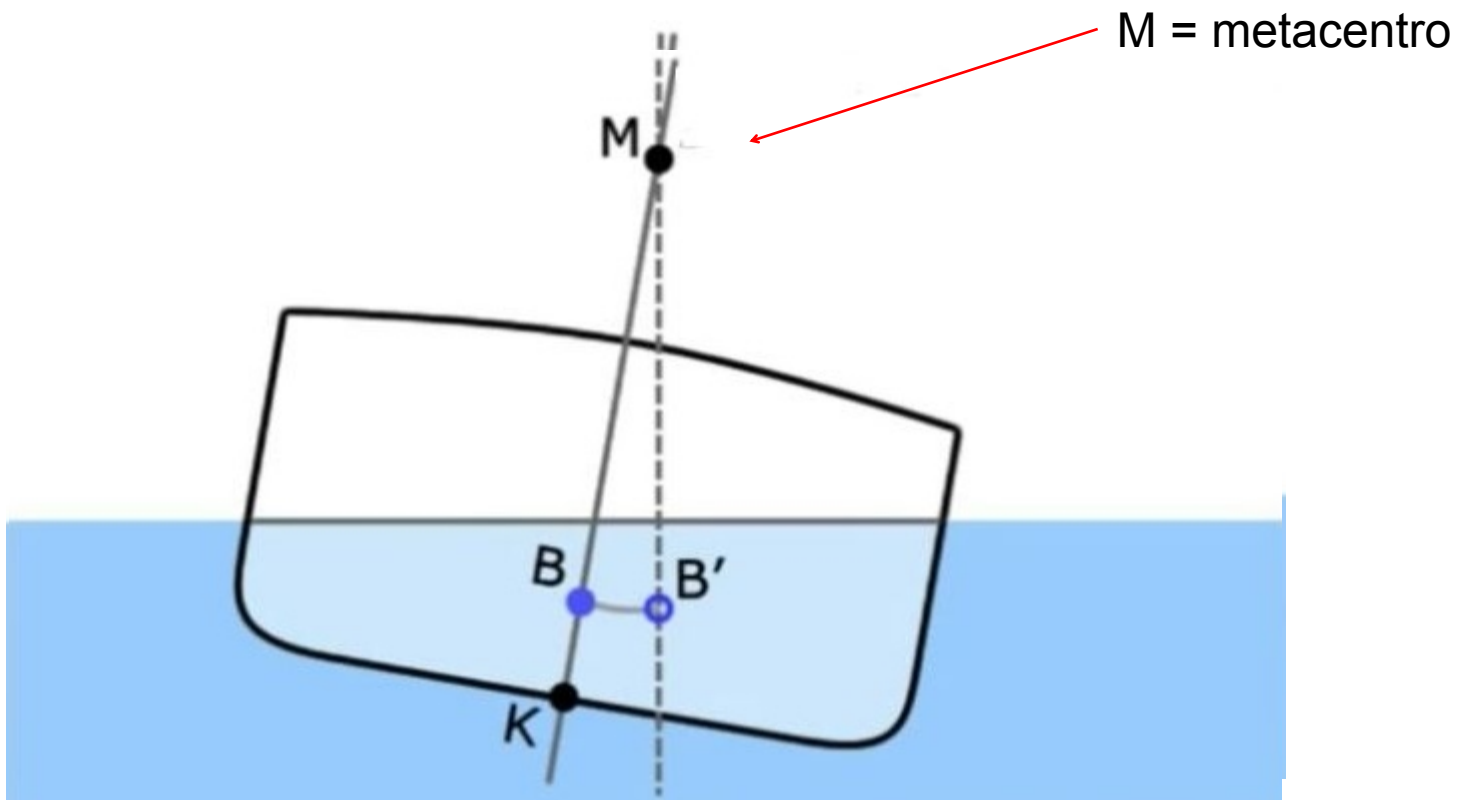
Controllo della Stabilità

“la Nave”



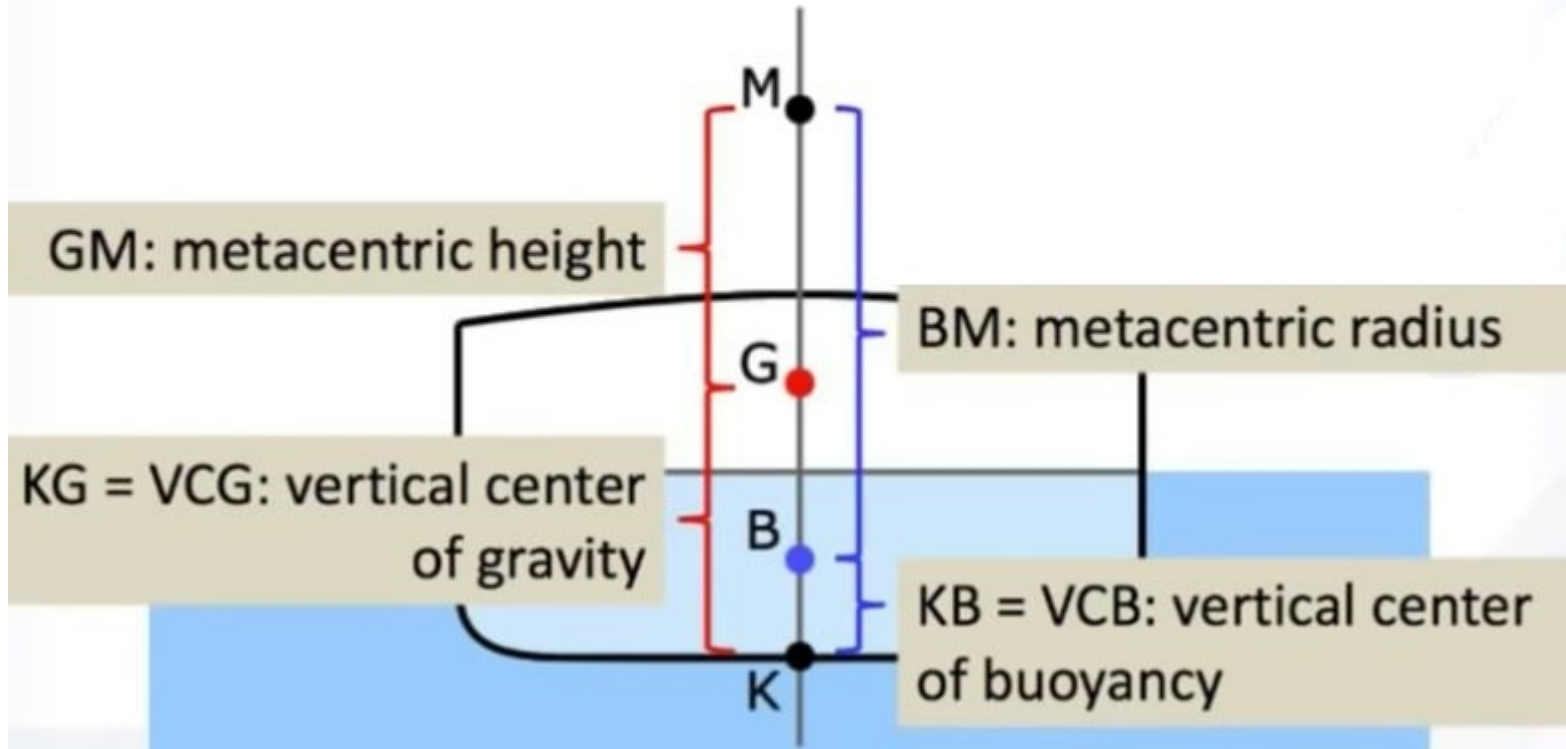
STABILE

Metacentro

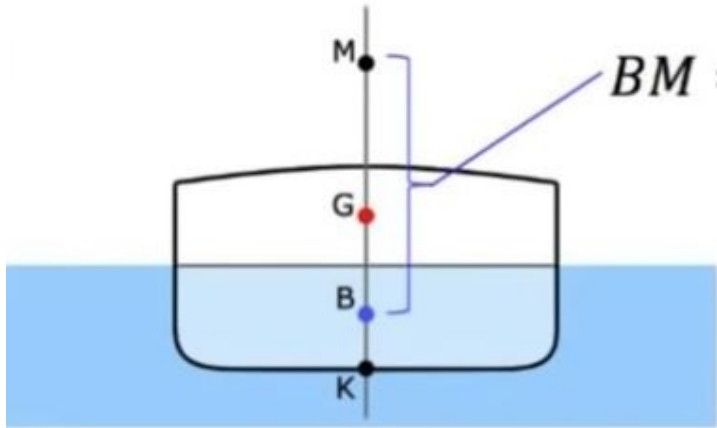


Altezza Metacentrica

$$KG + GM = KM = KB + BM$$



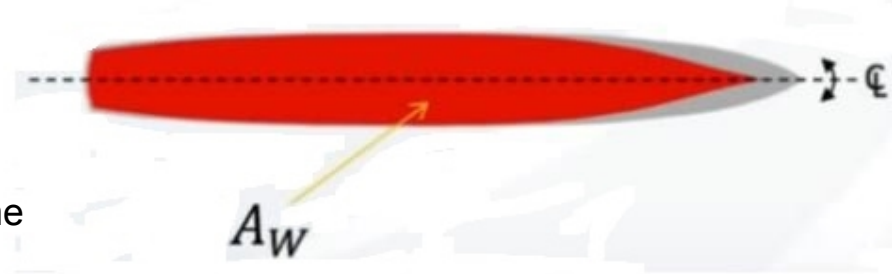
Calcolo del raggio metacentrico BM



$$BM = \frac{I_T}{\nabla}$$

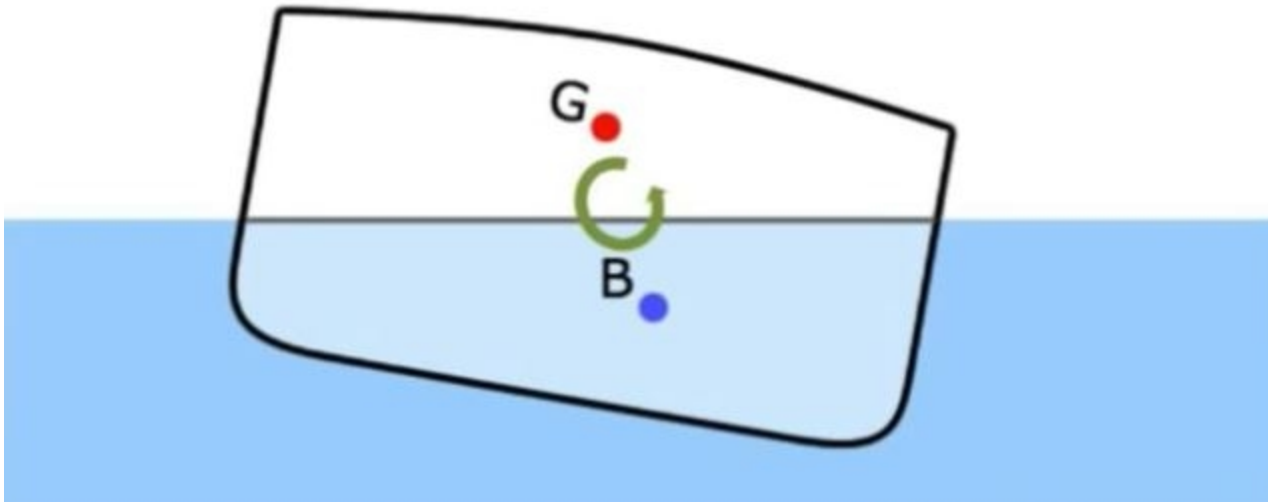


I_T : momento d'inerzia della sup. della figura di galleggiamento rispetto la center line



Stabilità Trasversale Iniziale

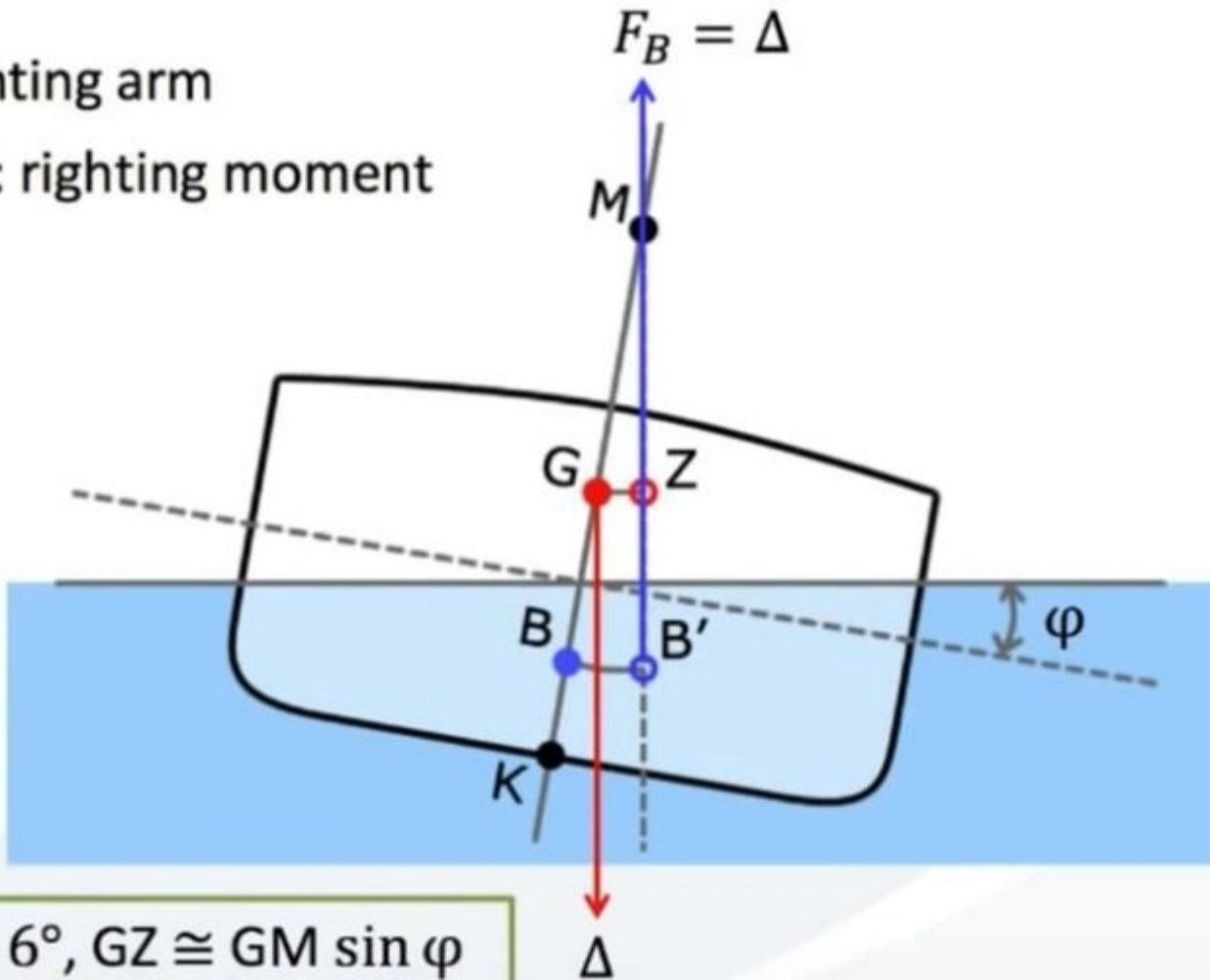
Come quantificare la stabilità?



Stabilità Trasversale Iniziale

GZ: righting arm

$\Delta \times GZ$: righting moment



for $\varphi < 6^\circ$, $GZ \cong GM \sin \varphi$

Calcolo dell'altezza metacentrica GM

- KB, BM, KM dipendono dalla forma dello scafo
 - ✓ KM fornito dalle curve idrostatiche della nave
- KG, GM dipendono dal carico della nave
 - ✓ KG determinato dai “pesi e momenti”



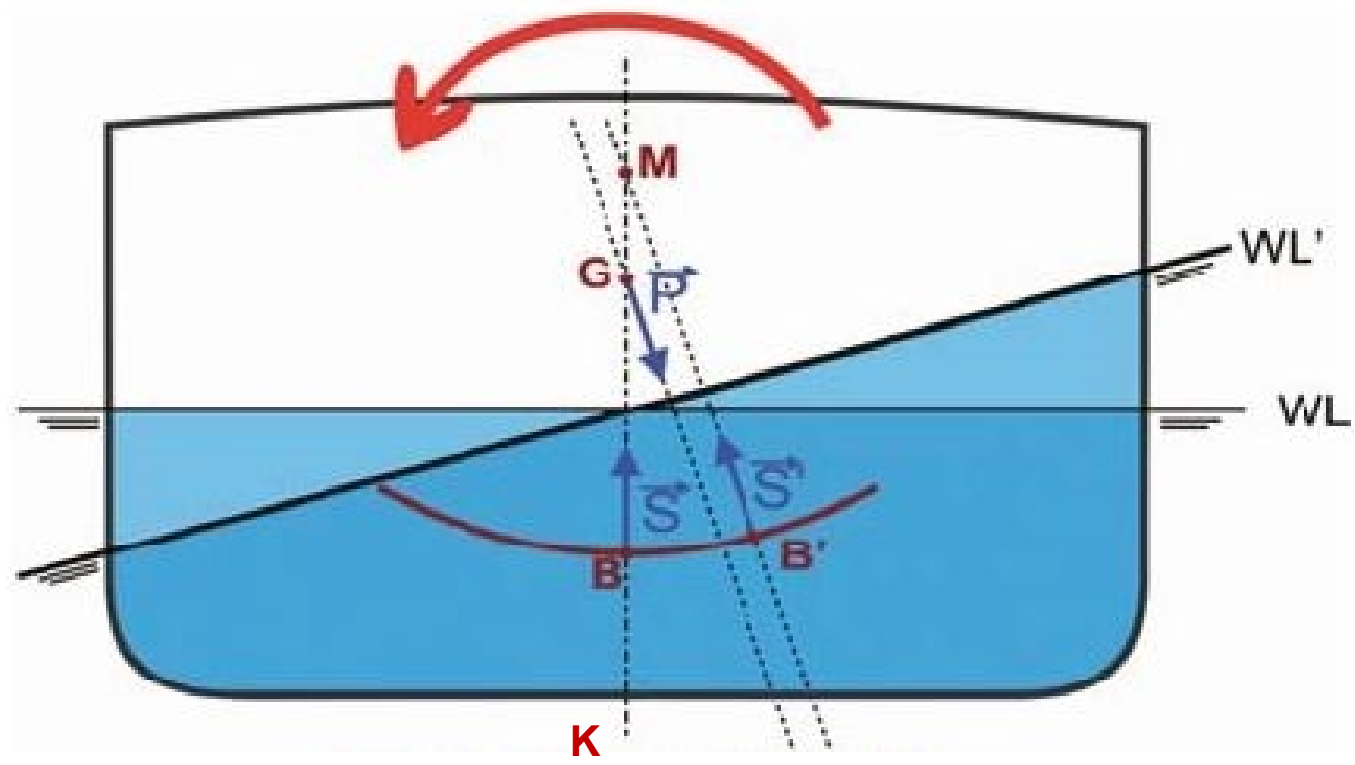
$$GM = KM - KG$$

GM > 0
stabile

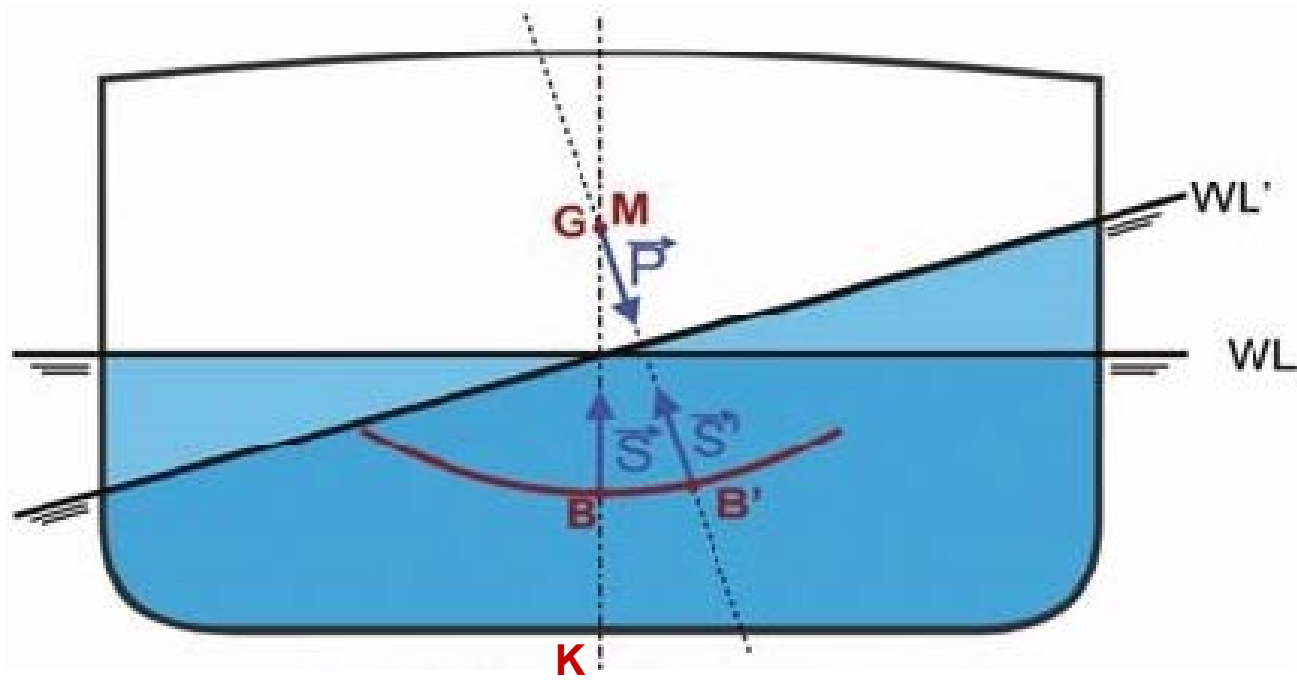
GM = 0
Indifferente

GM < 0
instabile

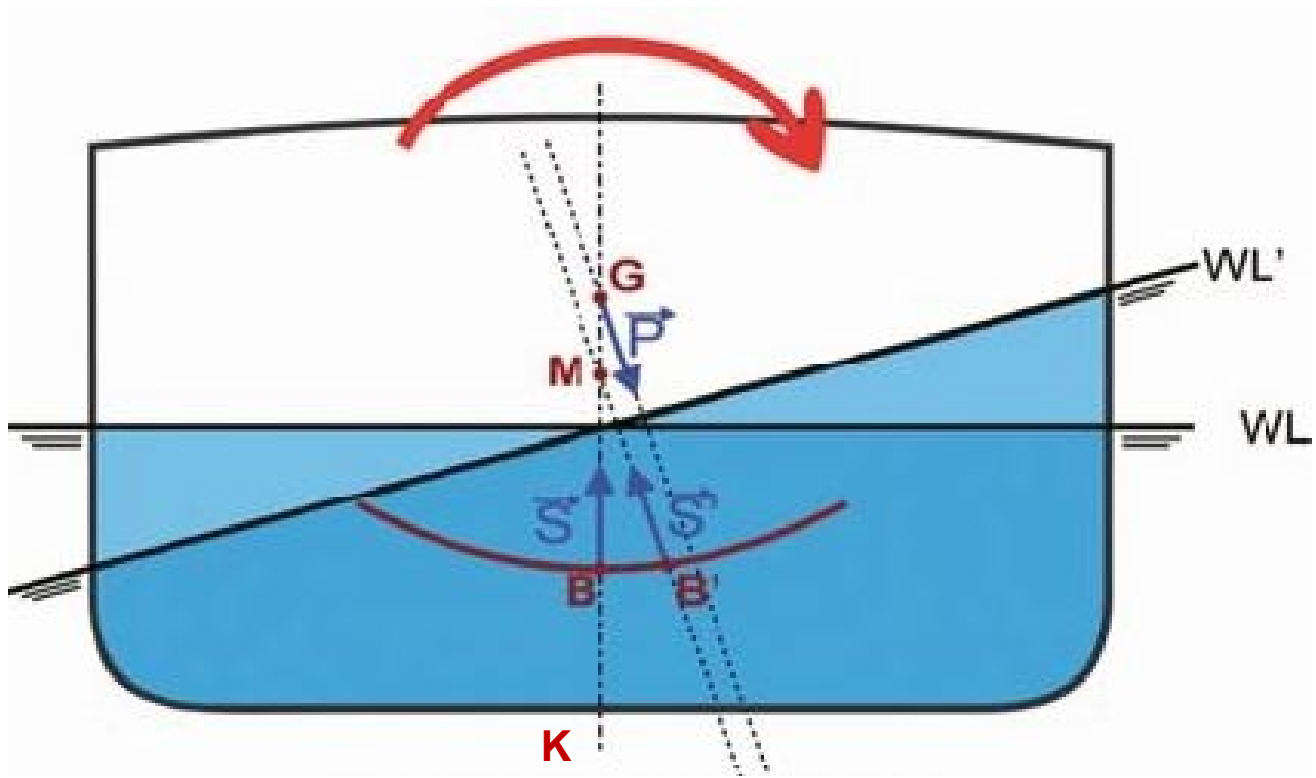
$GM > 0$ stabile



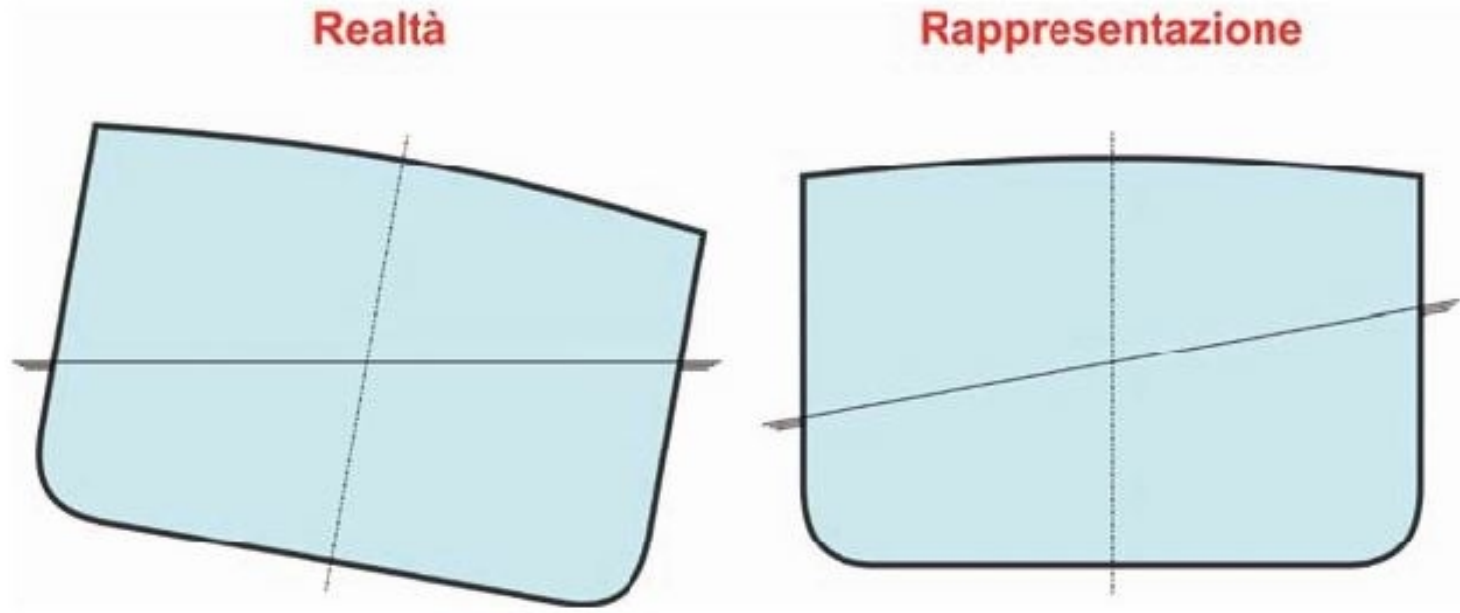
GM = 0 *indifferente*



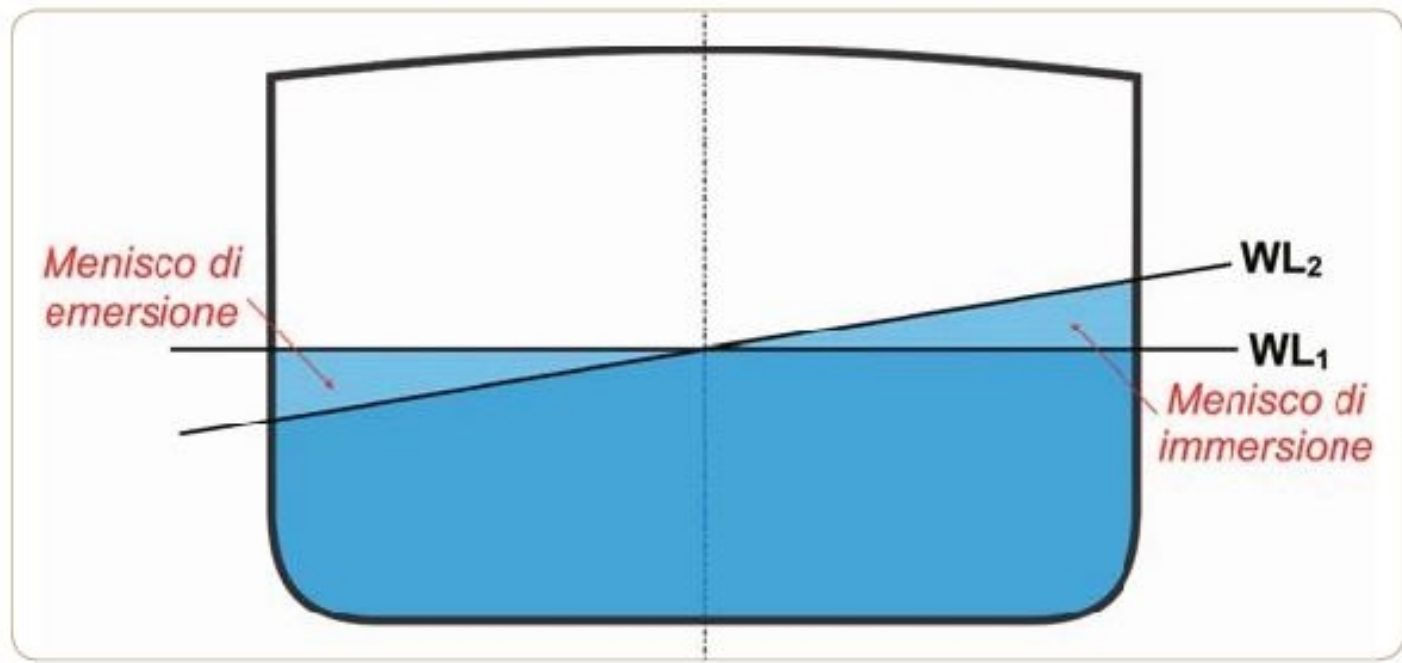
$GM < 0$ instabile



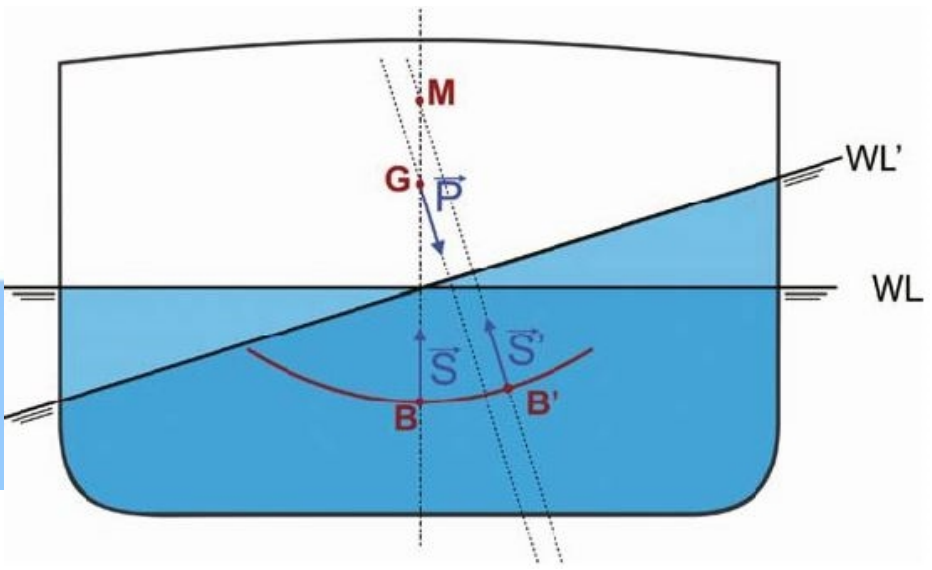
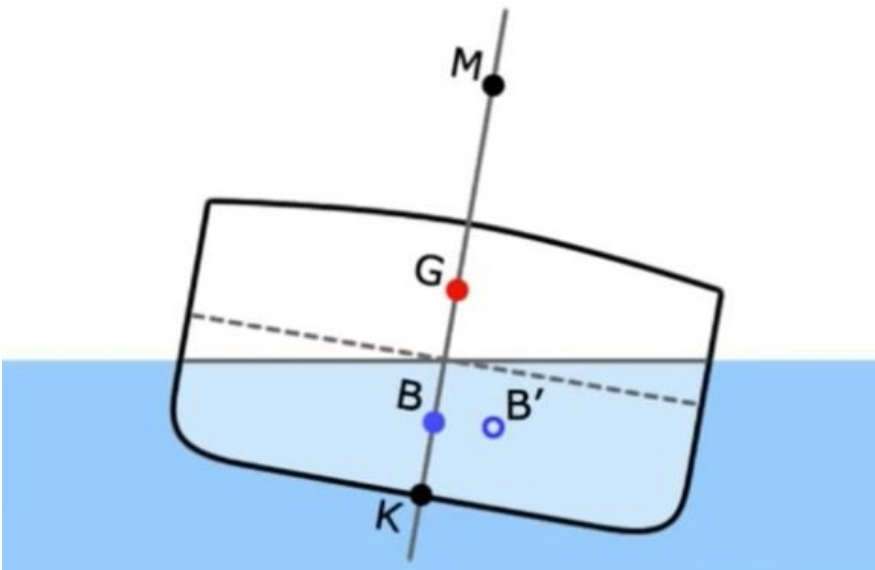
Rappresentazione inclinazione trasversale



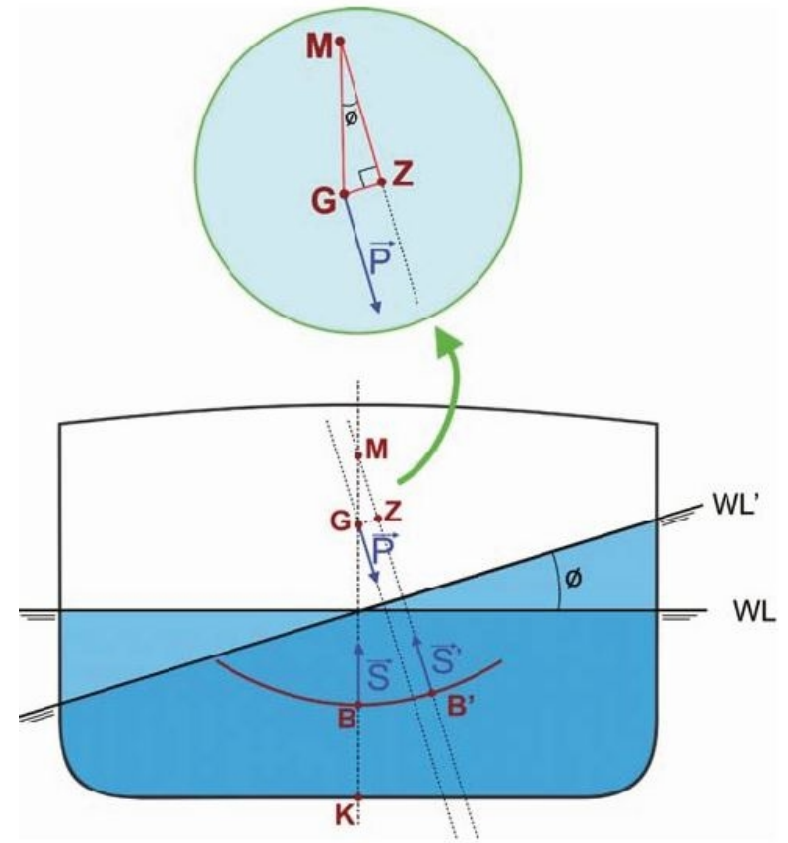
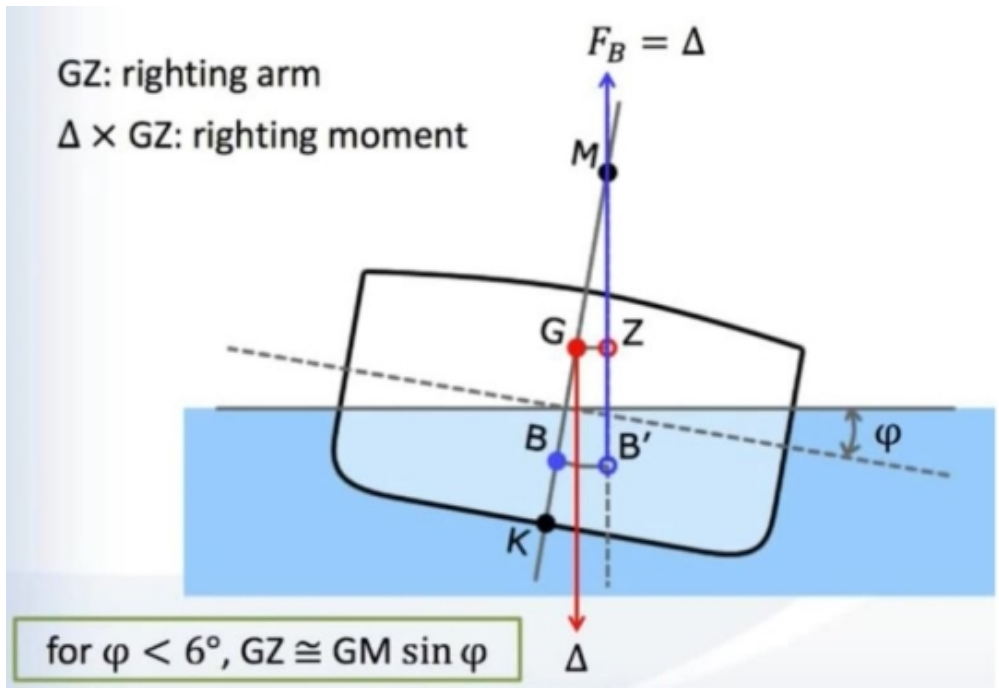
Rappresentazione inclinazione trasversale

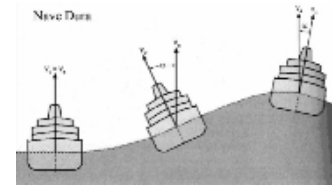


I due modi di rappresentazione



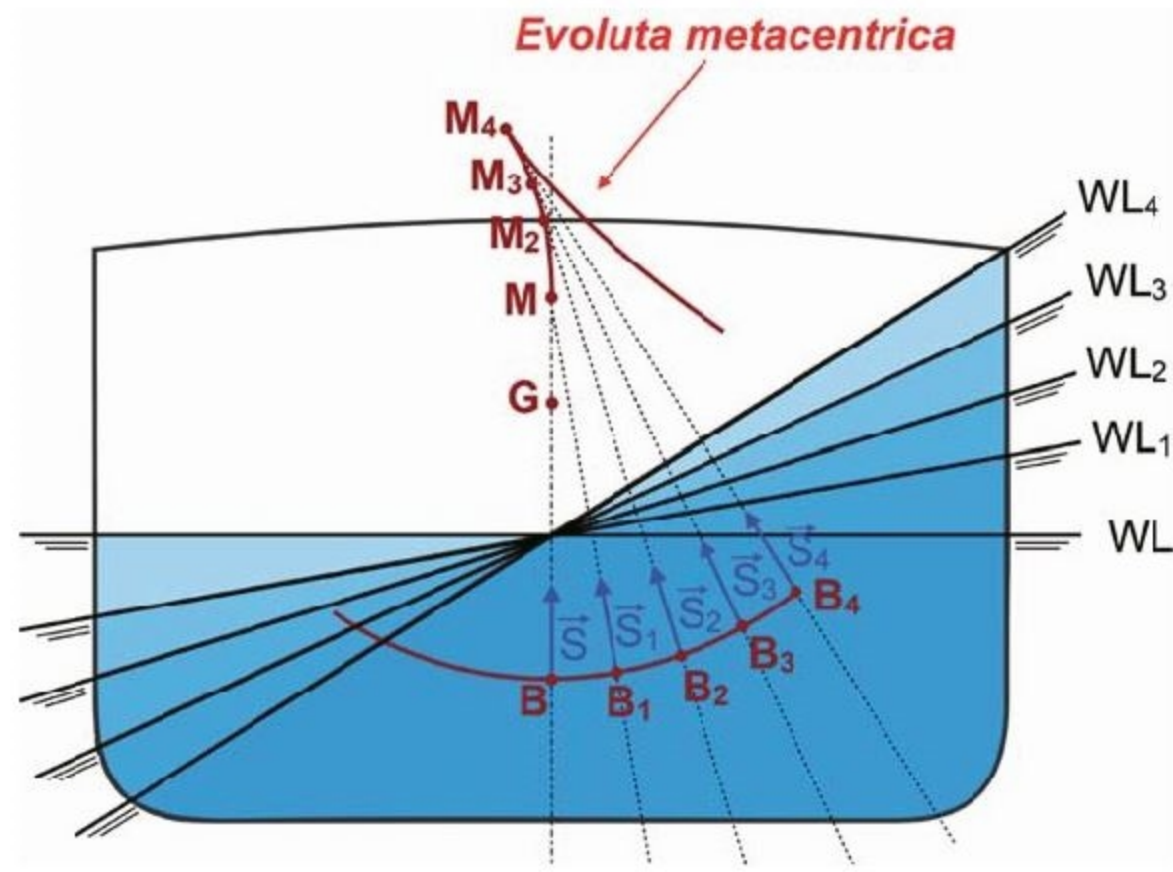
Stabilità Trasversale Iniziale





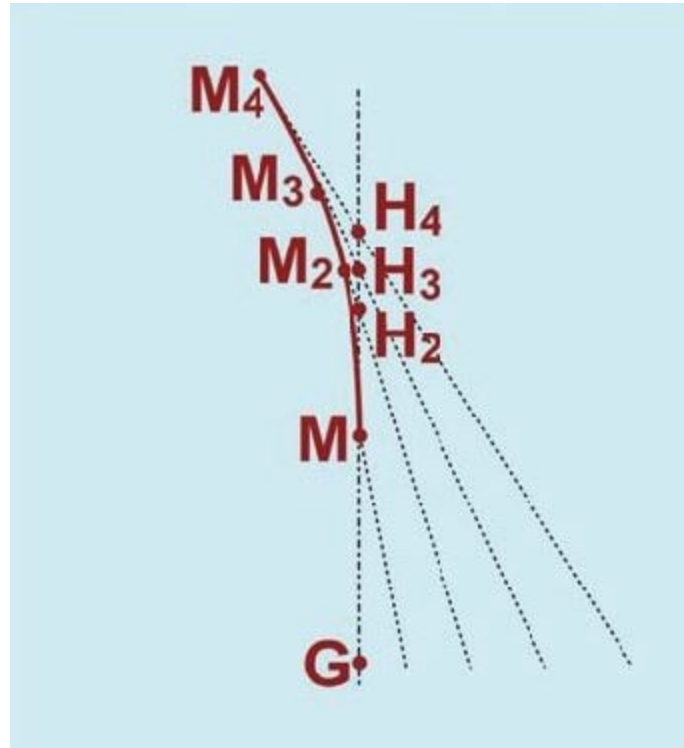
Stabilità Trasversale per grandi angoli

Percorso del metacentro



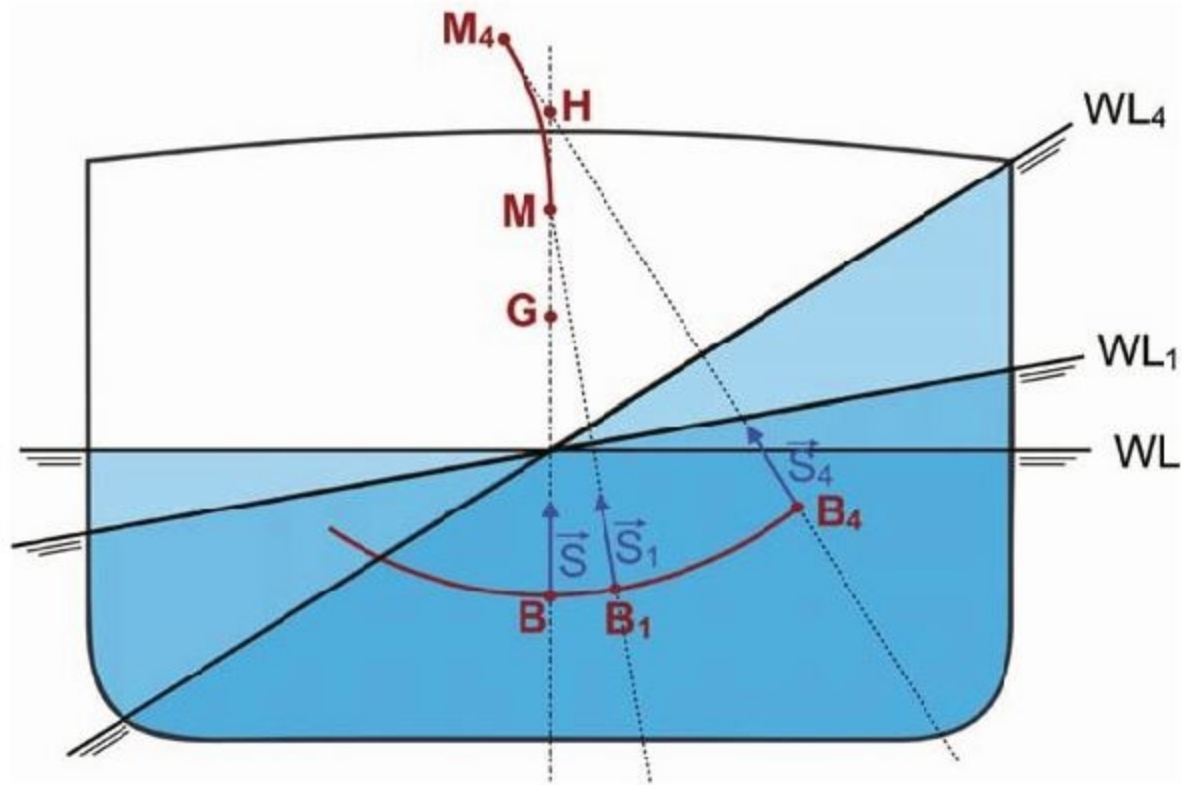
Rappresentazione semplificata che non tiene conto del fatto che per grandi inclinazioni i piani di galleggiamento non si intersecano nello stesso punto

Percorso del metacentro



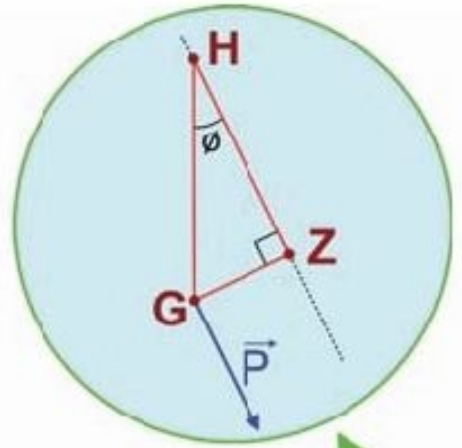
Particolare dell'evolva metacentrica e dell'individuazione dei prometacentri

Condizione equilibrio stabile



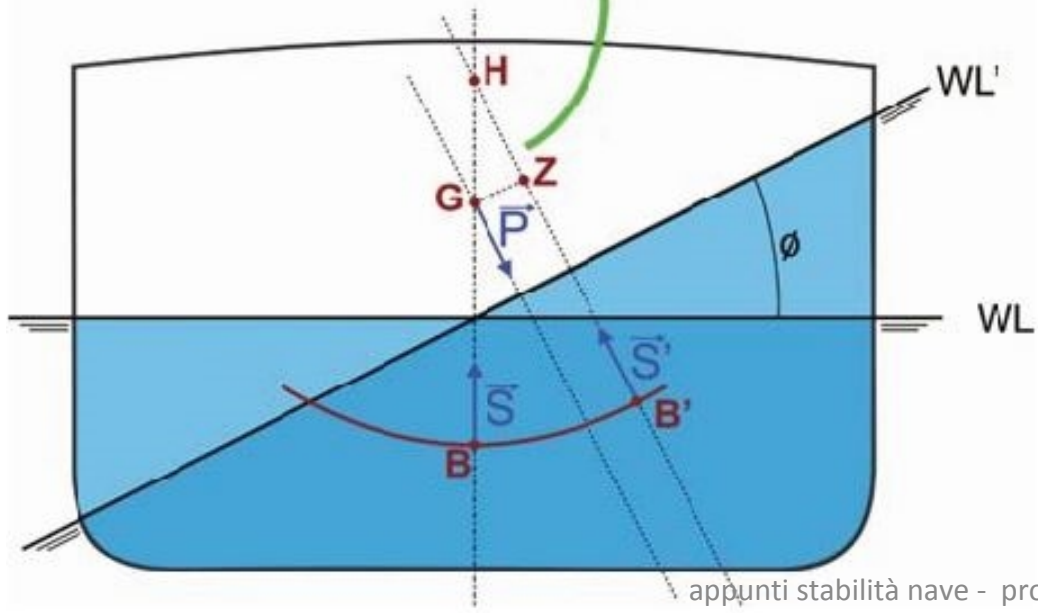
Per piccoli e grandi angoli di inclinazione

Condizione equilibrio stabile



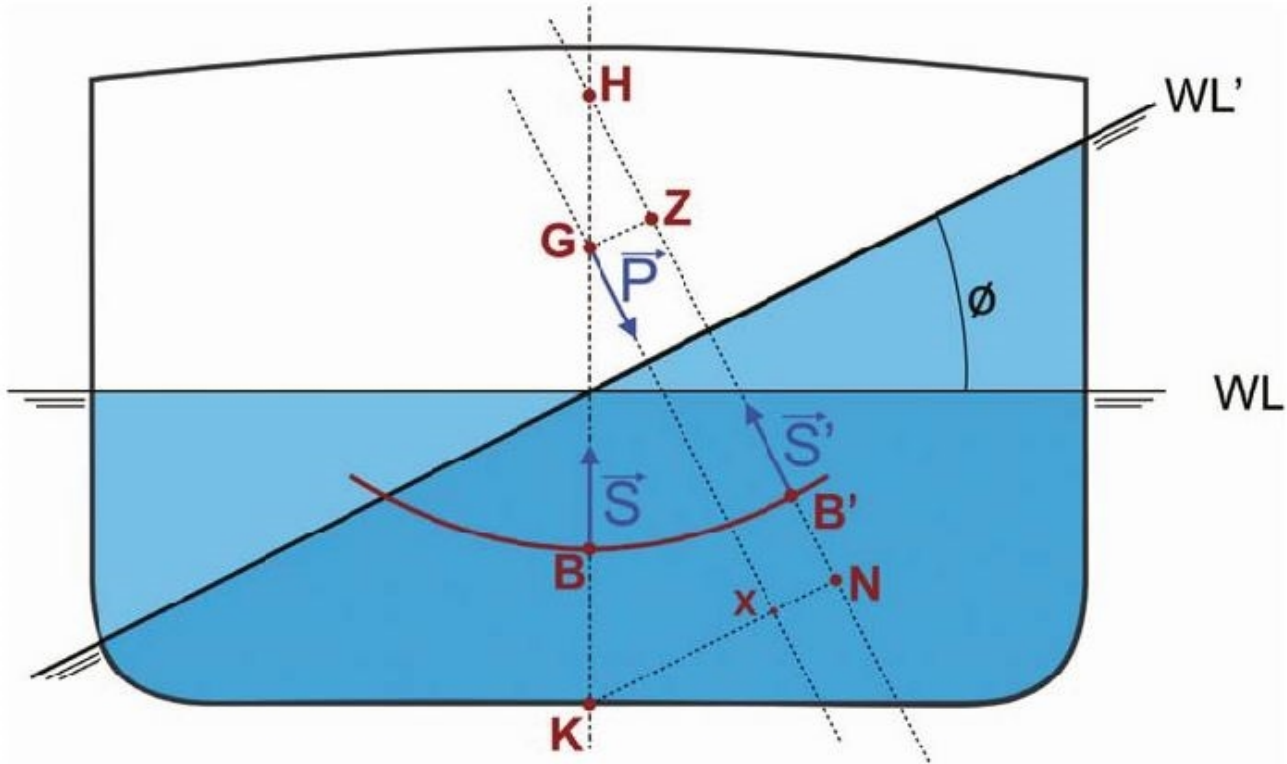
$$M_s = \Delta \cdot GZ$$

$$M_s = \Delta \cdot GH \sin \phi$$



Anche se nota la posizione di G, mancano i riferimenti per valutare la quota del generico prometacentro H. Quindi non è utilizzabile facilmente l'ultima relazione.

Condizione equilibrio stabile

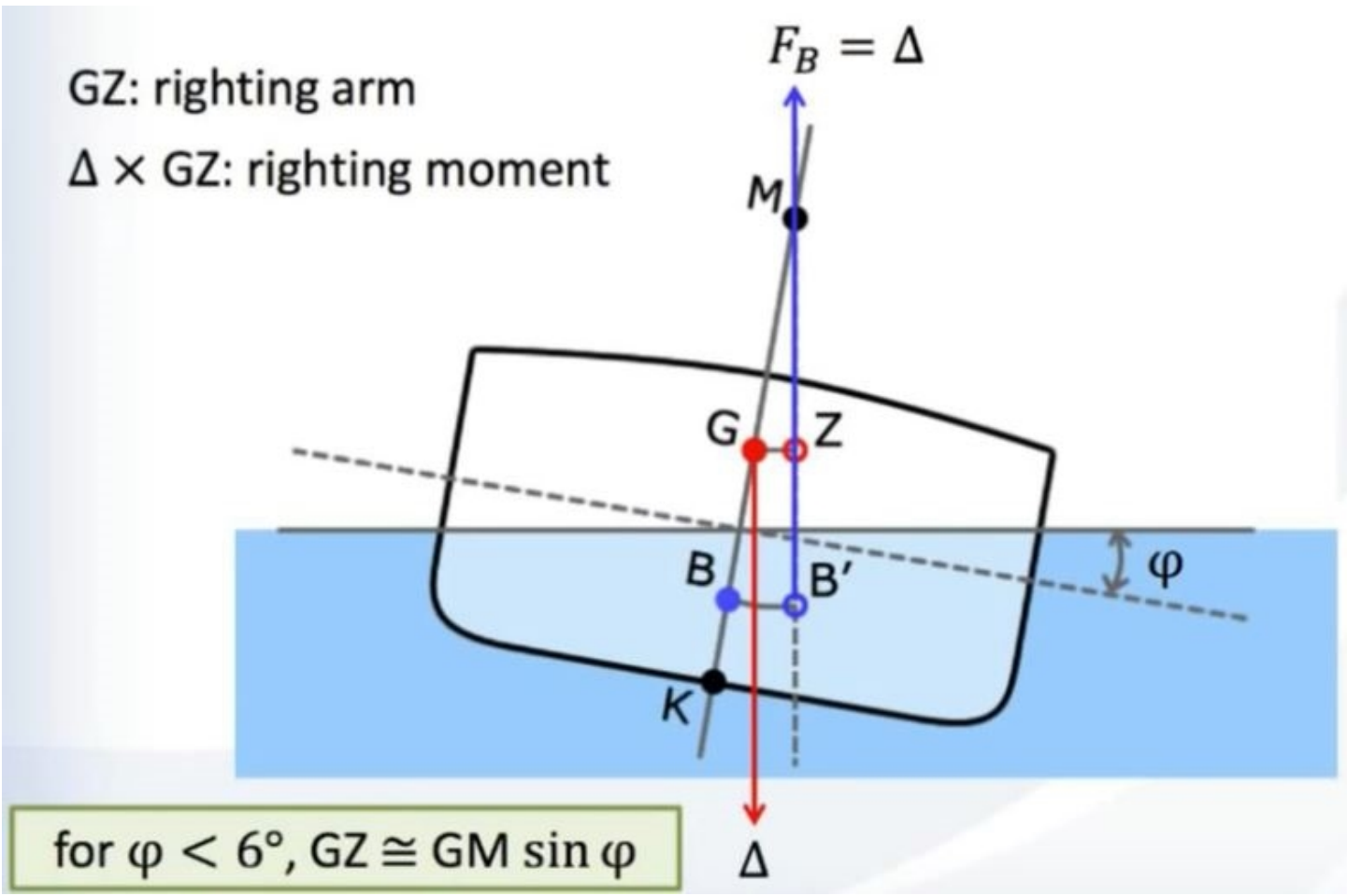


KN = braccio di carena

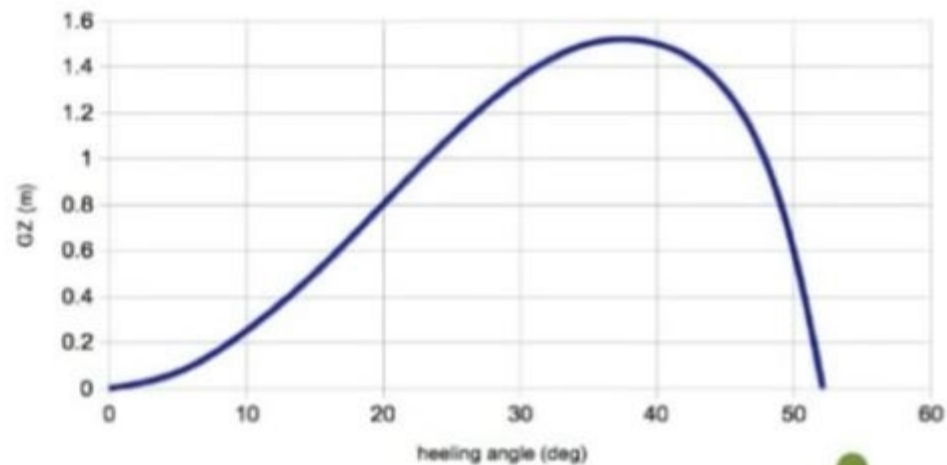
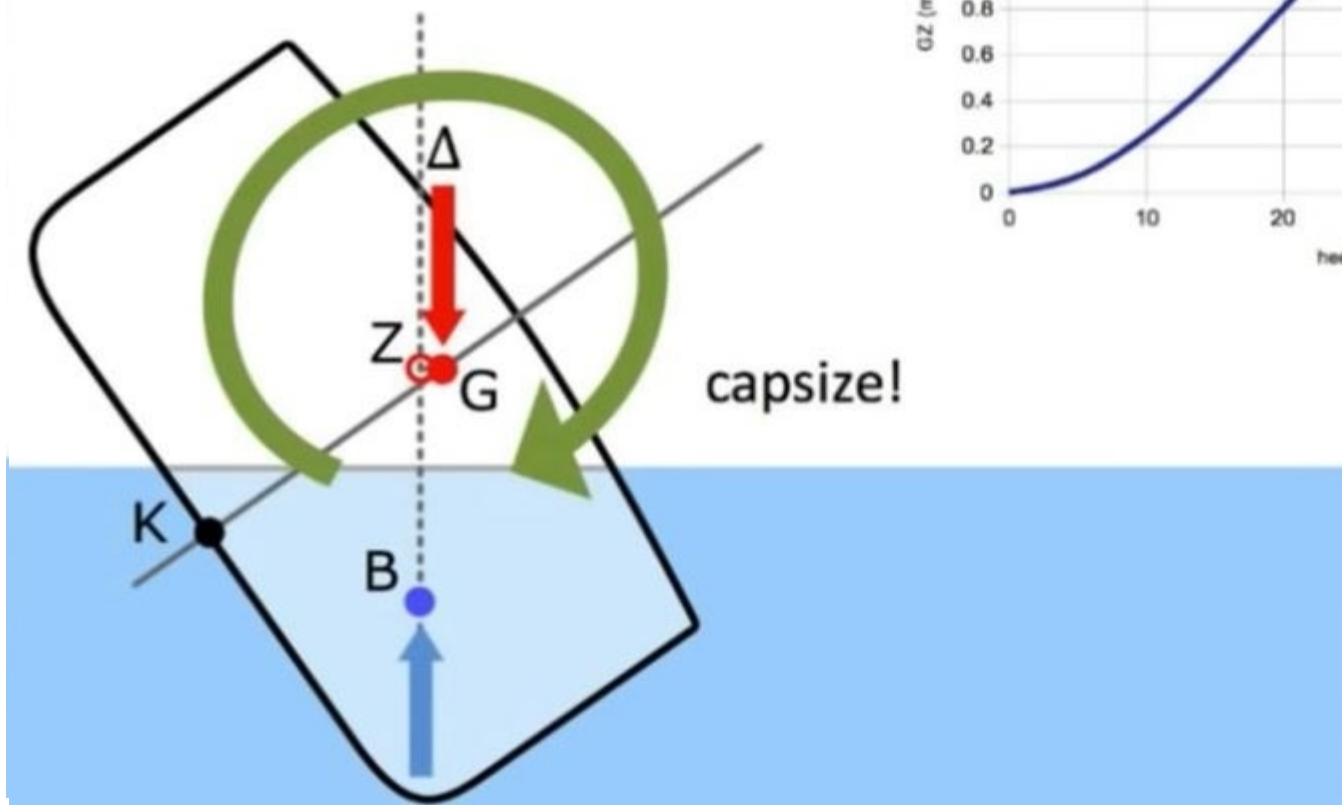
$$GZ = NX = KN - KX = KN - (KG \cdot \sin\phi)$$

$$M_S = \Delta \cdot (KN - KG \sin\phi)$$

Stabilità Trasversale Iniziale

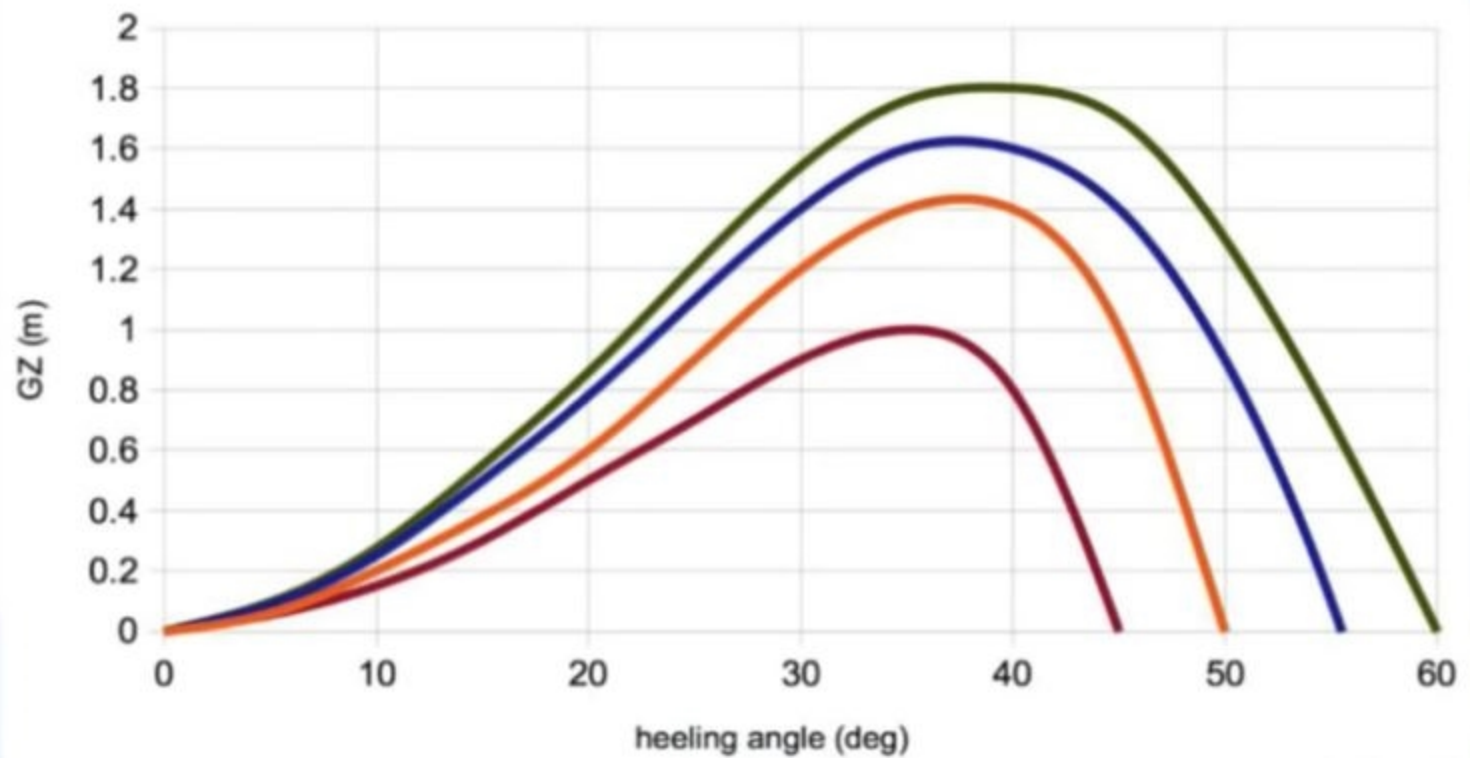


Grandi Angoli di Sbandamento



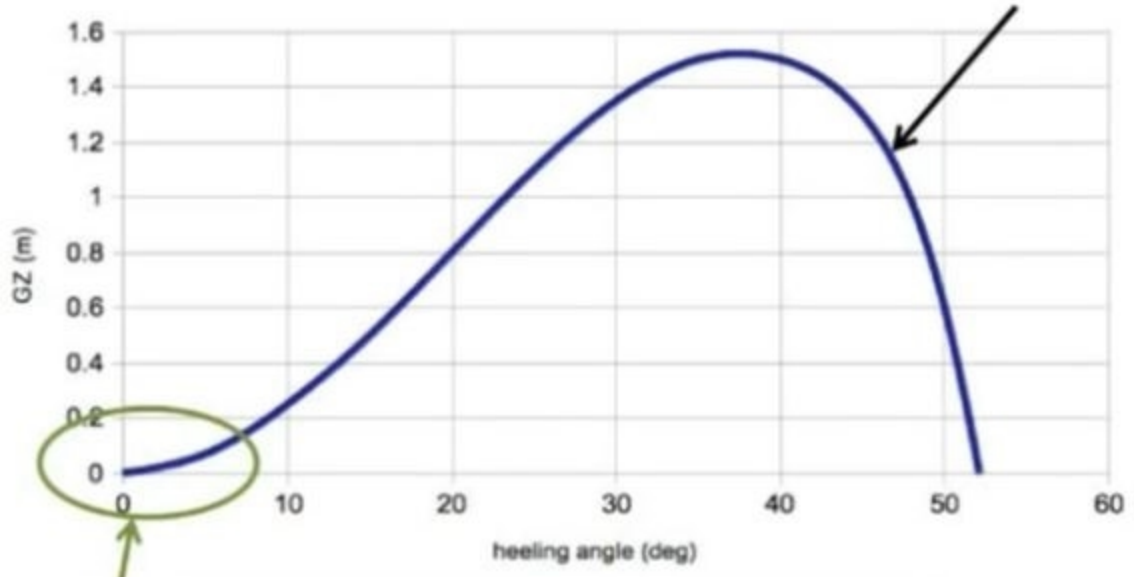
Curve del braccio di stabilità GZ

i software di idrostatica potranno calcolare le curve GZ per varie combinazioni di spostamento, pescaggio, assetto etc.



Influenza di GM iniziale

GM *iniziale* non ha niente a che vedere con il resto della curva GZ

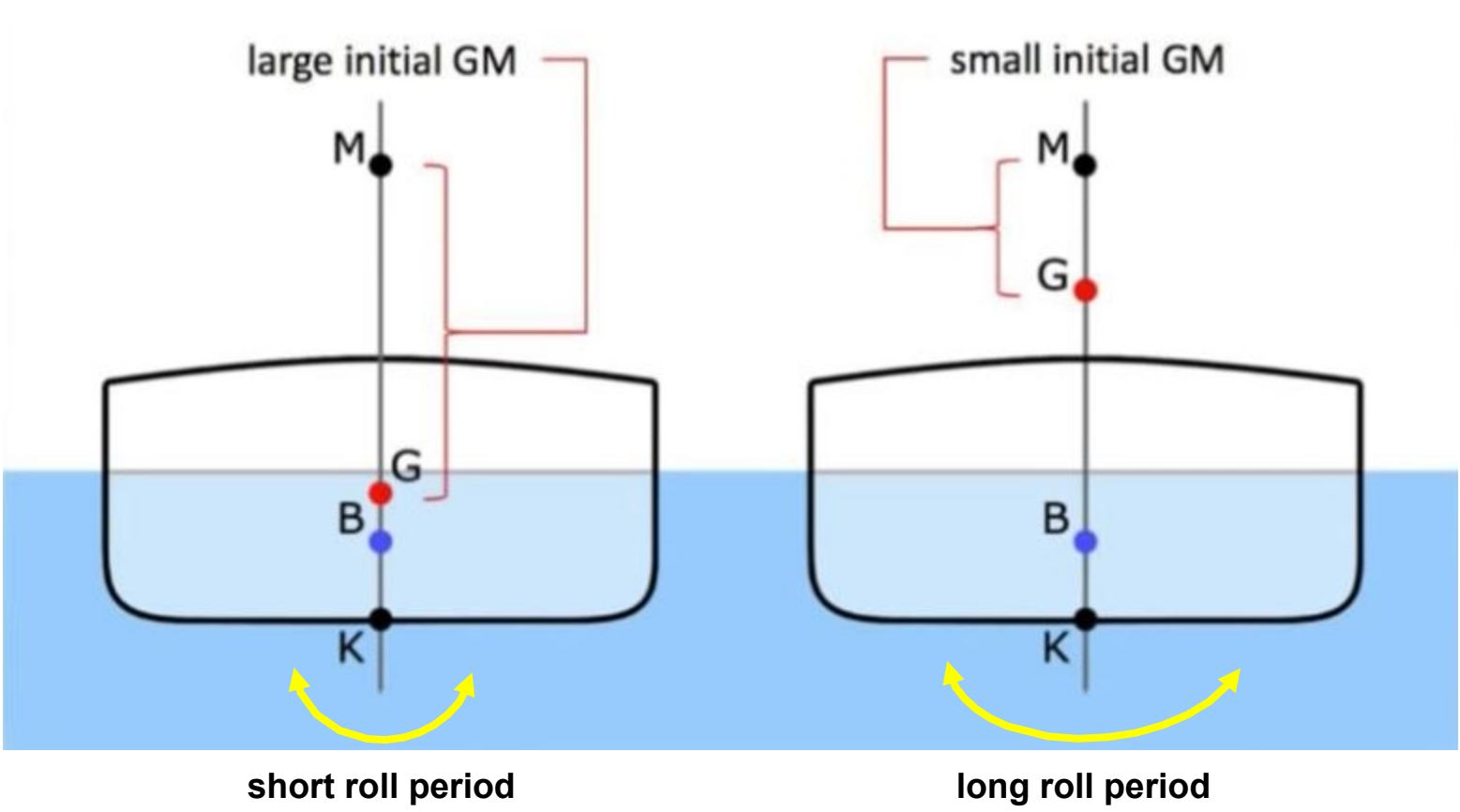


for $\varphi < 6^\circ$, $GZ \cong GM \sin \varphi$

Influenza di GM iniziale

Buono per la stabilità

Non Buono per la stabilità



Influenza di GM iniziale

12.9 NAVE DURA E NAVE CEDEVOLE

L'importanza dell'*altezza metacentrica* è resa evidente anche nella possibilità di avere una prima valutazione della qualità nautica collegata alla stabilità, cioè la *tenuta al mare*, che riguarda, com'è noto dal paragrafo 1.1, la dolcezza dei moti oscillatori.

Una nave molto stabile avrà un elevato momento di stabilità, quindi tenderà a rispondere prontamente a qualsiasi inclinazione, cercando di mantenere sempre i suoi ponti paralleli alla superficie dell'acqua; questo, in condizioni di mare ondoso, implicherà moti oscillatori intensi e repentini, il contrario di quanto accade ad una nave con un momento di stabilità esiguo, che risulterà più lenta nei movimenti.

Il momento di stabilità dipende direttamente dall'*altezza metacentrica*, per cui il suo valore può essere considerato indicativo della tipologia di moti oscillatori che subirà la nave:

- ✓ **Nave dura (*stiff ship*)**: è una nave con grande GM (oltre 2 m), quindi molto stabile e con conseguente scarsa tenuta al mare; ne sono tipici esempi le navi militari (figura 12.19).



Figura 12.19
Le navi militari sono tendenzialmente dure

Influenza di GM iniziale

- ✓ **Nave cedevole (*tender ship*):** è una nave con piccola GM (ad esempio 0,20 m), quindi meno stabile e con conseguente migliore tenuta al mare; ne sono tipici esempi le navi passeggeri (**figura 12.20**).

Come sempre occorre trovare un giusto compromesso tra stabilità e dolcezza ai moti oscillatori, garantendo opportuni margini di sicurezza ma evitando accelerazioni tali da provocare spostamenti del carico o ridurre eccessivamente il livello di comfort per gli eventuali passeggeri.

Valori tipici dell'altezza metacentrica si aggirano intorno al metro o poco più (ad esempio 1,5 m), ma per le navi passeggeri si può scendere fino a una sessantina di centimetri.



Figura 12.20

Le navi passeggeri sono tendenzialmente cedevoli



Ingavonamento (Loll)

Si è detto che l'altezza metacentrica fornisce informazioni limitate alle condizioni iniziali di stabilità, cioè solo per nave dritta o con inclinazioni assai ridotte.

Può accadere che una condizione di iniziale instabilità non si traduca in una situazione di rischio generalizzato: la nave può trovare una posizione di equilibrio stabile ad un certo angolo di sbandamento diverso da 0° .

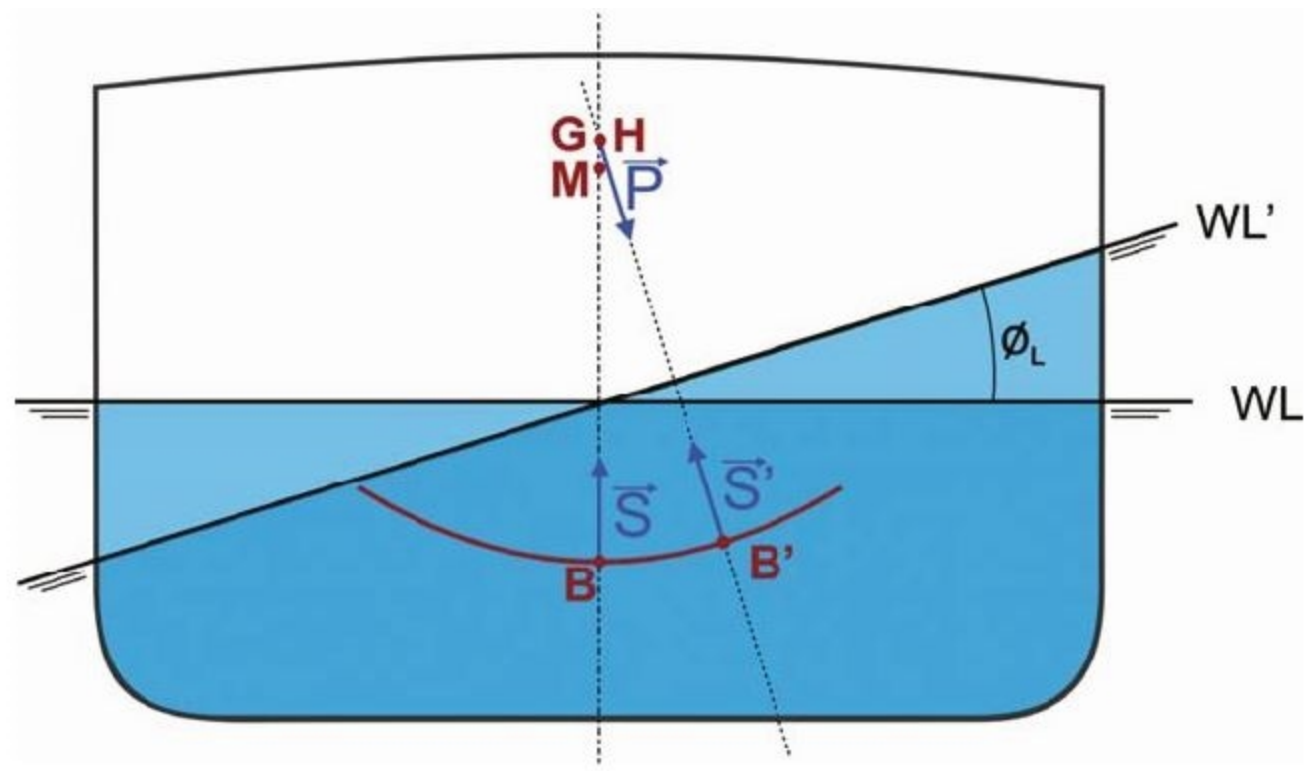
In tali condizioni si parla di **ingavonamento (loll)**, definito quindi come la condizione che assume una nave avente altezza metacentrica negativa, avente cioè baricentro G al di sopra del metacentro iniziale M

si è visto come all'aumentare dello sbandamento il raggio metacentrico aumenti e la sua intersezione con la verticale passante per il centro di carena iniziale, che abbiamo chiamato *prometacentro*, salga via via di quota; quando tale intersezione corrisponderà con il baricentro, cioè quando B si troverà allineato verticalmente con G, si avrà una condizione di equilibrio stabile e l'angolo di sbandamento a cui ciò avviene si chiama **angolo di ingavonamento (angle of loll)**.

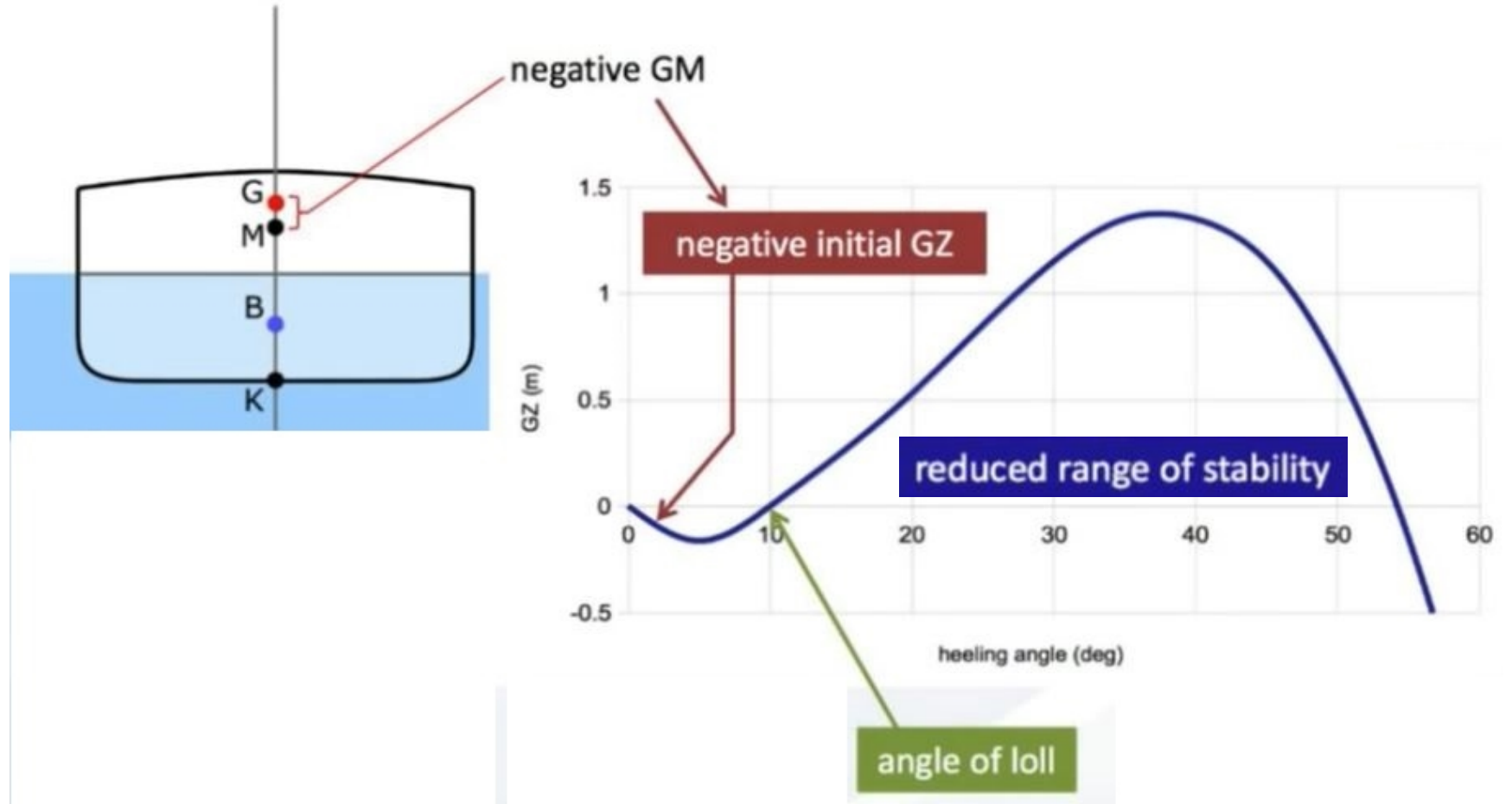
La nave ingavonata è di fatto una nave con una posizione di equilibrio stabile, che però non coincide con la giacitura dritta: al raggiungimento dell'angolo di ingavonamento si ha l'allineamento di spinta e forza peso

Il termine loll non è quasi mai usato da solo: si adopera per riferirsi all'angolo di equilibrio stabile raggiunto (angle of loll)

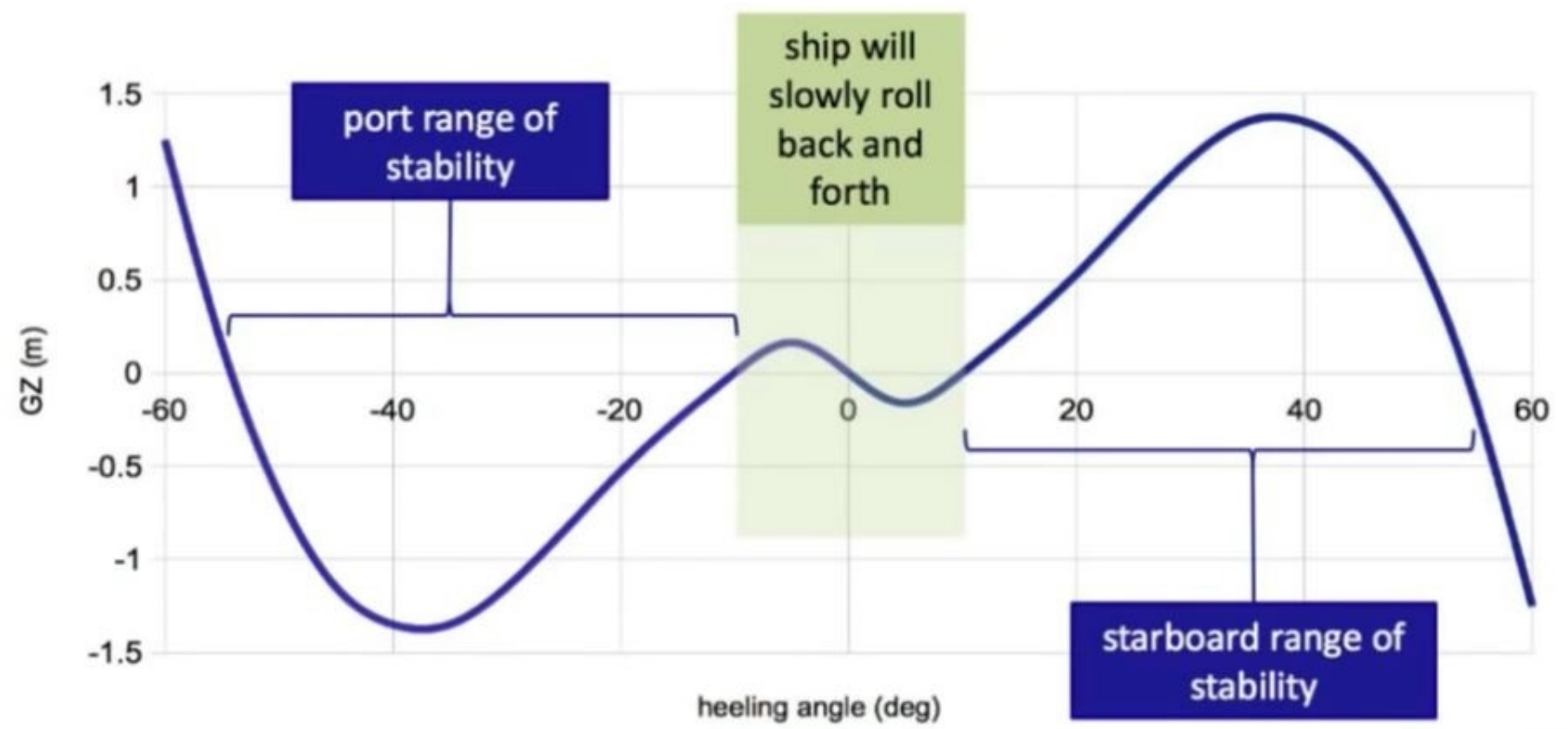
Influenza di GM Negativo: Ingavonamento



Influenza di GM Negativo: Ingavonamento



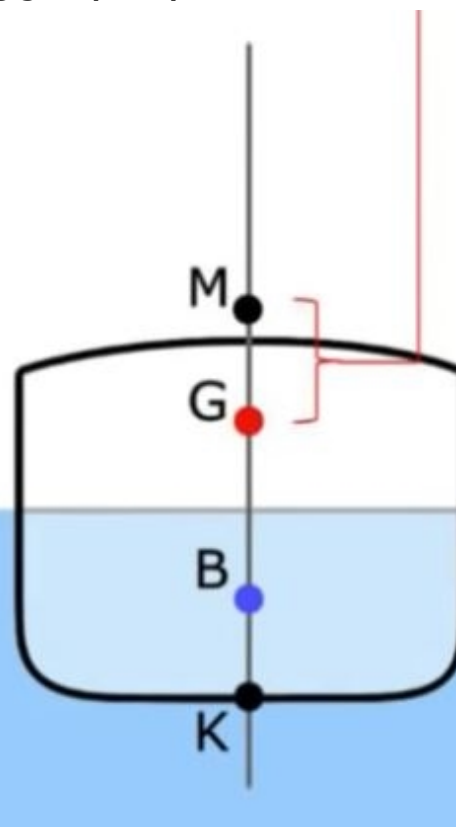
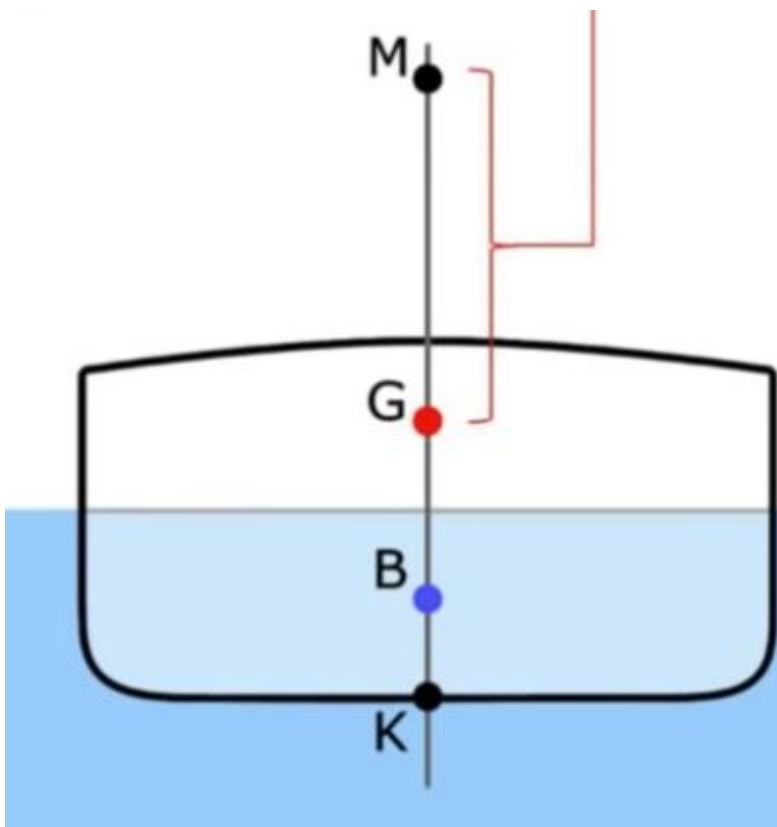
Influenza di GM Negativo: Ingavonamento



Influenza del Raggio sul GM Iniziale

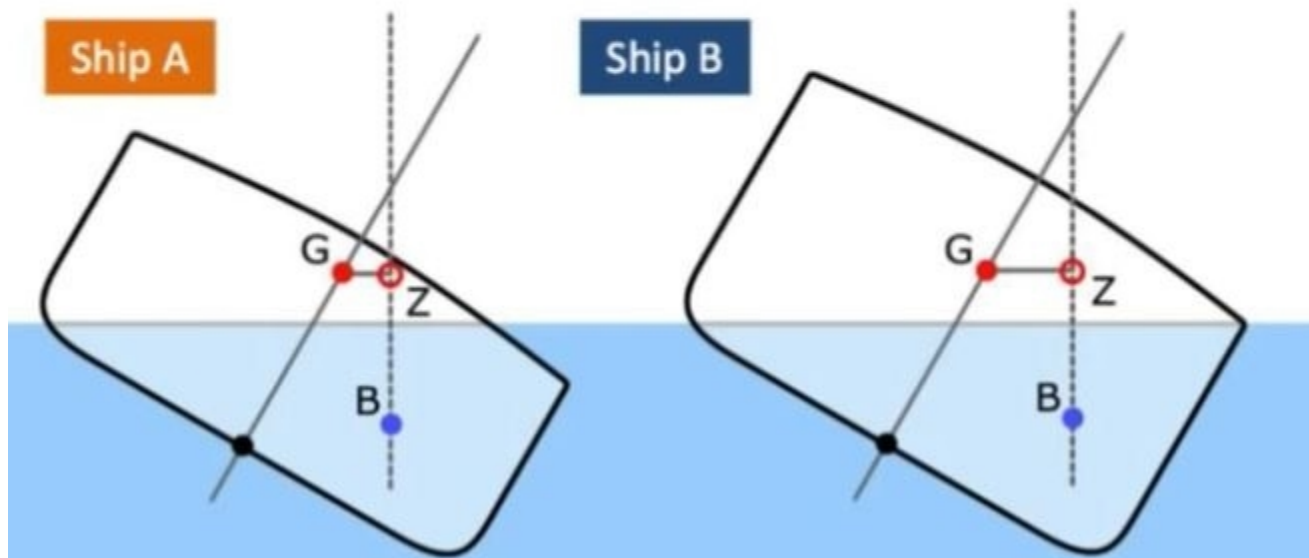
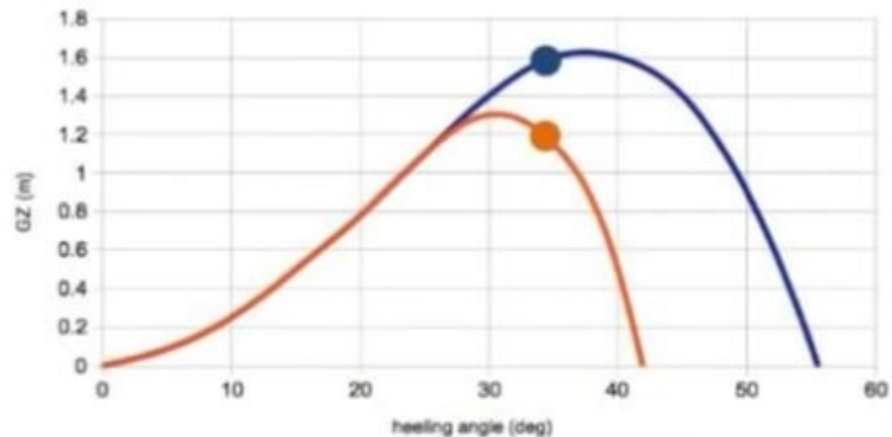
Raggio più grande = GM più grande

Raggio più piccolo = GM più piccolo

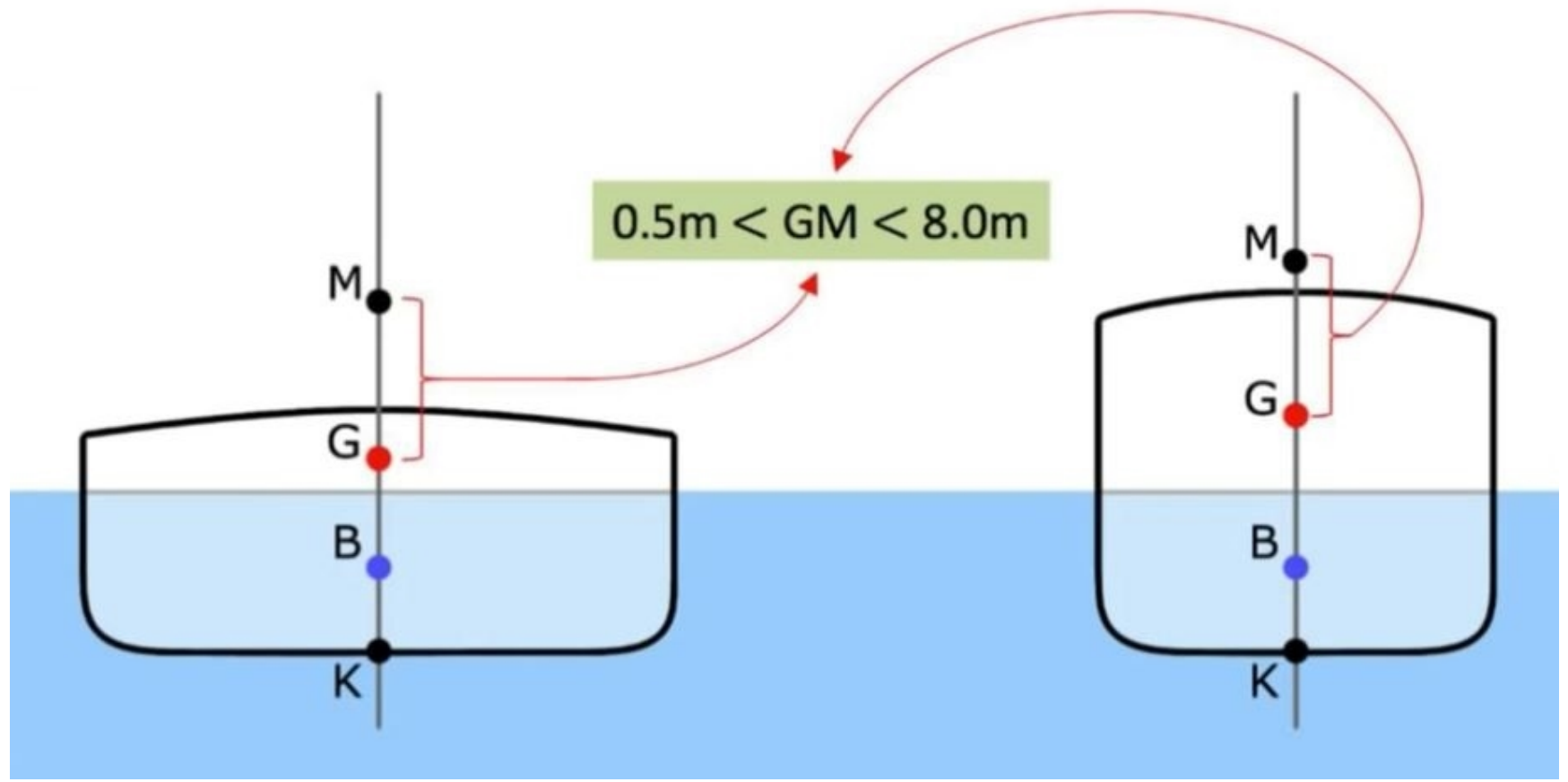


Influenza della Profondità sulla Stabilità

- 2 navi con la stessa larghezza(baglio) hanno lo stesso GM
- nave B più profonda della nave A



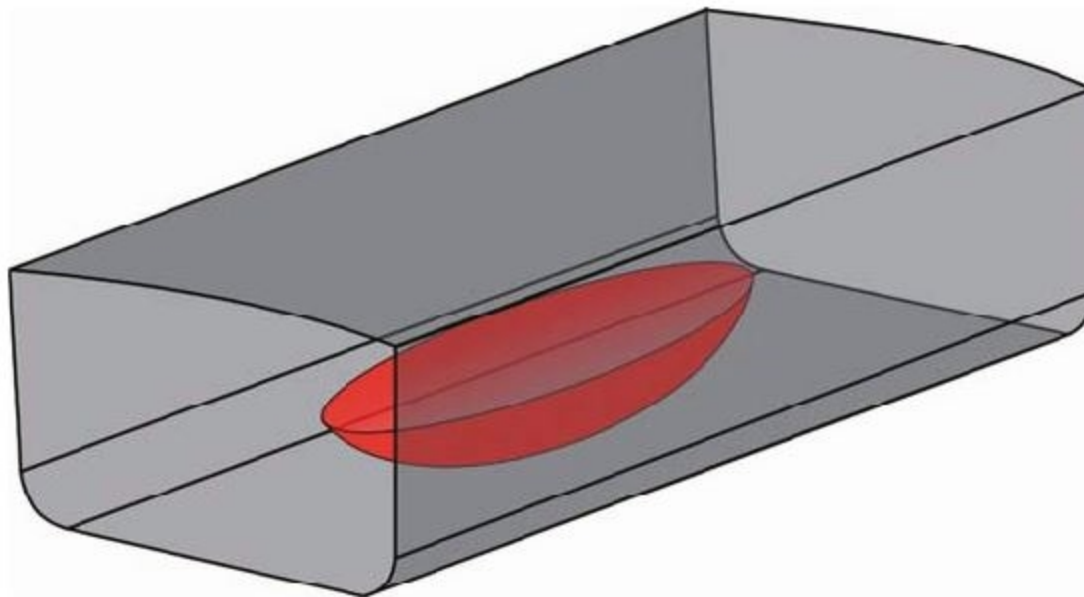
Considerazioni su raggio e profondità



Si definisce *asse d'inclinazione* la retta d'intersezione fra il piano di galleggiamento iniziale e quello successivo ad una inclinazione e la sua direzione è detta *direzione d'inclinazione*; piano d'inclinazione è invece ogni piano perpendicolare alla direzione d'inclinazione

Finora sono state rappresentate sempre inclinazioni con *direzione d'inclinazione* longitudinale (*sbandamenti*), rappresentabili quindi su un piano trasversale, ma in realtà una nave può inclinarsi con qualsiasi direzione, e questo significa che il centro di carena può occupare infiniti punti in uno spazio tridimensionale.

Si definisce *superficie dei centri di carena isocarenici* il luogo geometrico dei centri delle isocarene ottenute considerando tutte le possibili inclinazioni della nave ; il suo andamento dipende dalla forma dello scafo, ma in generale si tratta di un paraboloide convesso in ogni punto a cui la direzione della spinta idrostatica risulta essere sempre perpendicolare.



Per direzione d'inclinazione fissata, tale superficie diventa una curva, tendenzialmente non compresa nel piano d'inclinazione salvo che per direzione trasversale (inclinazioni longitudinali) a causa della simmetria della nave; si può ad ogni modo considerarne la proiezione sul piano d'inclinazione, in modo che anche la direzione della spinta idrostatica giaccia in tale piano

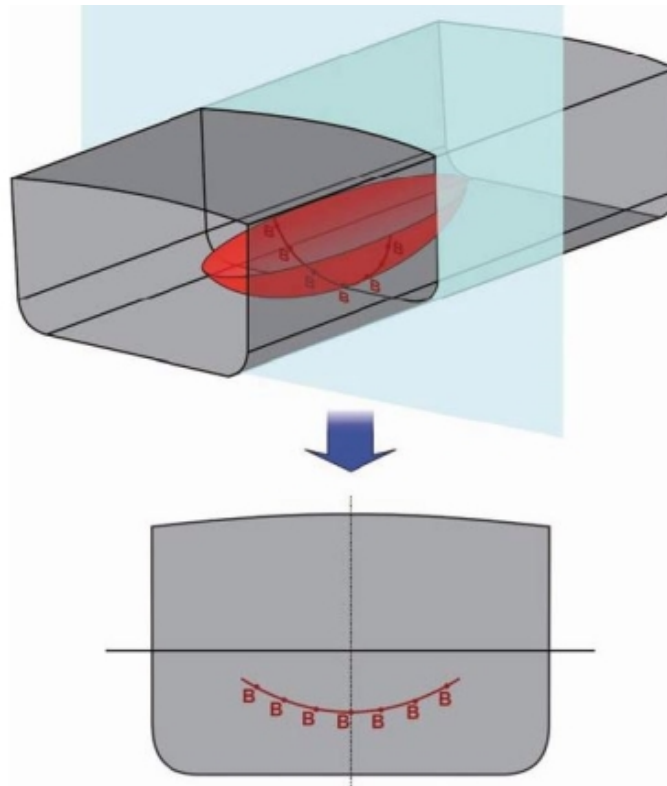
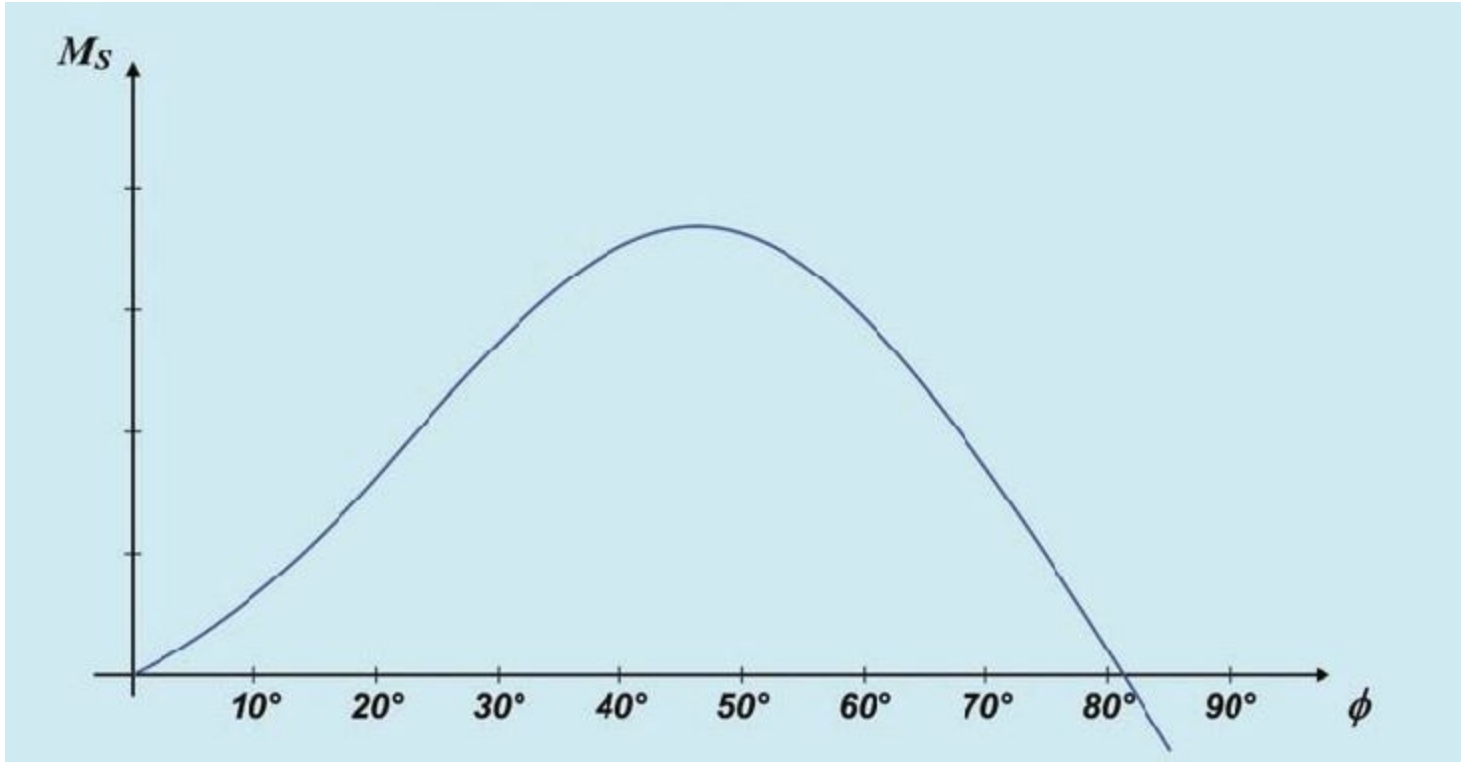


Diagramma di stabilità

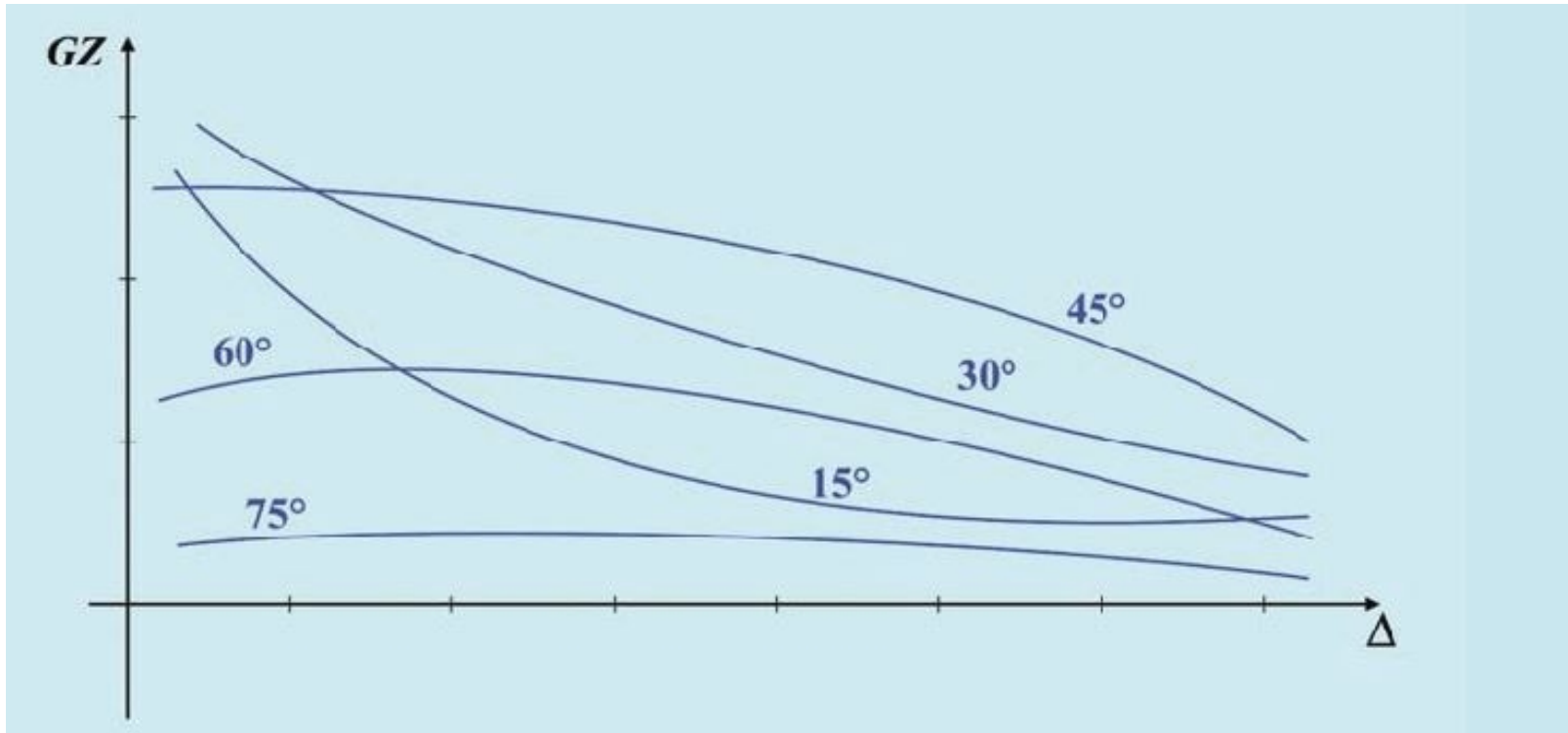


Il diagramma di stabilità (statical stability curve) è rappresentato in funzione dell'angolo di sbandamento.

Si può rappresentare considerando il momento statico raddrizzante M_S , oppure su scala GZ (vedi slide 34-35)



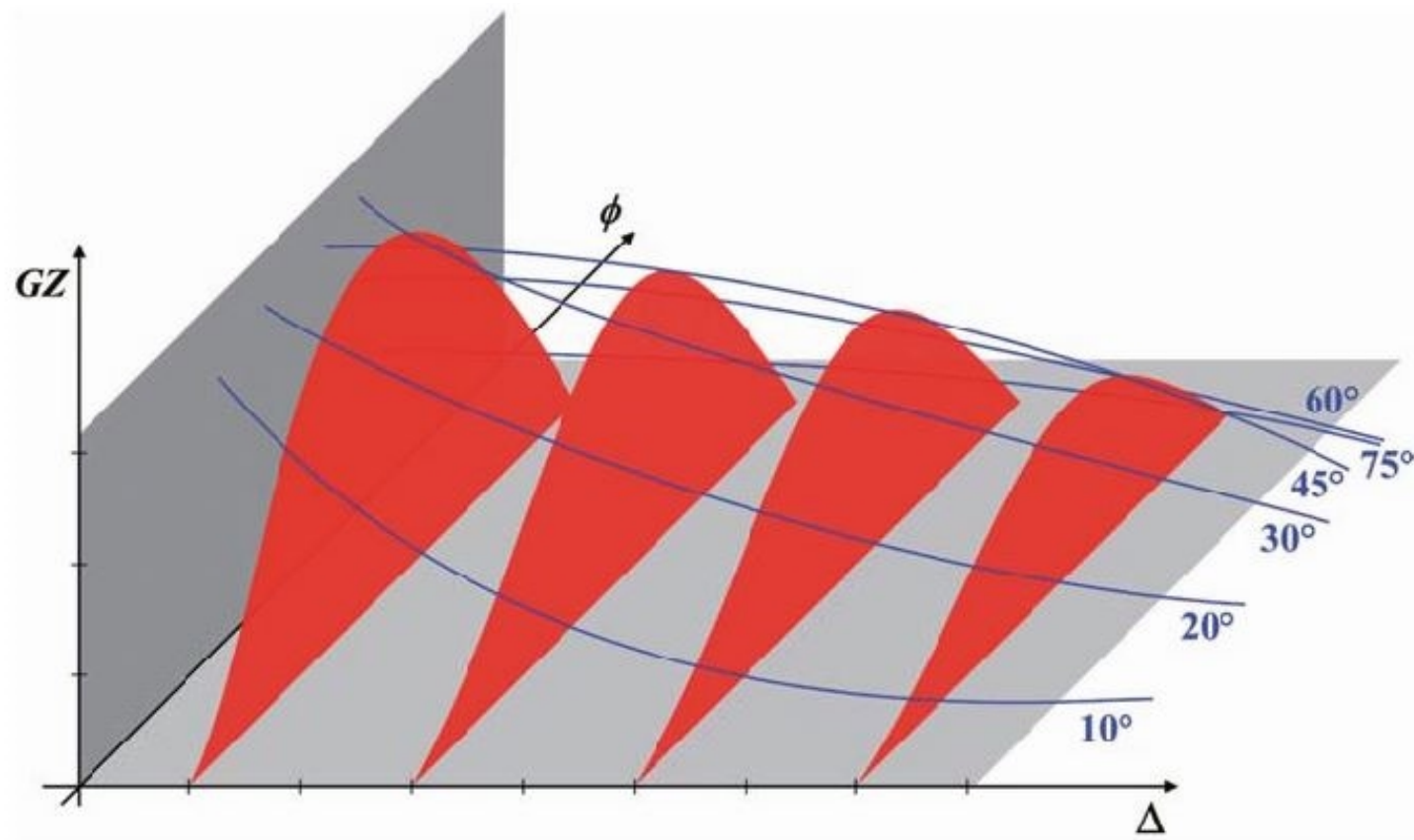
Cross Curves del braccio di stabilità GZ



Solitamente nelle cross curves si rappresentano gli angoli di sbandamento su intervalli di 15°

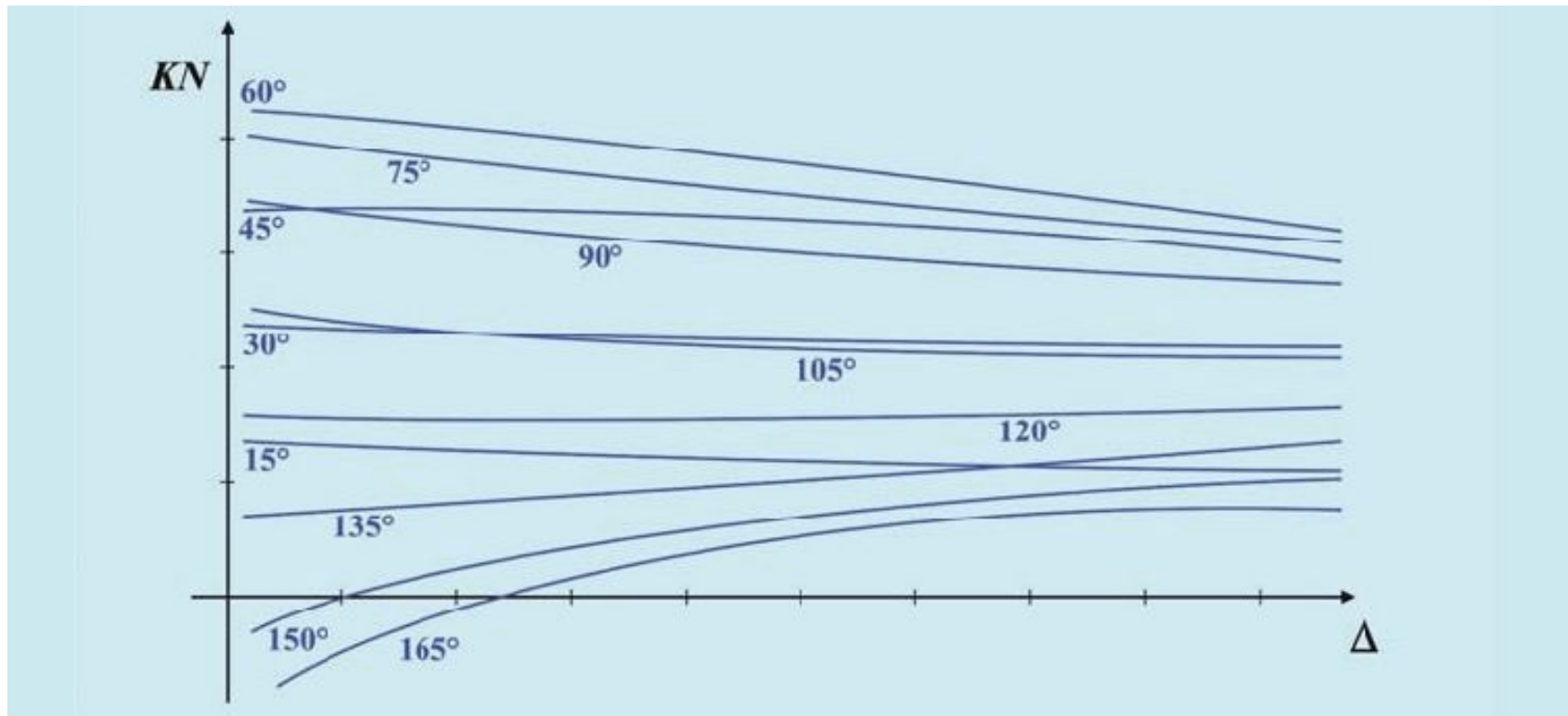
Le *cross curves* sono rappresentazioni del valore del braccio di stabilità di una nave per determinati valori dell'angolo di sbandamento al variare del dislocamento; si avrà così un certo numero di curve a seconda del numero di angoli di sbandamento che si vogliono rappresentare.

Cross Curves



Rappresentazione tridimensionale che mostra come vengono ottenute le *cross curves*

KN curves



lo stesso si può fare per i valori del *braccio di carena* KN , ottenendo dati ben più utili ai fini dello studio della stabilità perché riferiti ad una posizione fissa e solidale allo scafo come il punto K , indipendente quindi dalle condizioni di carico che influenzano la posizione di G ; in tal caso si parla di ***KN curves***.

Tali diagrammi vengono forniti dal cantiere, trattandosi di elementi geometrici della nave.

Curve idrostatiche (tavola delle carene dritte)

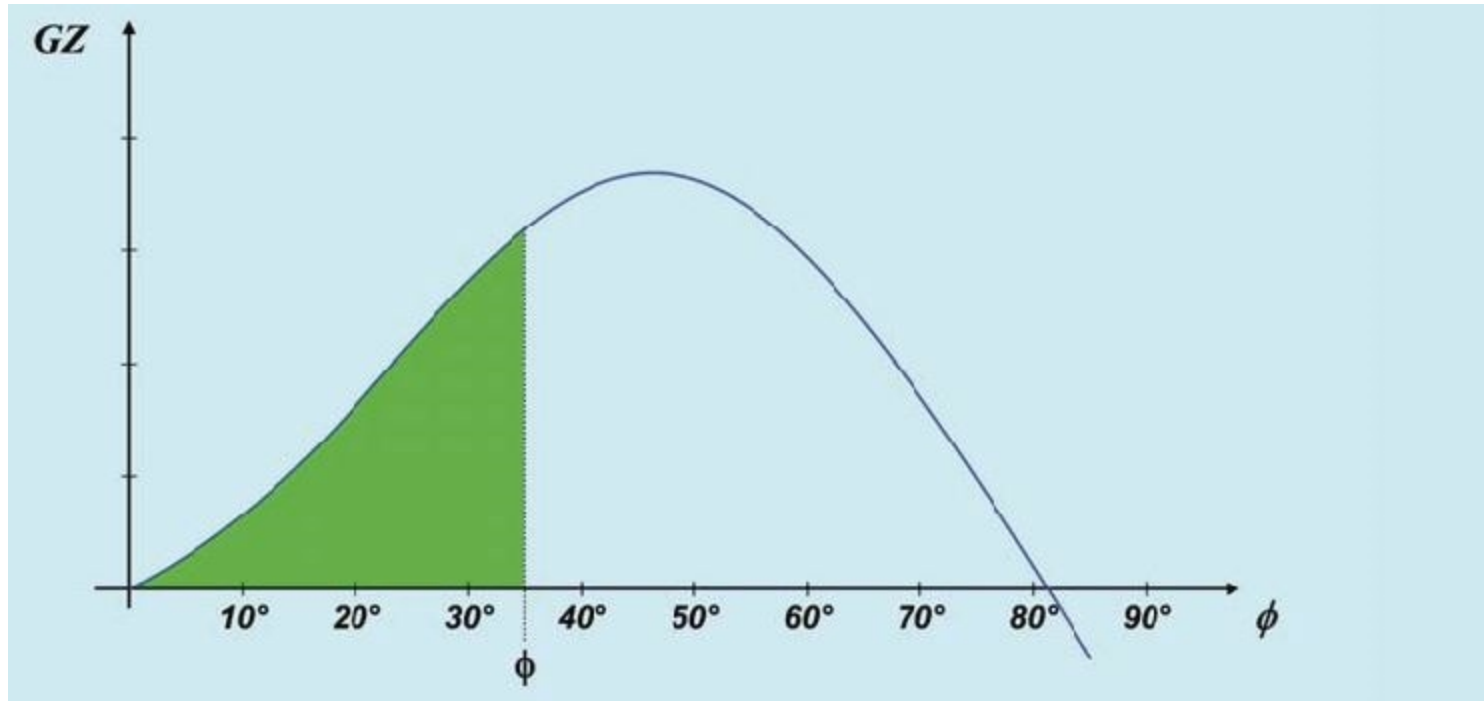
(Hydrostatic curves)

T	Δ	TPC	MCTC	X_b	X_{LC}	KM	KM _L
Draft	Displacement	Tons per centimeter	Moment to change trim 1cm	Longitudinal centre of buoyancy from AP	Longitudinal centre of floating from AP	Transversal metacentre above baseline	Longitudinal metacentre above baseline
[m]	[t]	[t]	[t-m]	[m]	[m]	[m]	[m]
3,00	3478	20,90	148,0	72,96	73,13	11,67	391,3
3,20	3897	21,09	150,7	72,97	73,14	11,23	369,2
3,40	6320	21,24	153,2	72,98	73,14	10,83	349,5
3,60	6746	21,38	155,2	72,99	73,14	10,48	332,5
3,80	7174	21,50	157,1	73,00	73,14	10,15	317,0
4,00	7605	21,62	158,9	73,01	73,13	9,86	303,3
4,20	8038	21,72	160,7	73,01	73,10	9,61	290,1
4,40	8473	21,82	162,4	73,02	73,06	9,39	278,4
4,60	8910	21,91	163,8	73,02	73,02	9,20	267,5
4,80	9348	21,99	165,4	73,02	72,97	9,03	257,3
5,00	9788	22,08	166,8	73,02	72,92	8,89	247,7
5,20	10230	22,16	168,2	73,01	72,85	8,77	238,8
5,40	10674	22,24	169,6	73,00	72,76	8,66	230,9
5,60	11120	22,32	171,0	72,99	72,67	8,58	223,3
5,80	11569	22,39	172,4	72,97	72,59	8,50	216,4
6,00	12019	22,47	174,0	72,96	72,48	8,44	210,6
6,20	12472	22,56	175,7	72,94	72,33	8,38	205,0
6,40	12927	22,66	177,5	72,92	72,18	8,34	200,0
6,60	13383	22,75	179,3	72,89	72,00	8,30	195,8
6,80	13840	22,85	181,4	72,86	71,81	8,28	191,6
7,00	14299	22,95	183,8	72,82	71,61	8,26	188,0
7,20	14761	23,07	186,4	72,78	71,39	8,24	184,7
7,40	15226	23,19	189,0	72,74	71,19	8,24	181,7
7,60	15693	23,29	191,8	72,69	70,98	8,24	178,9
7,80	16161	23,41	194,6	72,64	70,78	8,24	176,6
8,00	16633	23,54	197,4	72,59	70,59	8,25	174,1
8,20	17116	23,66	200,2	72,53	70,41	8,27	172,0
8,40	17598	23,78	203,1	72,47	70,28	8,29	170,2
8,60	18081	23,90	206,0	72,41	70,07	8,32	168,2
8,80	18565	24,02	209,0	72,35	69,91	8,35	166,3
9,00	19051	24,14	211,8	72,29	69,77	8,39	164,6
9,20	19537	24,26	214,5	72,22	69,61	8,43	162,9
9,40	20024	24,36	217,4	72,16	69,48	8,47	161,1
9,60	20514	24,46	220,0	72,09	69,35	8,51	159,2
9,80	21006	24,57	222,6	72,03	69,24	8,56	157,4
10,00	21498	24,69	225,0	71,96	69,13	8,62	155,8

Stabilità Dinamica e Riserva di Stabilità

La **stabilità dinamica** (*dynamical stability*) al generico angolo di sbandamento \varnothing si definisce come il lavoro necessario per portare la nave dalla posizione dritta di equilibrio stabile alla posizione sbandata dell'angolo \varnothing ; esso si può intendere come il lavoro resistente che devono vincere le forze esterne per provocare la rotazione descritta, quindi si può considerare svolto dal momento di stabilità M_S

Stabilità Dinamica e Riserva di Stabilità



La stabilità dinamica a un generico angolo di sbandamento ϕ è uguale all'area racchiusa tra la curva dei bracci raddrizzanti e l'asse delle ascisse, considerata fino a tale angolo ϕ , moltiplicata per il dislocamento

Stabilità Dinamica e Riserva di Stabilità

Stabilità dinamica e riserva di stabilità sono la stessa cosa, ma vengono semplicemente «pensate» in senso opposto: la prima è il lavoro necessario per passare da posizione dritta a posizione inclinata, la seconda per passare da posizione inclinata a posizione dritta

Si può invertire il ragionamento considerando anche il lavoro necessario per riportare la nave in posizione dritta una volta cessata la causa esterna; esso si definisce **riserva di stabilità** (*reserve of stability/reserve dynamical stability*) e sarà svolto direttamente dal momento di stabilità M_s , per cui è intuitivo comprendere come abbia entità esattamente coincidente con la stabilità dinamica.

Si parlerà di **riserva di stabilità totale** (*total reserve of stability*) quando si considera il lavoro necessario per portare la nave in posizione dritta a partire dall'angolo di capovolgimento, ed è rappresentato quindi dall'intera area sottesa dal diagramma di stabilità (figura 13.11).

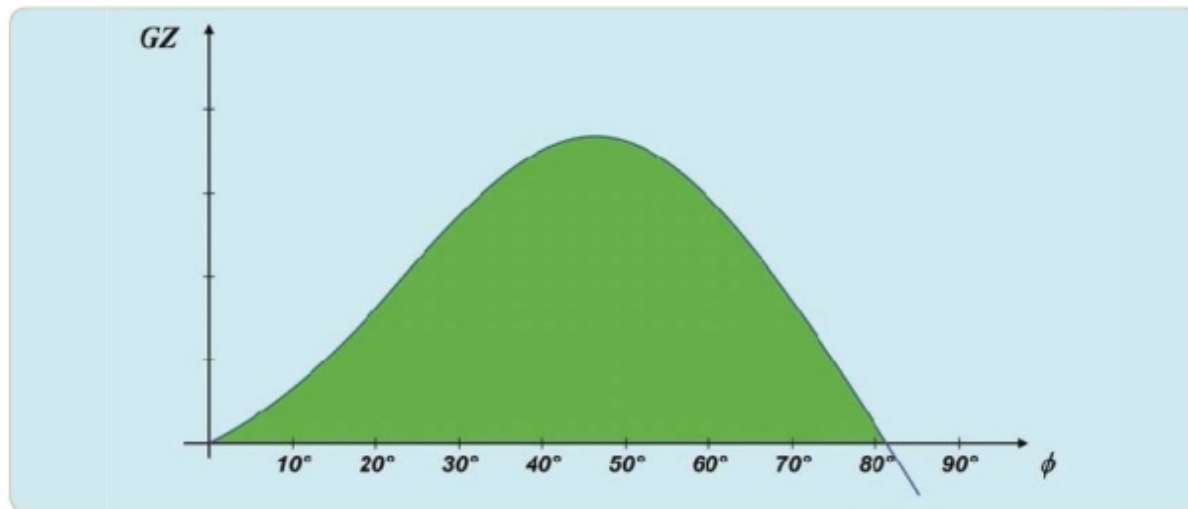
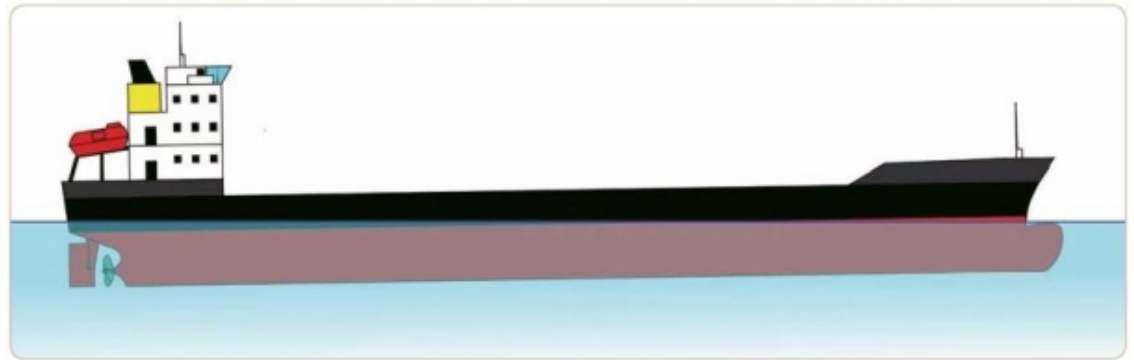


Figura 13.11

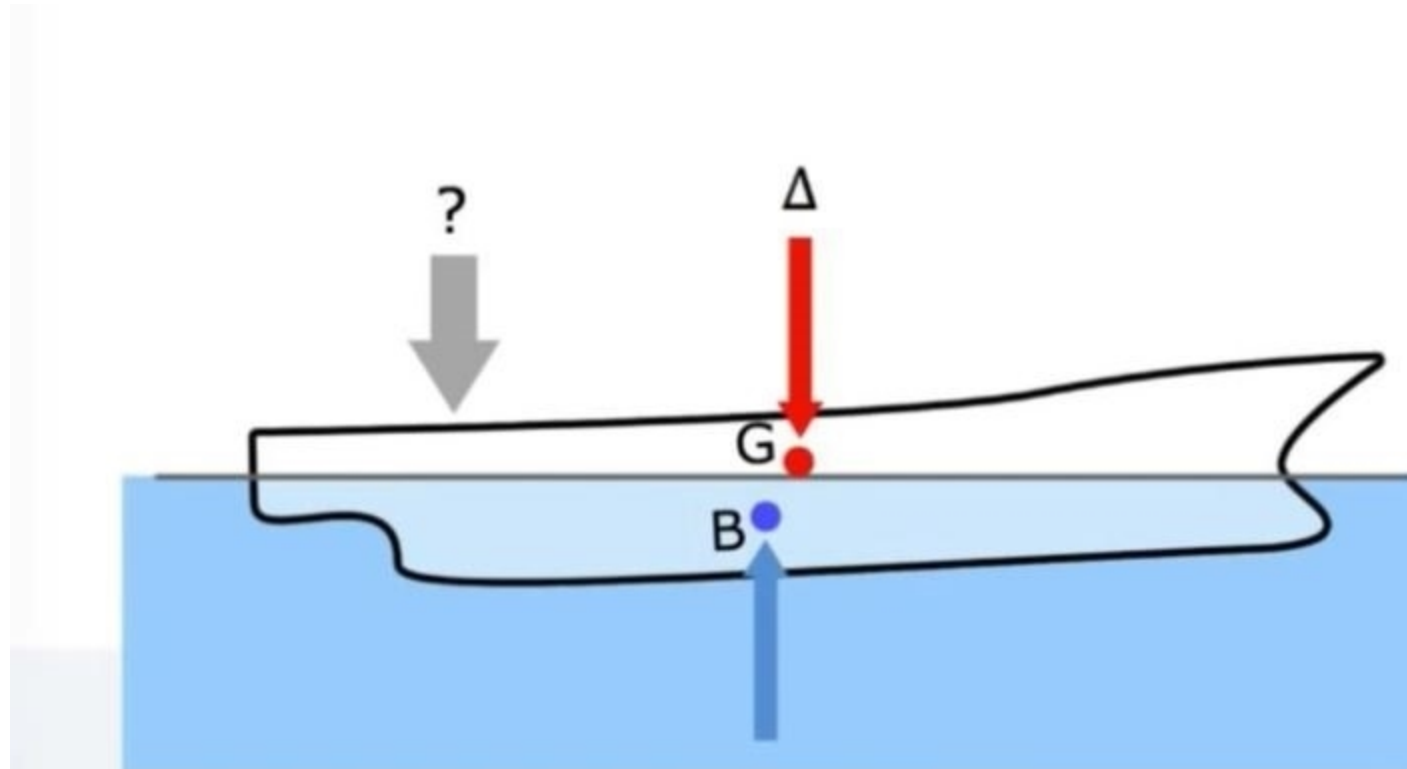
Rappresentazione della riserva di stabilità totale come area sottesa dal diagramma di stabilità (in verde)



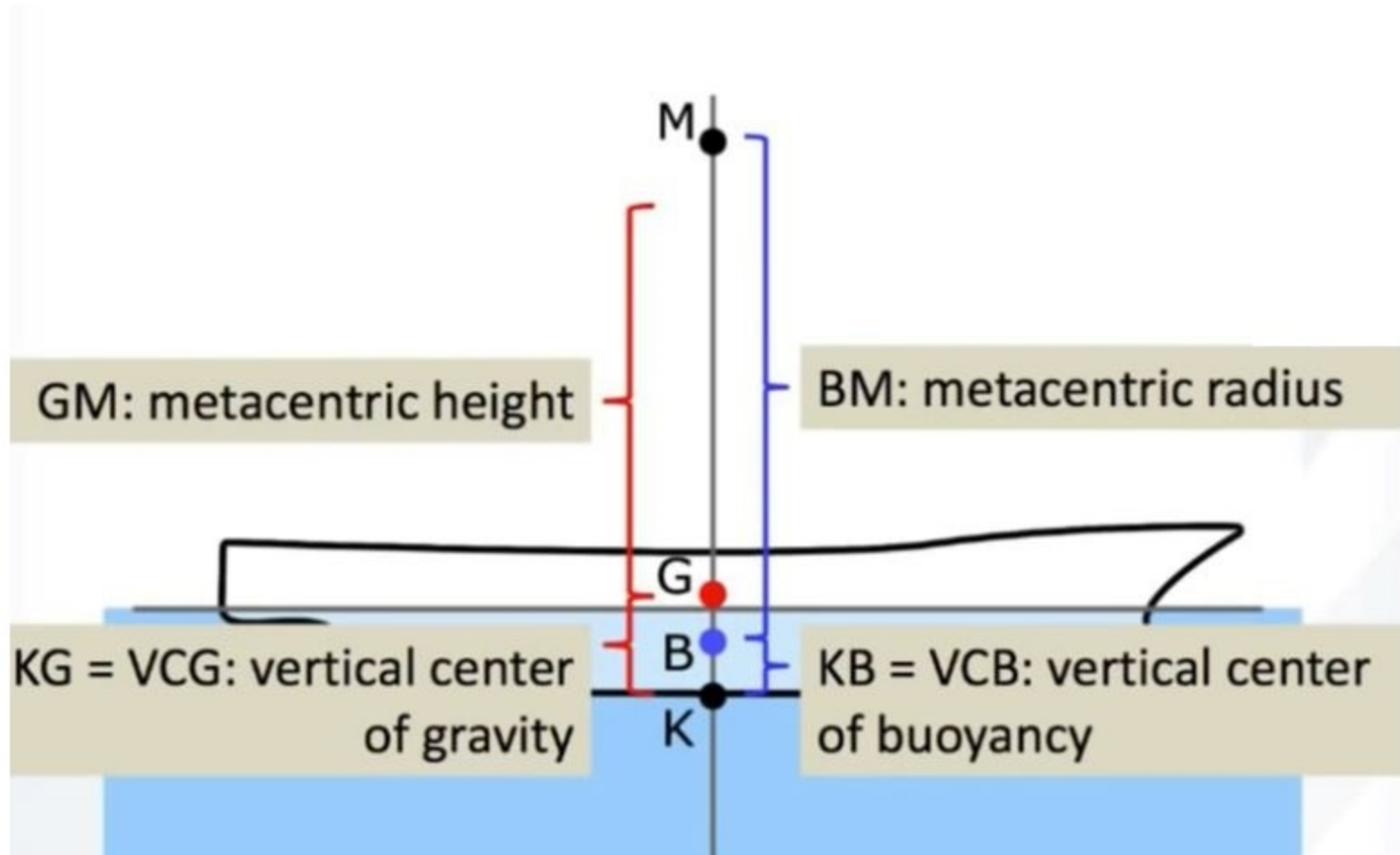
Stabilità Statica Longitudinale

Stabilità longitudinale

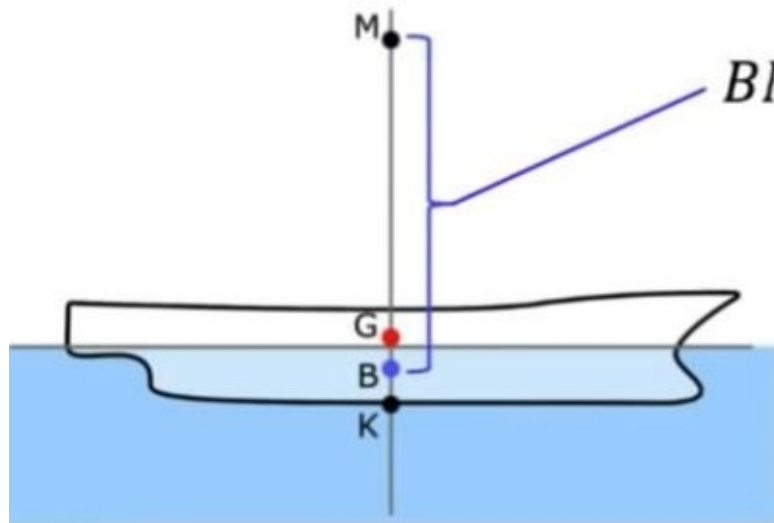
cosa accade un volta che la nave è fuori assetto, e quindi con un angolo di pitch?



KB e BM longitudinali



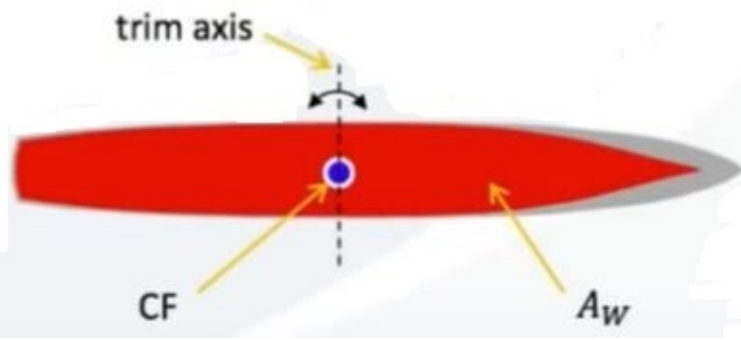
Calcolo del raggio metacentrico BM



$$BM = \frac{I_L}{\nabla}$$



I_L : momento d'inerzia della sup. di galleggiamento rispetto l'asse trasversale.

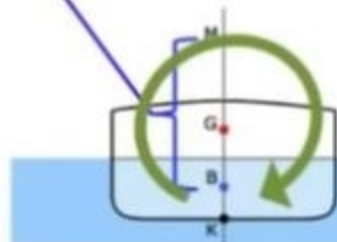


Stabilità trasv. vs stabilità long.

$$BM = \frac{I}{\nabla}$$

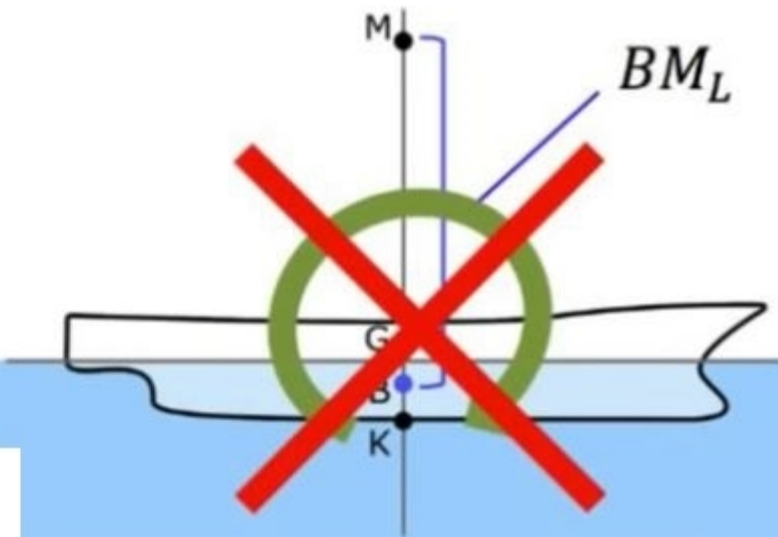
$$I_L \gg I_T \longrightarrow BM_L \gg BM_T$$

BM_T



Il capovolgimento è veramente pericoloso in questo caso

BM_L

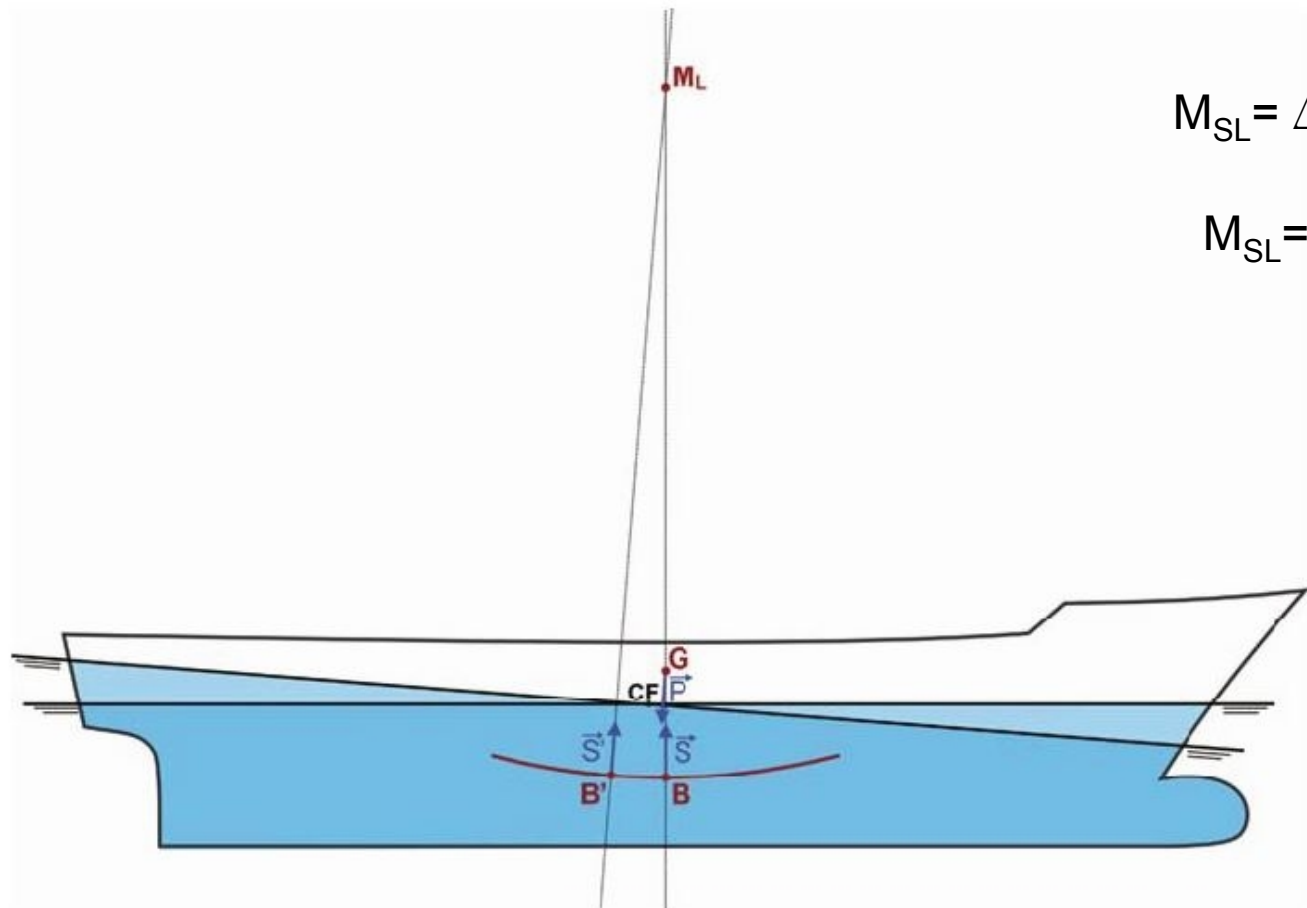


Capovolgimento poco probabile in questo caso, quasi impossibile

Stabilità longitudinale

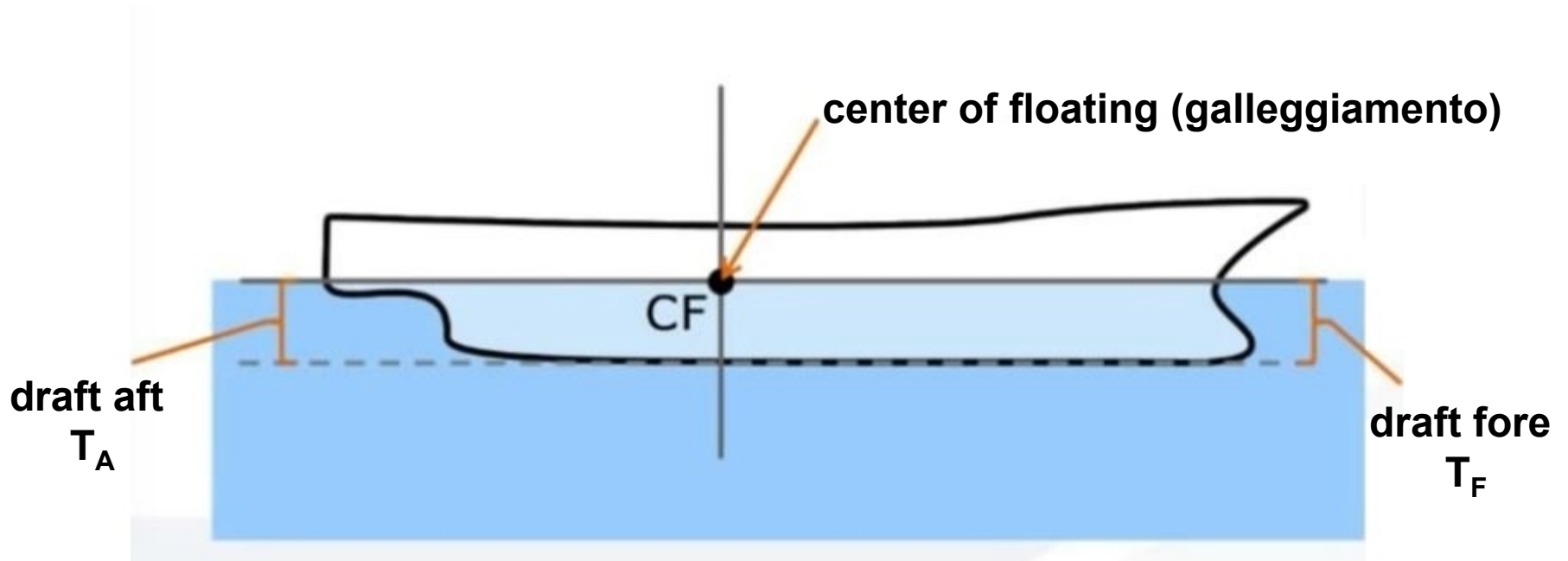
$$M_{SL} = \Delta \cdot GM_L \cdot \sin \theta$$

$$M_{SL} = \Delta \cdot BM_L \cdot \sin \theta$$



Definizione di assetto (trim)

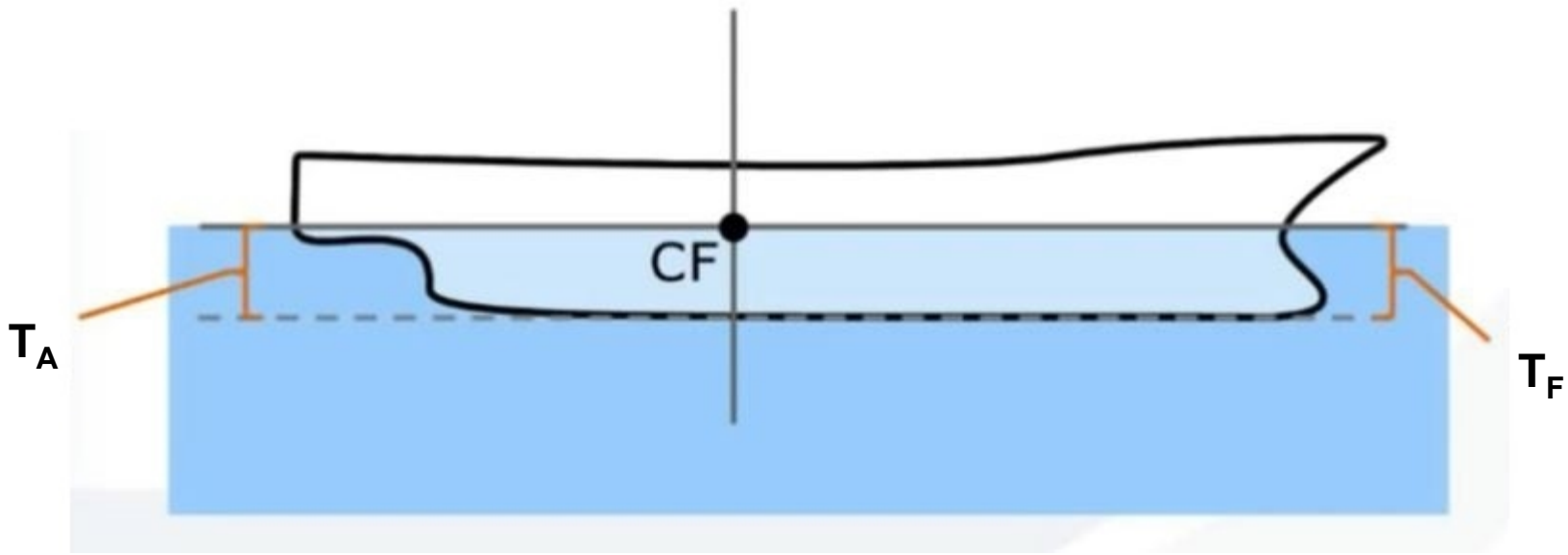
Trim = *differenza tra l' immersione addietro e quella avanti*



Assetto Zero

Conosciuto anche come
even keel

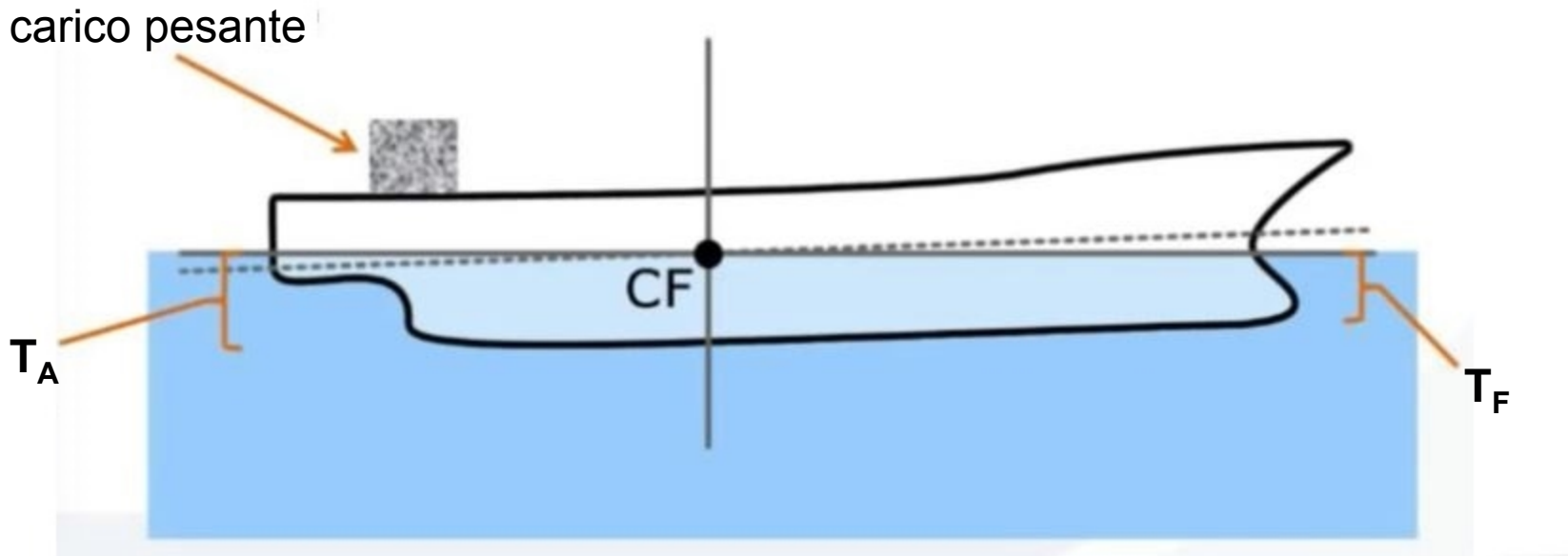
$$T_A = T_F$$
$$t = T_A - T_F = 0$$



Assetto di poppa

Spesso definito come
assetto positivo $t > 0$

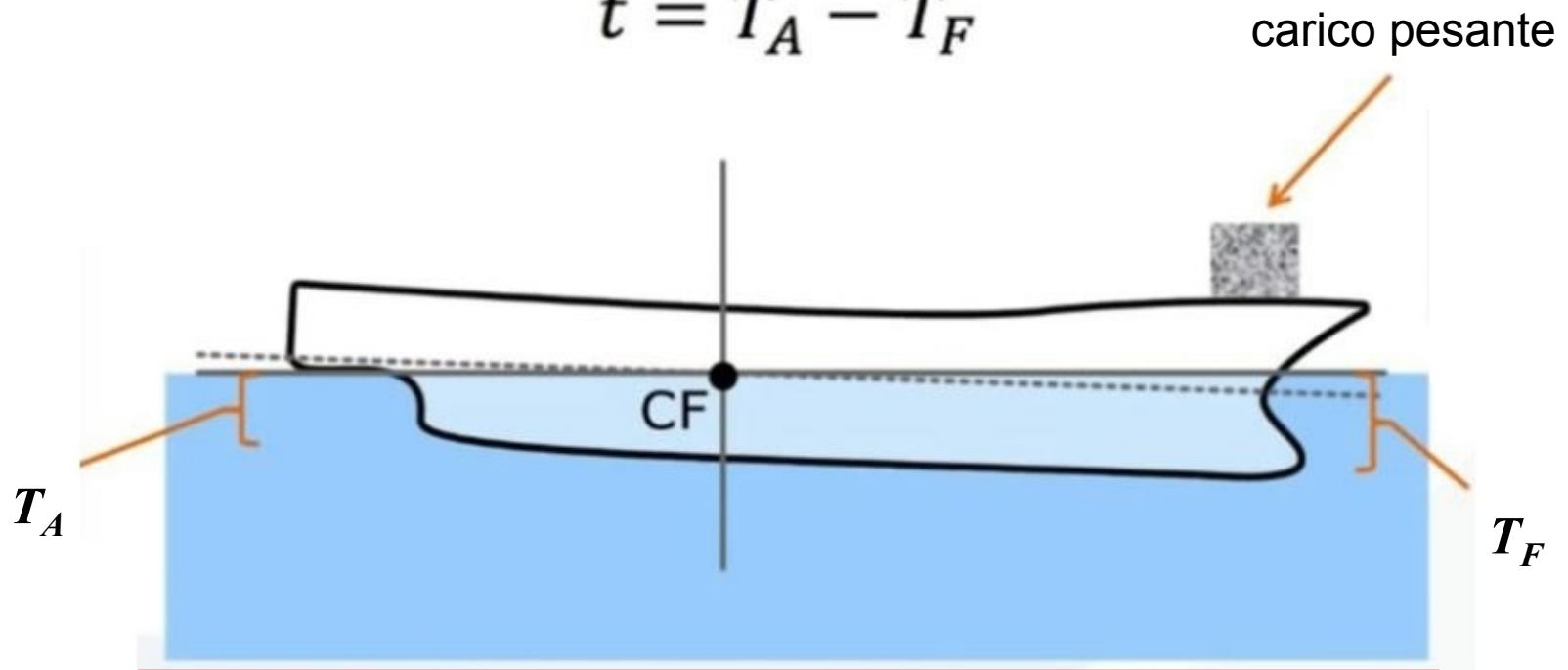
$$T_A > T_F$$
$$t = T_A - T_F$$



Assetto di prua

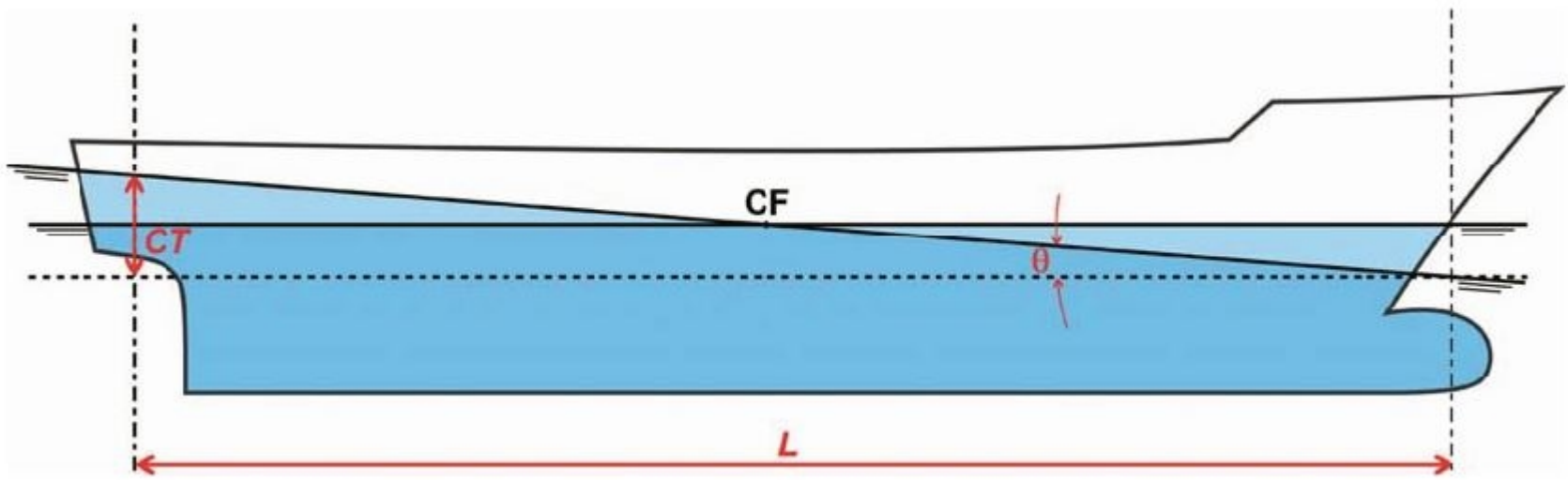
Spesso definito come **assetto negativo** $t < 0$

$$T_A < T_F$$
$$t = T_A - T_F$$



Questa non è la condizione ideale

Variazione di assetto



CT= Change of Trim (*variazione di assetto*)

$$CT = TRIM' - TRIM \quad \rightarrow \quad CT = \delta T_A + \delta T_F$$

$$CT = L \cdot \tan \theta$$

Variazione di assetto

Un'inclinazione longitudinale può essere causata dagli elementi naturali, ma spesso si è abituati a valutare gli effetti di una variazione dell'entità e della posizione dei pesi a bordo; in tal caso sarà lo spostamento del baricentro G, e quindi del punto di applicazione della forza peso, a causare la coppia inclinante, che si annullerà quando l'inclinazione della nave avrà raggiunto un valore tale da far tornare le due forze ad agire sulla stessa direzione.

Per raddrizzare la nave occorrerà applicare un momento uguale e contrario alla coppia descritta, che avrà braccio pari alla distanza tra la verticale passante per G e quella passante per B, è

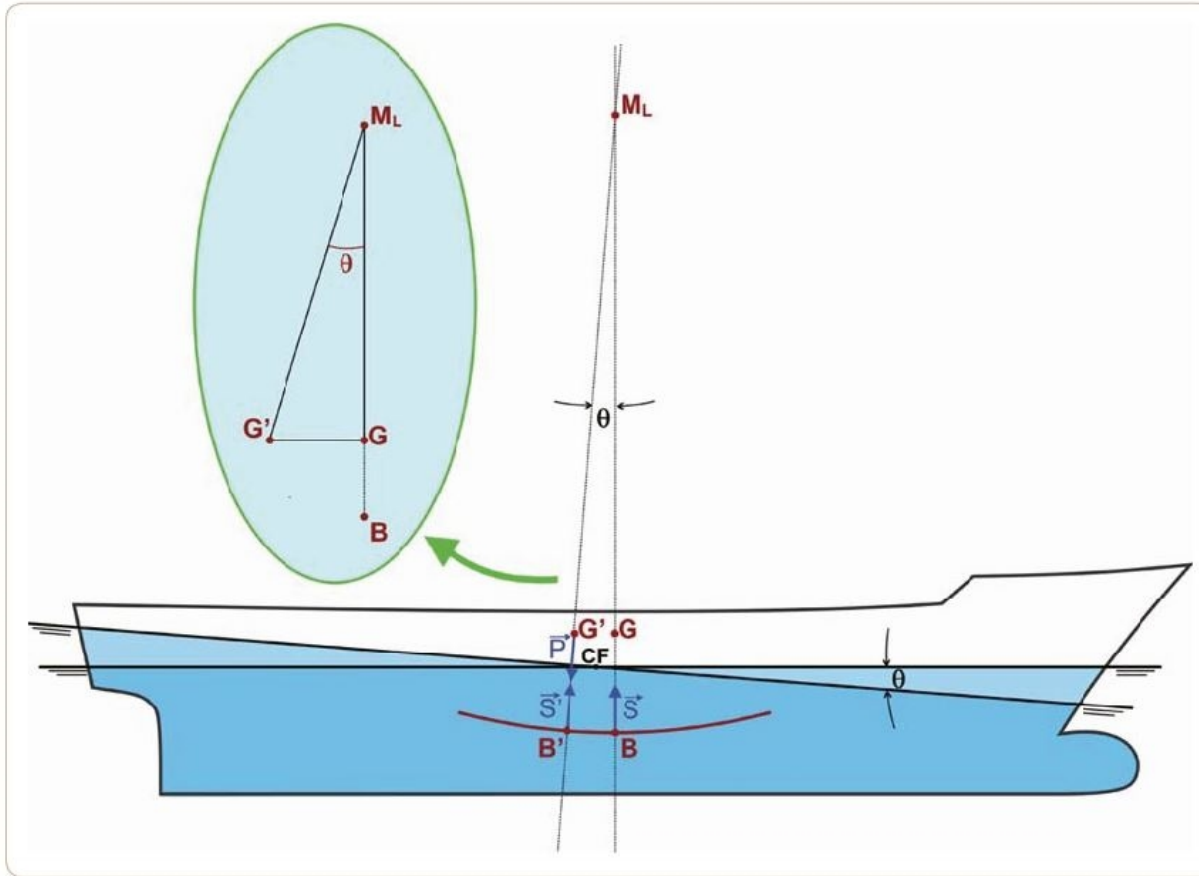
il momento d'assetto M_x :

$$M_x = \Delta \cdot (X_B - X_G)$$

Momento Unitario d'assetto MCTC

- Si definisce **momento unitario d'assetto MCTC** (**moment to change trim 1cm**) il momento inclinante la nave longitudinalmente che provoca una variazione di assetto di 1cm.

Momento Unitario d'assetto MCTC



$$\tan \theta = \frac{(X_B - X_{G'})}{GM_L}$$

ricordando :

$$CT = L \cdot \tan \theta$$

possiamo scrivere :

$$CT = L \cdot \frac{(X_B - X_{G'})}{GM_L}$$

$$CT = L \cdot \frac{\Delta \cdot (X_B - X_{G'})}{\Delta \cdot GM_L}$$

ricordando :

$$M_X = \Delta \cdot (X_B - X_{G'})$$

$$\frac{1}{100} = L \cdot \frac{MCTC}{\Delta \cdot GM_L}$$

assumendo $M_x = MCTC$ se $CT = 1$ cm

Momento Unitario d'assetto MCTC

$$MCTC = \frac{\Delta \cdot GM_L}{100 \cdot L}$$

BG è talmente esiguo rispetto a BM_L

$$MCTC = \frac{\Delta \cdot BM_L}{100 \cdot L}$$

inoltre $CT = L \cdot \frac{\Delta \cdot (X_B - X_{G'})}{\Delta \cdot GM_L}$

che diventa

$$CT = \frac{\Delta \cdot (X_B - X_{G'})}{100 \cdot MCTC} \quad [m]$$

$$CT = \frac{M_X}{MCTC} \quad [cm]$$

Relazione tra momento di assetto e
variazione di assetto

Effetti dell'assetto

- ✓ L'assetto dipende da T_A e T_B secondo dove è posizionato LCF
- ✓ L'assetto influenza tutte le caratteristiche idrostatiche (dislocamento, LCG,LCF, etc...)
- ✓ Questi effetti si riferiscono al calcolo dei pesi e dei centri della nave

Bibliografia (libri/dispense/e-book)/Videografia

- Riccardo Antola “Fondamenti di Costruzione e Gestione della Nave” 1 – Simone PER LA SCUOLA
- Paolo Di Candia “Appunti di SCIENZA DELLA NAVIGAZIONE E TECNOLOGIE NAVALI 2-II”
- N.E.E.C. Naval Engineering Education Center – Educational Short Course Series