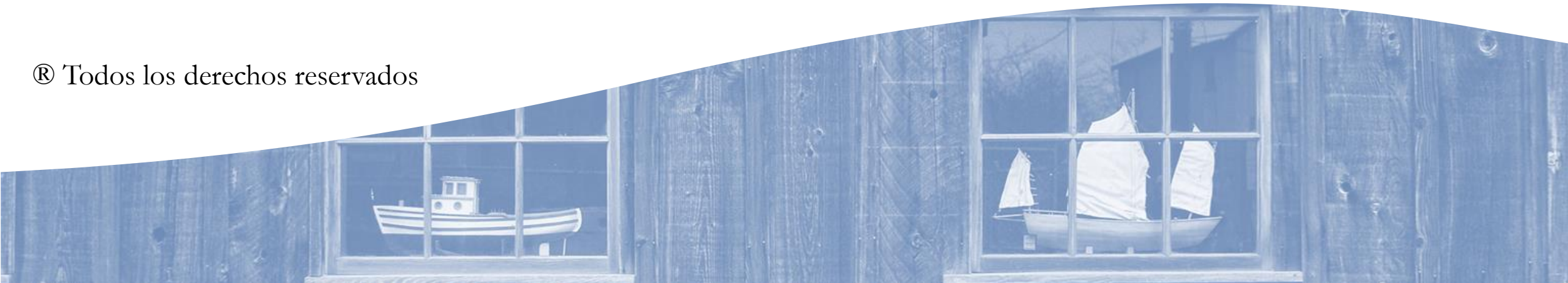


Módulo

# Arquitectura Naval para modelistas

## TEMA 2. Estabilidad inicial

® Todos los derechos reservados

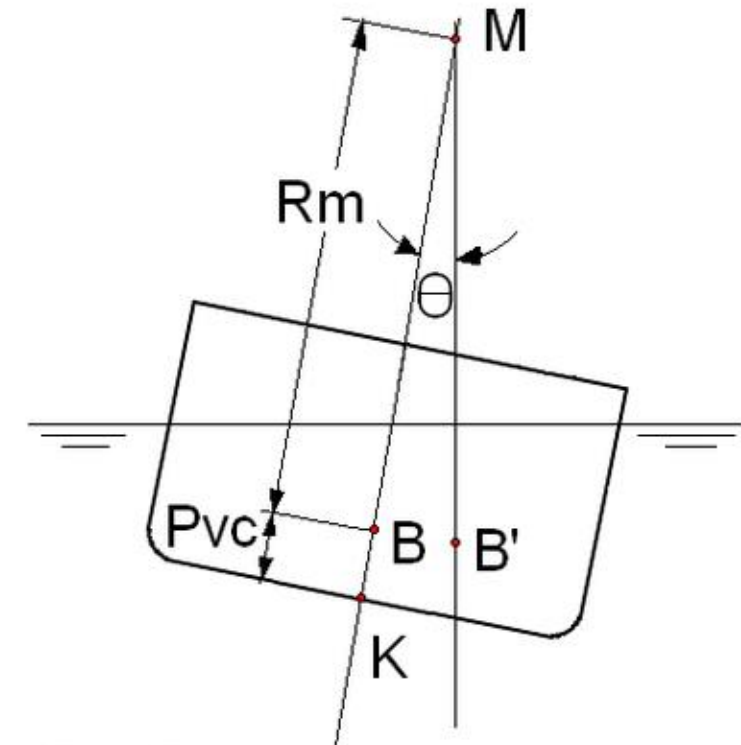


# 1.1. Metacentro transversal I

Supóngase un buque con volumen de carena igual a  $V$ , y su centro de carena en el punto  $B$ . Si luego lo escoramos un **ángulo  $\theta$**  sin alterar el desplazamiento, entonces el centro de carena adoptará una nueva posición  $B'$ , tal como se muestra en la figura.

La recta de acción del empuje que antes pasaba por  $B$  ahora pasará por  $B'$ , Prolongando esa recta hasta cortar el plano de la crujía, o dicho de otro modo a la recta de acción primitiva para cuando el buque estaba adrizado, tendremos en la intersección de ambas rectas, el punto  $M$ . La coordenada vertical de este punto variará con el ángulo de escora, pero para inclinaciones no mayores a  $10^\circ$  se puede asumir como invariable y recibe el nombre de *“metacentro transversal inicial, ó abreviadamente metacentro transversal”*.

Dado que por definición el metacentro se encuentra en la vertical del centro de carena del buque adrizado, bastará con conocer la distancia vertical  $BM$  para fijar su posición.



$R_m$  = Radio Metacéntrico  
 $P_{vc}$  = Posición vertical del centro de carena

# 1.1. Metacentro transversal II

Se demuestra que  $\overline{BM} = \frac{I}{V}$ . Donde:

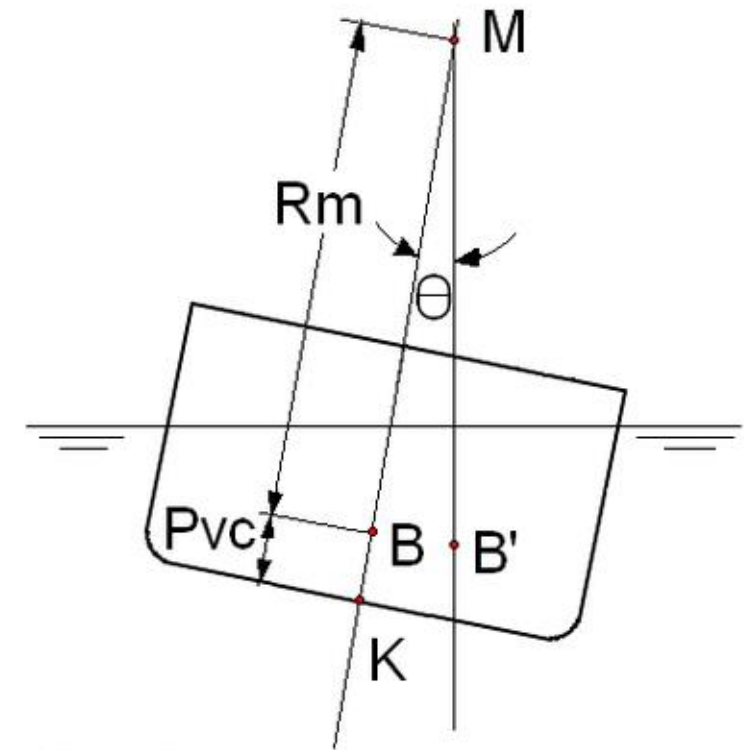
**I** Es el momento de inercia de la superficie de flotación con respecto a su eje baricéntrico longitudinal.

**V** Es el volumen de carena.

Resulta en la práctica más cómodo referirse a la posición vertical de **M** con respecto a la línea base de construcción, esto es, el segmento  $\overline{KM}$

Tendremos entonces que:  $\overline{KM} = \overline{KB} + \overline{BM}$

Dado que **I** y **V** varían con el calado, entonces  $\overline{BM}$  también, por tanto el Radio metacéntrico será una propiedad geométrica de la carena o atributo de la misma. Lo propio ocurre con el segmento  $\overline{KM}$  por tal motivo se gráfica en las curvas de atributos de la carena derecha la coordenada vertical según el calado.



Rm= Radio Metacéntrico  
Pvc= Posición vertical del centro de carena

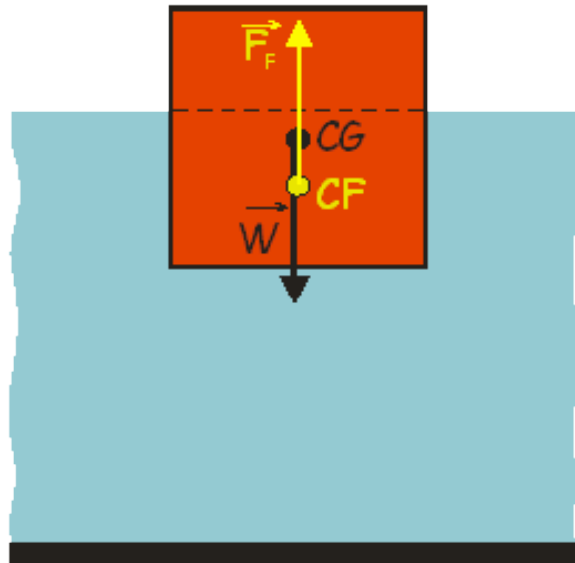
## 1.2. Propiedades del metacentro

- a) El metacentro transversal “**M**” de un buque es un punto prácticamente invariable para pequeñas escoras que no pasan de  $8^\circ$  a  $12^\circ$ , pero no para ángulos mayores.
- b) La posición de “**M**” es una propiedad exclusivamente geométrica de la carena y para un buque dado solo depende del calado.
- c) Dicha posición queda fijada por una sola coordenada: la altura de “**M**” sobre la línea de construcción

# 1.3. Equilibrio de un cuerpo flotante

La estabilidad de un cuerpo parcial o totalmente sumergido es vertical y obedece al equilibrio existente entre el peso del cuerpo ( $\mathbf{W}$ ) y la fuerza de flotación ( $\mathbf{F}_f$ )

$F_f = W$  (en el equilibrio) ambas fuerzas son verticales y actúan a lo largo de la misma línea. La fuerza de flotación estará aplicada en el centro de flotación (CF) y el peso estará aplicado en el centro de gravedad (CG).



La estabilidad de un cuerpo parcialmente o totalmente sumergido es de dos tipos:

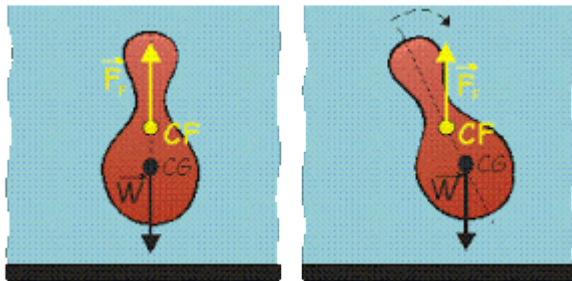
**ESTABILIDAD LINEAL:** Se pone de manifiesto cuando desplazamos el cuerpo verticalmente hacia arriba. Este desplazamiento provoca una disminución del volumen del fluido desplazado cambiando la magnitud de la fuerza de flotación correspondiente. Como se rompe el equilibrio existente entre la fuerza de flotación y el peso del cuerpo ( $F_f \neq W$ ), aparece una fuerza restauradora de dirección vertical y sentido hacia abajo que hace que el cuerpo regrese a su posición original, restableciendo así el equilibrio.

De la misma manera, si desplazamos el cuerpo verticalmente hacia abajo, aparecerá una fuerza restauradora vertical y hacia arriba que tenderá a devolver al cuerpo su posición inicial. En este caso el centro de gravedad y el de flotación permanecen en la misma línea vertical.

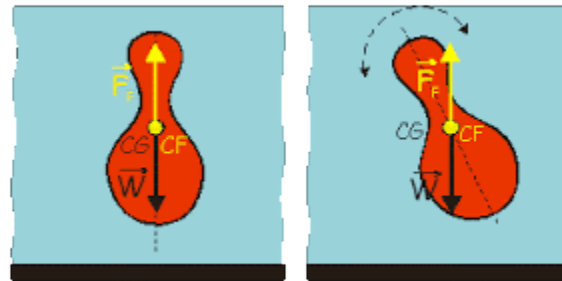
# 1.3. Equilibrio de un cuerpo flotante

## 1.3.1. Estabilidad rotacional

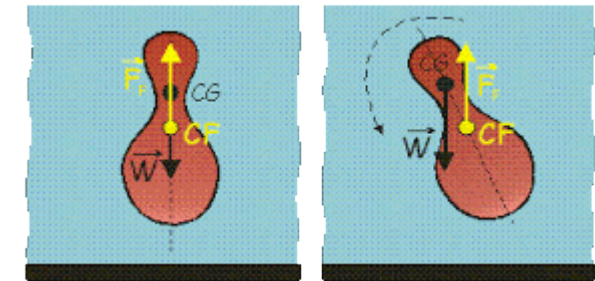
Este tipo de estabilidad se pone de manifiesto cuando el cuerpo sufre un desplazamiento angular. En este caso, el centro de flotación y el centro de gravedad no permanecen sobre la misma línea vertical, por lo que la fuerza de flotación y el peso no son colineales provocando la aparición de un par de fuerzas restauradoras. El efecto que tiene dicho par de fuerzas sobre la posición del cuerpo determinará el tipo de equilibrio del sistema:



**Equilibrio ESTABLE:** cuando el par de fuerzas restauradoras devuelve el cuerpo a su posición original. Esto se produce cuando el cuerpo tiene mayor densidad en la parte inferior del mismo, de manera que el centro de gravedad se encuentra por debajo del centro de flotación



**Equilibrio INESTABLE:** cuando el par de fuerzas tiende a aumentar el desplazamiento angular producido. Esto ocurre cuando el cuerpo tiene mayor densidad en la parte superior del cuerpo, de manera que el centro de gravedad se encuentra por encima del centro de flotación



**Equilibrio NEUTRO:** cuando no aparece ningún par de fuerzas restauradoras a pesar de haberse producido un desplazamiento angular. Podemos encontrar este tipo de equilibrio en cuerpos cuya distribución de masas es homogénea, de manera que el centro de gravedad y el centro de flotación coinciden.

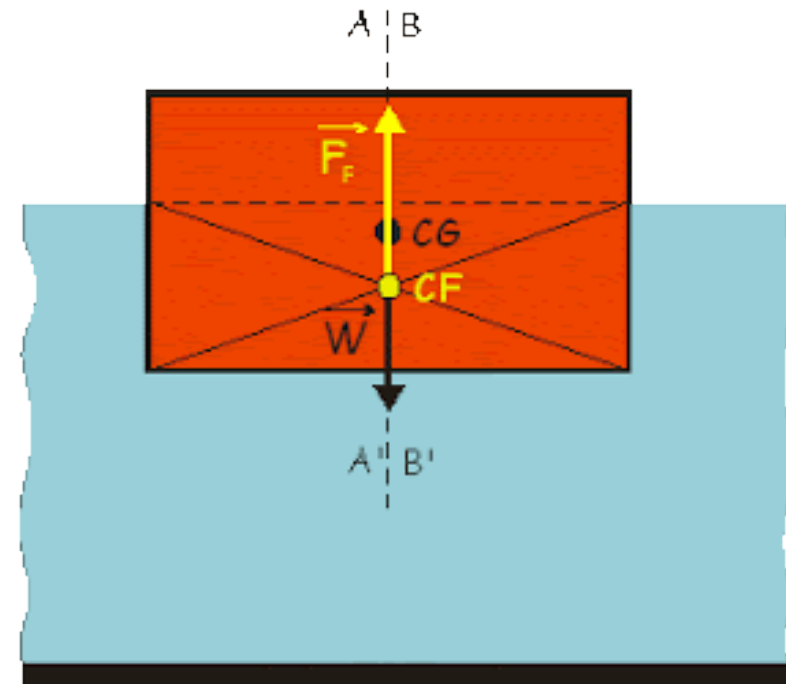
# 1.3. Equilibrio de un cuerpo flotante

## 1.3.. Estabilidad de cuerpos prismáticos I

Hay ciertos objetos flotantes que se encuentran en equilibrio estable cuando su centro de gravedad está por encima del centro de flotación. Esto entra en contradicción con lo visto anteriormente acerca del equilibrio, sin embargo este fenómeno se produce de manera habitual, por lo que vamos a tratarlo a continuación.

Vamos a considerar la estabilidad de cuerpos prismáticos flotantes con el centro de gravedad situado por encima del centro de flotación, cuando se producen pequeños ángulos de inclinación.

La siguiente figura muestra la sección transversal de un cuerpo prismático que tiene sus otras secciones transversales paralelas idénticas. En el dibujo podemos ver el **centro de flotación CF**, el cual está ubicado en el centro geométrico (centroide) del **volumen sumergido del cuerpo (Vd)**. el eje sobre el que actúa la **fuerza de flotación  $F_f$**  está representado por la **línea vertical AA'** que pasa por el **punto CF**.





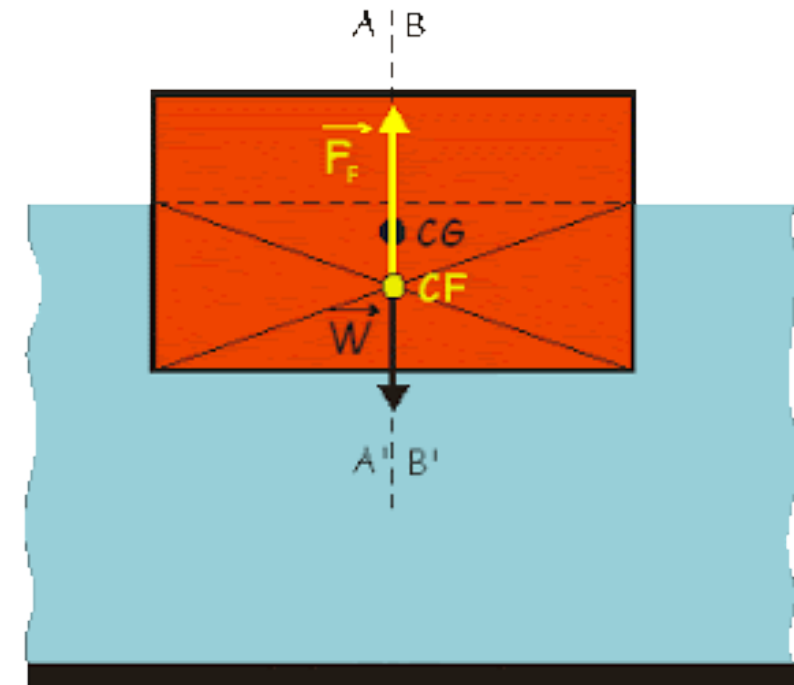
# 1.3. Equilibrio de un cuerpo flotante

## 1.3.. Estabilidad de cuerpos prismáticos II

Vamos a suponer que el cuerpo tiene una distribución de masa homogénea, por lo que el centro de gravedad  $CG$  estará ubicado en el centro geométrico del volumen total del cuerpo ( $V$ ).

El eje vertical del cuerpo esta representado por la línea  $BB'$  y pasa por el punto  $CG$ .

Cuando el cuerpo esta en equilibrio, los ejes  $AA'$  y  $BB'$  coinciden y la fuerza de flotación y el peso actúan sobre la misma línea vertical, por lo tanto son colineales, como muestra la figura

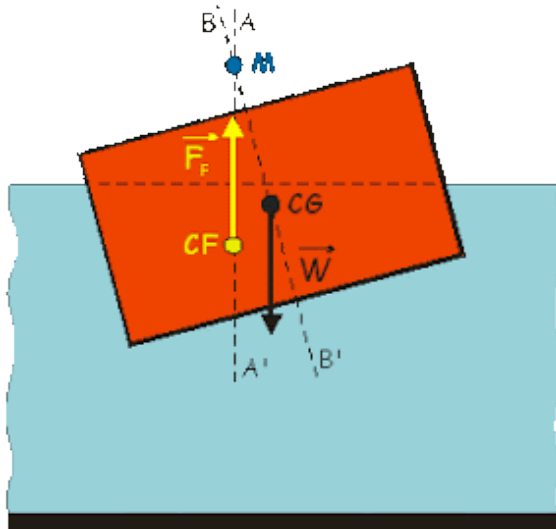




# 1.3. Equilibrio de un cuerpo flotante

## 1.3.. Estabilidad de cuerpos prismáticos III

Ahora **inclinamos** el cuerpo un ángulo pequeño **en sentido contrario a las agujas del reloj**.



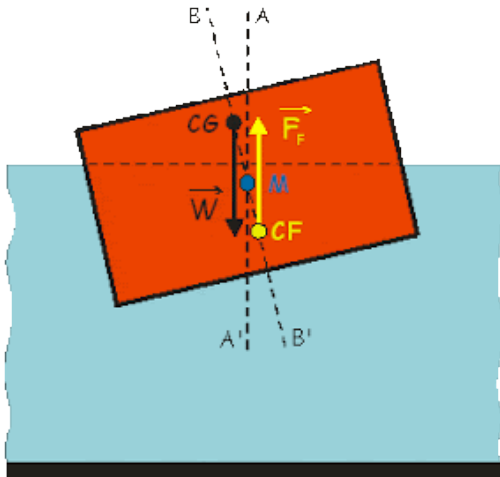
Como vemos, el volumen sumergido habrá cambiado de forma, por lo que su centroide CF habrá cambiado de posición. Podemos observar también que el eje AA' sigue estando en dirección vertical y es la línea de acción de la fuerza de flotación.

Por otro lado, el eje del cuerpo BB' que pasa por el centro de gravedad CG habrá rotado con el cuerpo. Ahora los ejes AA' y BB' ya no son paralelos, sino que forman un ángulo entre sí igual al ángulo de rotación. El punto donde intersectan ambos ejes se llama **METACENTRO (M)**. en la figura podemos ver que el metacentro se encuentra por encima del centro de gravedad y actúa como pivote o eje alrededor del cual el cuerpo se rotó.

Como sabemos, la fuerza de flotación actúa verticalmente en el centroide CF y a lo largo del eje AA', mientras que el peso actúa sobre el centro de gravedad CG y también en dirección vertical. En esta configuración ambas fuerzas no son colineales, por lo que actúan como un par de fuerzas restauradoras que hacen girar al cuerpo en sentido contrario a la rotación producida en un principio, devolviendo al cuerpo a su posición inicial. Se dice entonces que el cuerpo se encuentra en equilibrio estable.

# 1.3. Equilibrio de un cuerpo flotante

## 1.3.. Estabilidad de cuerpos prismáticos IV



Si la configuración del cuerpo es tal que la distribución de masas no es homogénea, la ubicación del metacentro puede variar. Por ejemplo, consideremos un cuerpo prismático cuyo centro de gravedad se encuentra sobre el eje vertical del cuerpo  $BB'$  pero descentrado, como lo indica la figura.

Cuando inclinamos el cuerpo, puede ocurrir que el metacentro  $M$  este ubicado ahora por debajo del centro de gravedad. Como el metacentro actúa de eje de rotación alrededor de el cual el cuerpo gira, el par de fuerzas  $W.F_f$  actúan como un par de fuerzas restaurador, haciendo girar el cuerpo en el mismo sentido en el que se realizó la rotación y dándole la vuelta, sin alcanzar la posición que tenía inicialmente.

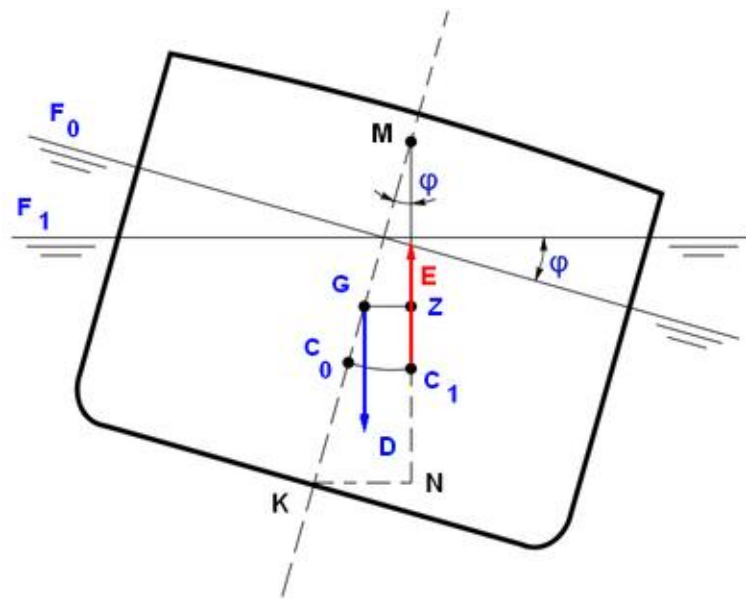
Se dice entonces que el cuerpo presenta **equilibrio inestable**.

**En resumen**, cuando el metacentro  $M$  se encuentra por encima del centro de gravedad  $CG$ , el cuerpo presenta **equilibrio estable**. Cuando el metacentro  $M$  se encuentra por debajo de  $CG$  el equilibrio es inestable, y cuando el metacentro coincide con  $CG$ , esta en **equilibrio neutro**.

# 1.4. Altura metacéntrica

La distancia entre el metacentro “M” y el centro de gravedad “G” del buque se llama “Altura metacéntrica”. El buque adrizado estará en equilibrio estable, inestable o indiferente según su altura metacéntrica positiva, negativa o nula.

$$\bar{GM} = \bar{KM} - \bar{KG}$$



La coordenada vertical del punto M ( $\bar{KM}$ ) es una variable en función del calado del buque, es decir de la condición de carga en el instante considerado. Se obtiene de las curvas de atributos de carena derecha que son suministradas por el astillero. Se ingresa en las mismas con el calado medio y se obtiene la posición vertical del metacentro contado desde el origen K.

Resta ahora determinar  $\bar{KG}$  esto es, la posición vertical del centro de gravedad del buque. El que también es una variable y depende entre otros muchos factores de la distribución de pesos a bordo.

Este valor surge de la aplicación del concepto de sumatorias de *momentos estáticos respecto de un plano* (**Teorema de Varignon**). Es decir, en un sistema de fuerzas, el momento de la resultante es igual a la sumatoria de los momentos de las componentes parciales.

# 1.4. Altura metacéntrica

## 1.4.1. Planilla para cálculo de KG

Para efectuar esta sumatoria se cuenta abordo con planillas que contemplan cada uno de los compartimentos de carga, tanques de combustible, lastre, provisiones y por supuesto el peso y posición del C de G del buque vacío.

En la actualidad todos estos cálculos se efectúan mediante programas de ordenadores que no solo agilizan la operación sino que aseguran la exactitud.

A título de **ejemplo** mencionaremos una planilla esquemática para mostrar los procedimientos de cálculo que se siguen y las consideraciones a tener en cuenta.

Planilla de calculo de KG para buque "Natalia Malen"			
Item	Peso (Tons)	Kg (mts)	Momento Estático Vertical ( Tm)
Buque vacío	3500	6,45	22575
Entrepunte 1	150	8,10	1215
Bodega 1	280	5,20	1456
Entrepunte 2	100	8,11	811
Bodega 2	300	5,20	1560
Entrepunte 3	100	8,11	811
Bodega 3	300	5,20	1560
DF 1	50	0,54	27
DF 2	55	0,54	30
DF 3	58	0,54	31
Agua Calderas	120	2,34	281
Provisiones	20	10,00	200
<b>Desplazamiento</b>	<b>5033</b>		<b>30557</b>
<b>KG =</b>		<b>6,07</b>	

La realidad es que **para un buque portacontenedores esta planilla tiene tantos ítems como contenedores y contempla las coordenadas vertical y longitudinal de cada elemento.**

Para el desplazamiento calculado (planilla) se obtiene de las curvas de atributos de carena derecha, el calado para agua dulce o salada según sea el caso y la posición vertical del punto M ( $\bar{KM}$ )

Una vez determinado la coordenada vertical del centro de gravedad ( $\bar{KG}$ ) se estará en condiciones de determinar el segmento GM. Y del análisis de éste se tendrá una idea de la estabilidad trasversal inicial

# 1.5. Resumen sobre estabilidad transversal inicial del buque

- a) La **estabilidad transversal inicial** puede estudiarse determinando el valor de la altura metacéntrica transversal “GM”.
  - Si  $GM > 0$  el buque es estable.
  - Si  $GM < 0$  el buque es inestable.
  - Si  $GM = 0$  el buque es indiferente
- b) Para determinar el “GM” debe **determinarse independientemente el “KM” y “KG”**
- c) El “**KM**” sólo depende de la carena del buque y se obtiene mediante la curva de atributo en función del calado.
- d) **KG** es decir la altura descentro de gravedad sobre la línea de construcción, sólo depende de la distribución de pesos a bordo. Se determina aplicando el concepto de momento estático de un peso con respecto a un plano

# 1.5. Resumen sobre estabilidad transversal inicial del buque

## 1.5.1. Valores de GM en la práctica

Valores del GM en % de la manga	
<b>Buque de pasajeros</b>	4 a 5%
<b>Buque de carga</b>	5 a 7 %
<b>Petroleros</b>	8 a 9%
<b>Remolcadores</b>	10 a 12%
<b>Torpederos</b>	8 a 10%
<b>Cruceros</b>	5 a 8%
<b>Portaviones mediano</b>	8 a 10%