

EXPERIENCIAS DE ESTABILIDAD

Estudio realizado por
Josep Ramon Vidal i Bosch
Ingeniero Naval y Oceánico

Contenido

EXPERIENCIAS DE ESTABILIDAD	3
Ámbito de aplicación de la prueba de estabilidad.....	3
Densidad o peso específico del agua	3
Criterios de estabilidad de la IMO.....	3
Escoras.....	3
CÁLCULO DEL GM_t	4
PRUEBA DE ESTABILIDAD PARA PEQUEÑOS TRIMADOS.....	4
Cálculo de la posición longitudinal del centro de gravedad del buque para pequeños trimados	5
PRUEBA DE ESTABILIDAD PARA GRANDES TRIMADOS	5
CÁLCULO DEL KG_e , KC_e , \overline{OG}_e y KM_e	6
SUPERFICIES LIBRES.....	7
En caso que no tengamos superficies libres	7
Llenado de tanques	8
SISTEMA DE CORDENAS DEL BUQUE	9
CÁLCULO DEL DESPLAZAMIENTO EN ROSCA	9
ACTA DE ESTABILIDAD.....	9
PROCEDIMIENTO	10
MÉTODOS APROXIMADOS PARA LOS CÁLCULOS DE FLOTABILIDAD Y ESTABILIDAD	12
PROBLEMAS	14
BIBLIOGRAFÍA.....	28

EXPERIENCIAS DE ESTABILIDAD

La experiencia de estabilidad es una prueba que permite conocer con cierta exactitud la posición del c.d.g del buque (KG) y el GM. Conocido el valor del KM (bien por las curvas hidrostáticas o por cálculo directo a partir de las formas) correspondiente al desplazamiento en el momento de la experiencia podemos calcular el KG. Estos son valores que se obtienen con el desplazamiento de la experiencia, pero la administración desea conocer los anteriores valores con el desplazamiento en rosca.

A la experiencia de estabilidad se la conoce también por ensayo o prueba de estabilidad. Hay dos tipos posibles de experiencias,

- Para grandes trimados: Uso de métodos de cálculo directo, i.e. Curvas y/o tablas de Bonjean. La administración considera un trimado grande cuando:

$$A_{\text{experiencia}} - A_{\text{proyecto}} > 0.03 \cdot L_{pp} \quad \text{ó} \quad A_{\text{experiencia}} - A_{\text{proyecto}} \geq 1 \text{ m}$$

Recordemos que el asiento es la diferencia de calados entre popa y proa. **Normalmente el asiento de proyecto, el de las C.H, es 0.**

- Para pequeños trimados: Uso de las curvas hidrostáticas.

Antes de realizar la experiencia deberemos tener una idea de su centro de gravedad para realizar dicha prueba con seguridad. Es decir, en todo momento el $GM > 0$.

Ámbito de aplicación de la prueba de estabilidad

A excepción de algunos casos, como buques gemelos o análogos, la prueba de estabilidad se aplicará a:

- Buques de pasaje: Todos
- Buques de carga: sólo a aquellas esloras superiores a los 24 metros.

Densidad o peso específico del agua

Se calculará el peso específico del agua y se hará a suficiente profundidad para asegurarse que las muestras sean representativas. La muestra se colocará sobre un hidrómetro que la lea y registre el peso específico. Se pueden hacer varias lecturas, así como también analizar el agua en el laboratorio.

Criterios de estabilidad de la IMO

Los criterios de estabilidad de la IMO se aplican a buques de carga y pasaje de menos y de más de 100 m de eslora y buques pesqueros.

Escoras

Al considerar que el metacentro permanece fijo, las experiencias de estabilidad sólo tienen sentido cuando el ángulo de escora es muy pequeño. En la práctica, cuándo

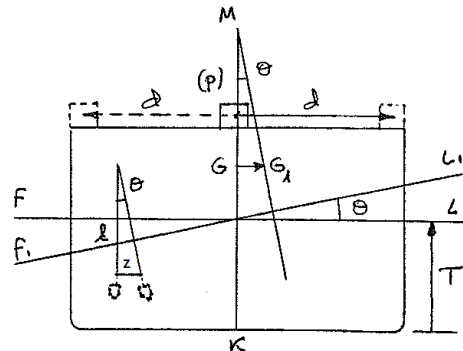
haya que preparar una experiencia, hay que seleccionar el peso “p” estimando el GM para obtener un ángulo de escora, que será:

- Buques grandes: $\theta \approx 1^\circ$
- Buques con una eslora de unos 120 m: $\theta \approx 1,5^\circ$
- Embarcaciones menores: $2^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$

CÁLCULO DEL GM_t

Una vez obtenido el desplazamiento en la experiencia, deberemos conocer los siguientes datos:

- p = peso a desplazar.
 d = distancia transversal desplazada.
 l = longitud del péndulo.
 z = distancia transversal que se mueve el péndulo.
 θ = ángulo que realiza el péndulo.



Con estos valores podemos conocer el GM del buque en el momento de la experiencia:

$$GM_{te} = \frac{p \cdot d}{\Delta \cdot \tan \theta} = \frac{p \cdot d \cdot l}{\Delta \cdot z}$$

Válida para grandes y pequeños trimados.

PRUEBA DE ESTABILIDAD PARA PEQUEÑOS TRIMADOS

En el caso de pequeños trimados usaremos las curvas hidrostáticas, también conocidas como “carenas rectas”. Están calculadas suponiendo el barco adrizado, i.e, sin trimado o un asiento nulo. No obstante cuando el trimado es pequeño, se puede entrar a dichas curvas con el calado medio (C_m). Se usa este valor porque seguramente no conoceremos más valores (a excepción que se pese la embarcación) que los calados en proa y popa, puesto que se pueden medir.

Para calcular el calado medio deberemos conocer el calado en la perpendicular media (C_{pm}):

$$C_{pm} = \frac{C_{pp} + C_{pr}}{2}$$

Recordemos que el asiento es la diferencia entre los calados de popa y de proa:

$$A = C_{pp} - C_{pr}$$

Para calcular el calado medio se deberá hacer una corrección por asiento:

$$C_m = C_{pm} + C_A$$

El valor de la corrección por asiento se obtiene de la siguiente forma:

$$C_A = \frac{A}{L_{pp}} \cdot MF$$

MF, es posición longitudinal de F con respecto a la cuaderna maestra. Evidentemente para conocer MF, se debe conocer C_m y sólo conocemos C_{pm} . Por lo que se entrará a las C.H con C_{pm} , y se operará de forma habitual. Se obtendrán entonces los valores del desplazamiento ($\Delta_{C.H}$), MF y Tc. Cómo el desplazamiento obtenido con C_{pm} no es el real, se realizará la siguiente corrección:

$$\Delta_e = \Delta_{C.H} \pm \frac{\varphi F \cdot A \cdot 100 \cdot Tc}{L_{pp}} = \Delta_{C.H} \pm 100 \cdot Tc \cdot \varphi F \cdot \tan \varphi$$

Recordemos que Tc son las toneladas por centímetro de inmersión ($Tc = P/l$).

Cálculo de la posición longitudinal del centro de gravedad del buque para pequeños trimados

La posición longitudinal del centro de gravedad del buque con respecto a la cuaderna maestra se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} CG_L &= \varphi G_L - \varphi C \\ \varphi G_L &= \varphi C + CG_L \end{aligned}$$

Entonces, entrando en las C.H obtenemos el Mu (Ton x m/cm) y conociendo el asiento y el desplazamiento en el momento de la experiencia:

$$CG_L = \frac{A \cdot Mu}{\Delta_e}$$

PRUEBA DE ESTABILIDAD PARA GRANDES TRIMADOS

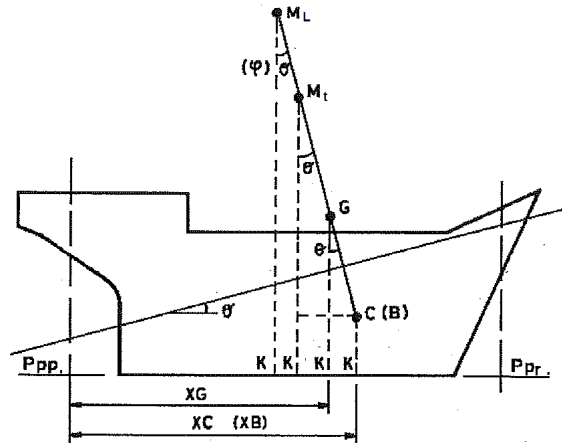
En el caso de grandes trimados hay que obtener por cálculo directo, i.e, con Bonjean u ordenador, los siguientes valores:

- Volumen de carena
- KB
- BM_t y BM_L
- φB ó X_B

En definitiva la administración contempla dos maneras, una para grandes trimados y la otra para pequeños trimados. Para pequeños trimados podremos usar las C.H y para grandes trimados se requerirá del cálculo directo.

CÁLCULO DEL KG_e , KC_e , $\bar{x}G_e$ y KM_e

Las siguientes expresiones se aplican tanto para trimados grandes como para pequeños. Al estar el buque en equilibrio, el metacentro longitudinal M_L y transversal M_t , el centro de gravedad G y el de carena están alineados sobre una recta perpendicular a la flotación que pasa por B .



1. La posición vertical del centro de gravedad del buque en la experiencia:

$$KG_e = KB_e + BG_e \cdot \cos \varphi = KB_e + (BM_{te} - GM_{te}) \cdot \cos \varphi$$

El BM_{te} se calculará por cálculo directo, puesto que es el radio metacéntrico transversal de la nueva flotación. GM_{te} es la altura metacéntrica transversal en el momento de la experiencia sin escora (obtenida directamente por el traslado de pesos).

2. La posición longitudinal del buque en la experiencia es:

$$\bar{x}G_e = \bar{x}B_e - BG \cdot \sin \varphi = \bar{x}B_e - (BM_{te} - GM_{te}) \cdot \sin \varphi$$

3. La posición vertical del centro de carena KB_e en la experiencia se calcula mediante:

$$KB_e = KB_{C.H} + 0.5 \cdot BM_{Le} \cdot (\tan \varphi)^2$$

Para grandes trimados KB_e se obtiene directamente con Bonjean. Para pequeños trimados KB_e se obtiene mediante la corrección anterior al valor dado por las C.H. El radio metacéntrico longitudinal de la nueva flotación BM_{Le} se calculará por cálculo directo.

4. La altura metacéntrica transversal KM_{et} en el momento de la experiencia:

$$KM_{et} = KB_e + BM_{te} \cdot \cos \varphi$$

5. La posición longitudinal del centro de gravedad MG en el momento de la experiencia:

$$\bar{x}G_e = \bar{x}B \pm (BM_{Le} - GM_L) \cdot \tan \varphi$$

El radio metacéntrico longitudinal de la nueva flotación BM_{Le} se calculará por cálculo directo.

SUPERFICIES LIBRES

La corrección por superficies libres se aplica tanto a trimados grandes como pequeños. Siempre que sea posible se evitará este cálculo dejando secos los tanques. La corrección por superficies libres se analiza especialmente cuando hay un traslado de pesos.

En caso que no tengamos superficies libres

En este supuesto caso simplemente restamos al KM suministrado por las C.H, el GM calculado anteriormente:

$$KG = KM - GM$$

Si tenemos superficies libres:

$$KG = KM - GM_c = KM - [GM - GG_0]$$

Al valor de GG_0 también se le conoce por *cs/*.

Esta corrección es debida a tanques que contienen líquidos y que están parcialmente llenos.

Formas de cálculo:

Cuándo se encuentra tabulada la información de los tanques, se da el valor de *cs/* en centímetros para el desplazamiento de verano (Δ_v). Con lo que *cs/* sería igual a:

$$Csl_v = csl_{1v} + csl_{2v} + csl_{3v} + \dots + csl_{nv}$$

Para cualquier otro desplazamiento se deberá efectuar la siguiente conversión:

$$GG_0 = csl = \frac{Msl}{\Delta_{actual}} = \frac{\Delta_v \cdot (\sum csl_v)}{\Delta_{actual}}$$

Msl = momento por superficie libre para una inclinación θ .

Para aquellos tanques que por cualquier motivo no se dé información se deberá calcular el momento de inercia de la superficie del líquido y aplicar la siguiente expresión:

$$GG_c = \frac{\sum i \cdot \gamma}{\Delta}$$

i = momento de inercia de la superficie libre.

Δ = desplazamiento del buque en el momento de la experiencia.

γ = densidad en tn/m^3 . La densidad puede ser un dato conocido o bien se puede obtenerse de la información del tanque, cuándo en esta viene el volumen y el peso del líquido que contiene, siendo $\gamma = p_{tanque}/V_{tanque}$.

Métodos de corrección:

Se exponen dos métodos de corrección de superficies libres, el primero para buques de esloras iguales o superiores a los 100 m y el segundo para buques con $L_{pp} < 100$ metros.

a. Buques de carga y pasaje de $L_{pp} \geq 100m$

Para este tipo de buques se puede usar cualquiera de las anteriores dos formas. Es decir, se puede corregir el GM y GZ.

$$GM_c = GM - GG_0$$

$$GG_c = \frac{\sum i \cdot \gamma}{\Delta}$$

$$KG_c = KG + GG_c$$

b. Buques de $L_{pp} < 100 m$, pesqueros y remolcadores a los que sea aplicable el criterio de estabilidad de la IMO

Este método distingue entre tanques exceptuados y no exceptuados, siendo la corrección por superficies libres obligatoria sólo para los segundos. La información del buque da para las diferentes escoras un valor del momento producido por las cuñas de la carena interior.

$$M_{sl} = k \cdot v \cdot m \cdot \gamma \cdot \sqrt{\delta}$$

M_{sl} = momento de la superficie libre, para una escora determinada, en Tn x m

v = Capacidad total del tanque en metros cúbicos.

m = manga máxima del tanque en m

γ = densidad del fluido en toneladas por metro cúbico.

δ = coeficiente de bloque o afinamiento cúbico del tanque

k = coeficiente adimensional.

Serán tanques exceptuados aquellos cuyo valor sea:

$$\frac{k_{30^\circ} \cdot v \cdot m \cdot \gamma \cdot \sqrt{\delta}}{D_{min}} < 0.01 m$$

K_{30° es un coeficiente que viene tabulado.

La anterior expresión del M_{sl} sirve sólo para corregir el GZ, no el GM. Es decir, en casos de buques con $L_{pp} < 100 m$, el GM se corrige de la misma forma que un buque de un $L_{pp} \geq 100 m$. Sin embargo, la corrección al GZ es totalmente diferente, por lo que se debe hallar en las tablas que hay para cada tanque no exento el valor del momento de las superficies libres, M_{sl} dividido por el desplazamiento que el buque tenga, dará el brazo de las superficies libre que se pondrá como elemento corrector, restando en la tabla para el cálculo del GZ.

Llenado de tanques

Para mejorar el trimado del buque, salvo en casos excepcionales, el número mínimo de tanques a llenar por completo no suele ser superior a tres tanques (o parejas de tanques) de lastre.

El número de tanques parcialmente llenos deberá limitarse a dos, uno a babor y el otro a estribor, o uno en crujía y podrán ser:

Tanques de agua dulce de alimentación de reserva, tanques de almacenamiento de combustible, tanques de servicio diario de combustible, tanques de aceite lubricante, tanques de aguas sucias, tanques de agua potable.

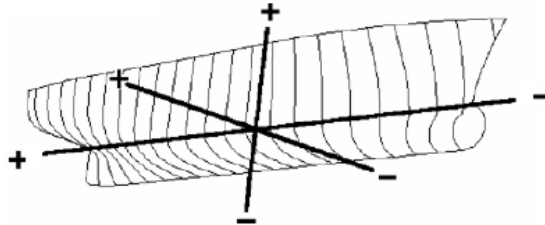
Los tanques parcialmente llenos deberán tener una sección transversal regular (es decir, regular, trapezoidal, etc.) y contener del 20% al 80% de su capacidad si son tanques profundos o del 40% al 60% de su capacidad si son tanques del doble fondo. Se deben evitar los tanques parcialmente llenos de líquidos muy viscosos como los de fuel a baja temperatura.

Un tanque completamente lleno hasta los reboses significa que no se aceptará una capacidad inferior al 100%.

Las interconexiones de los tanques deberán estar cerradas en la experiencia.

SISTEMA DE CORDENAS DEL BUQUE

El sistema de coordenadas es simple. De la cuaderna maestra hacia popa el signo es positivo. De la cuaderna maestra a proa el signo es negativo. En otras palabras, si nos encontramos a popa de la cuaderna maestra el signo será positivo, a proa será negativo.



Pero este convenio de signos puede variar. Por ejemplo en Maxsurf, hacia proa es positivo y de la maestra a popa negativo.

CÁLCULO DEL DESPLAZAMIENTO EN ROSCA

Una vez hallado el desplazamiento en la experiencia (Δ_e) y el centro de gravedad en la experiencia (KG_e) y conociendo los pesos embarcados en la experiencia ($p_{embarcados}$) y su centro de gravedad vertical (kg), entonces,

El desplazamiento en rosca (Δ_R):

$$\Delta_R = \Delta_e - p_{embarcados}$$

Calculando momentos hallaremos el KG_R :

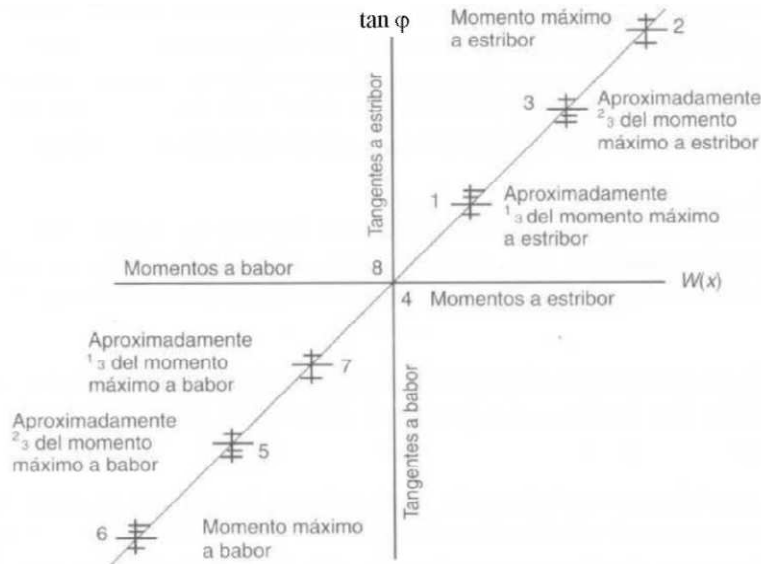
$$\Delta_e \cdot KG_e = \Delta_R \cdot KG_R + p_{embarcados} \cdot kg$$

ACTA DE ESTABILIDAD

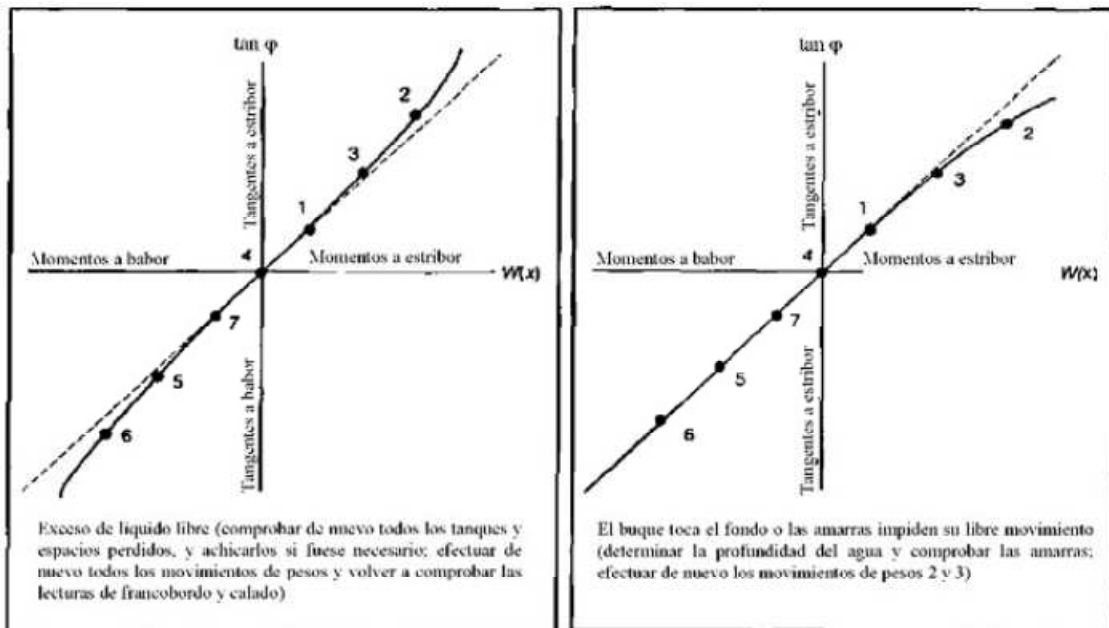
Todos los datos y cálculos se registran en un documento oficial denominado acta de la experiencia de estabilidad, de la cual hay que incluir una copia en el libro de estabilidad. En dicho libro se registran todos los cálculos que demuestran que el buque cumple el criterio de estabilidad que le sea exigible en las distintas condiciones de carga, así como las instrucciones al capitán.

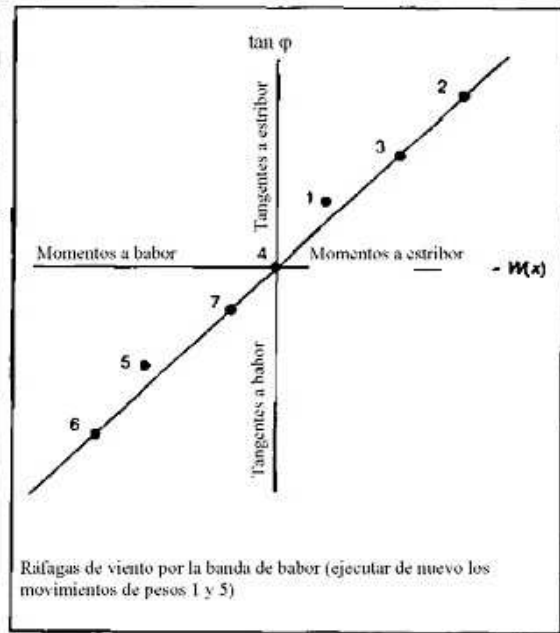
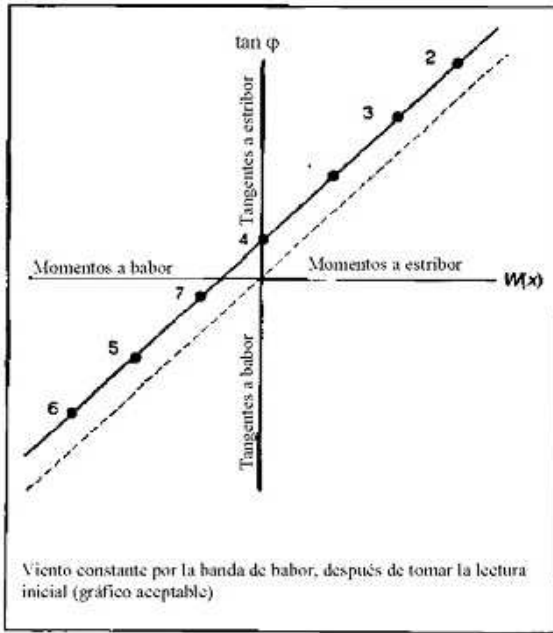
PROCEDIMIENTO

En el transcurso de la prueba se deben ir trazando las lecturas para asegurar que se obtienen datos aceptables. Generalmente, la abscisa del gráfico es el momento escorante $W(x)$ (peso multiplicado por distancia x) y la ordenada es la tangente del ángulo de escora (deflexión del péndulo dividida por su longitud). Para trazar la línea recta se realiza a menudo un análisis de regresión lineal.



El trazado de todas las lecturas de cada uno de los péndulos durante la prueba de estabilidad facilita la detección de mediciones erróneas. Dado que $(W)(x)/\tan\theta$ debe ser constante, la línea trazada debe ser recta. Si ése no es el caso, es muy posible que el buque esté sometido a otros momentos durante la prueba. Dichos momentos deben ser identificados y hay que corregir la causa y repetir los movimientos hasta lograr una línea recta. Las siguientes figuras ilustran ejemplos de cómo detectar algunos de dichos momentos durante la prueba y ofrecen la solución recomendada en cada caso. Por sencillez, en los gráficos sólo se muestra el promedio de las lecturas.





MÉTODOS APROXIMADOS PARA LOS CÁLCULOS DE FLOTABILIDAD Y ESTABILIDAD

Las curvas de las formas del buque presentan el inconveniente, para su tratamiento analítico, de no ser ni figuras geométricas conocidas, ni seguir ninguna ley matemática, con lo que no permiten ser expresadas a través de ecuaciones a las que se puedan aplicar técnicas de integración normales para el cálculo de áreas, centros de gravedad, inercias, etc. En estos casos se recurre a los métodos de cálculo aproximados, a los que se espera que sean simples de utilizar y que el error cometido sea lo más pequeño posible. En este apartado se establecen un resumen de algunos métodos.

Método	Área	Momento longitudinal
Trapezios	$\alpha \cdot \left(\frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{n-1} + \frac{y_n}{2} \right)$	
1º Regla de Simpson	$\frac{\alpha}{3} \cdot (y_0 + 4 \cdot y_2 + y_3)$	
2º Regla de Simpson	$\frac{3 \cdot \alpha}{8} \cdot (y_0 + 3 \cdot y_2 + 3 \cdot y_3 + y_4)$	
3ª Regla de Simpson	$\frac{1}{12} \cdot \alpha \cdot (5 \cdot y_0 + 8 \cdot y_1 - y_2)$	$\frac{1}{24} \cdot \alpha^2 \cdot (3 \cdot y_0 + 10 \cdot y_1 - y_2)$

Nota 0: la tercera regla de Simpson sólo se usa para calcular el área entre dos mangas S_{0-1} conocido el valor de tres mangas consecutivas por ejemplo, y_0 , y_1 , e y_2 .

CÁLCULO DE AREAS, CENTROS GEOMÉTRICOS Y INERCIAS CONOCIDAS LAS MANGAS O SEMIMANGAS					
Método	Área (S)	Momento Estático Longitudinal	I_L respecto a la cuaderna maestra	I_t	c.d.g
Trapezios	$S = \alpha \cdot \sum FA$	$M = \alpha^2 \cdot \sum FM$	$I_m = \alpha^3 \cdot \sum FI_L$	$I_m = \frac{\alpha}{3} \cdot \sum FI_t$	$\alpha \cdot \frac{\sum m_x}{\sum S}$
1º Regla de Simpson	$S = \frac{\alpha}{3} \cdot \sum FA$	$M = \frac{\alpha^2}{3} \cdot \sum FM$	$I_m = \frac{\alpha^3}{3} \cdot \sum FI_L$	$I_m = \frac{\alpha}{9} \cdot \sum FI_t$	$\alpha \cdot \frac{\sum m_x}{\sum S}$
2º Regla de Simpson	$S = \frac{3 \cdot \alpha}{8} \cdot \sum FA$	$M = \frac{3 \cdot \alpha^2}{8} \cdot \sum FM$	$I_m = \frac{3 \cdot \alpha^3}{8} \cdot \sum FI_L$	$I_m = \frac{\alpha}{8} \cdot \sum FI_t$	$\alpha \cdot \frac{\sum m_x}{\sum S}$
SI SE USAN SEMIMANGAS SE DEBERÁ MULTIPLICAR POR 2 LAS MANGAS					

Nota 1: Para calcular la posición longitudinal del centro de carena, se tabularán los brazos "x", cuyos valores serán 0α , 1α , 2α , 3α , 4α , 5α , etc., en los que el factor común α forma parte de la fórmula general, cómo se ha visto en la última columna de la anterior tabla. Esto solamente en el caso que α sea constante. En caso que no se desee calcularlo de esta manera, se multiplicará el factor área (F.A) por la distancia (en m) y su sumatorio se dividirá entre el sumatorio del facto área F.A.

Nota 2: // es el resultado de multiplicar el FA dos veces por su brazo, es decir, el factor área por el brazo da el momento del área. Si dicho momento lo multiplicamos otra vez por el brazo obtenemos el momento de inercia.

Nº. S.M	S.M	F.S	F.A	Br	F.M	Br	F.I
---------	-----	-----	-----	----	-----	----	-----

Nota 3: I_t es el resultado de elevar la manga o la semimanga al cubo.

Nº. S.M	S.M	F.S	F.A	Br	F.M	SM^3	F.S	F.I
---------	-----	-----	-----	----	-----	------	-----	-----

Nota 4: Si no pudiésemos usar alguno de los métodos de Simpson descritos (por ejemplo tuviésemos 6 ordenadas), entonces, lo que deberíamos hacer es usar un combinación de ambos.

CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA CARENA Y CENTROS GEOMÉTRICOS CONOCIDAS LAS ÁREAS DE SECCIONES TRANSVERSALES O DE LAS FLOTACIONES					
Método	Volumen	Volumen	Momento Estático longitudinal	LCB	KB
Trapezios	$S = \beta \cdot \sum FV$	$S = \alpha \cdot \sum FV$	$M = \alpha^2 \cdot \sum FM$	$\alpha \cdot \frac{\sum m_x}{\sum FV}$	$\beta \cdot \frac{\sum m_z}{\sum S}$
1º Regla de Simpson	$S = \frac{\beta}{3} \cdot \sum FV$	$S = \frac{\alpha}{3} \cdot \sum FV$	$M = \frac{\alpha^2}{3} \cdot \sum FM$	$\alpha \cdot \frac{\sum m_x}{\sum FV}$	$\beta \cdot \frac{\sum m_z}{\sum S}$
2º Regla de Simpson	$S = \frac{3 \cdot \beta}{8} \cdot \sum FV$	$S = \frac{3 \cdot \alpha}{8} \cdot \sum FV$	$M = \frac{3 \cdot \alpha^2}{8} \cdot \sum FM$	$\alpha \cdot \frac{\sum m_x}{\sum FV}$	$\beta \cdot \frac{\sum m_z}{\sum S}$

Nota 5: *F.V* es lo que llamamos factor volumen. Es el resultado de multiplicar la superficie de las cuadernas de trazado ó la superficie que forman las líneas de agua, separadas una distancia β (en el caso de trabajar con flotaciones) o α (en el caso de trabajar con secciones transversales) por el factor Simpson.

Nota 6: La posición transversal no la necesitamos calcular porque en principio y por simetría el centro de carena está en el plano diametral

PROBLEMAS

1. Obtener el desplazamiento y las coordenadas del c.d.g en rosca correspondientes a un buque de $L_{pp} = 137,75$ m, $B = 22$ m y $H = 12,85$ m, partiendo de los siguientes datos obtenidos al realizar una experiencia de estabilidad $C_{PP} = 4,7$ m y $C_{PR} = 1,25$ m, peso de la prueba 46,82 tn con un recorrido de 18,80 m, dos péndulos simultáneos, uno de 10,50 m de longitud que dio unas desviaciones de 0,395 m y 0,397 m y el otro de 2,40 m de longitud que dio ambas desviaciones de 0,465 m. Según el laboratorio la densidad del agua del mar fue de $1,015$ gr/cm³. El balance resumido del estado de pesos fue de:

CONCEPTO	Peso (tn)	p x kg (ton x m)	p x MG (ton x m)	$\Sigma i \cdot y$
Pesos que faltan	10,780	148,007	-618,596	
Pesos sólidos ajenos	100,065	1311,841	-58,625	
Pesos líquidos	527,861	3814,790	-11045,330	229,960

Además hay que considerar que las tapas de escotilla de la cubierta superior de 46,670 tn hay que bajarlas a 2,40 m y llevarlas 2,25 m a popa, y que las de la cubierta baja de 60,020 tn solamente hay que bajarlas 2m. Para los calados de la experiencia, en las curvas de Bonjean y en el plano de formas se leen los siguientes valores de áreas, momentos y semimangas referidas al metro:

Sec.	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9,5	10
A_s	4.99	9.25	23.96	49.56	64.82	68.30	62.24	53.63	41.67	24.88	7.93	3.21	0.99
m_K	12.57	23.23	60.08	110.13	126.45	115.30	93.0	71.27	48.95	25.54	7.09	2.70	0.88
y	0.605	1.193	3.874	7.935	10.338	10.991	11.0	10.916	10.156	7.692	3.389	1.707	0.924

Se considerará que el volumen de los apéndices es el 1,5% del volumen de trazado, despreciándose las zonas extremas de proa y de popa y sus efectos sobre la flotación y el centro de carena.

Solución:

a. *Buque en la experiencia:*

Primero comprobamos el valor del trimado y lo comparamos por el dado por la administración.

$$A_{\text{experiencia}} - A_{\text{proyecto}} > 0.03 \cdot L_{pp} \quad \text{ó} \quad A_{\text{experiencia}} - A_{\text{proyecto}} \geq 1 \text{ m}$$

$$0,03 \cdot L_{pp} = 0,03 \cdot 137,75 = 5,213 \text{ m} > 3,45 \text{ m}$$

$$t = C_{pp} - C_{pr} = 4,7 - 1,25 = 3,45 \text{ m} > 1 \text{ m}$$

Cómo es mayor que 1 m ya es suficiente para realizar los cálculos por cálculo directo. Entonces, habremos que obtener todos los parámetros según el criterio de la administración, es decir, volumen de carena, KB, MB, BM_t, etc. Con las curvas de Bonjean para los calados de la experiencia se pueden realizar los cálculos.

Entonces, el valor del intervalo para calcular el volumen de carena, KB y el MB:

$$h = 137,75/10 = 13,775 \text{ m}$$

El valor del intervalo para calcular el momento de inercia transversal no es el mismo que en el caso anterior, puesto que la flotación está inclinada. Entonces:

$$h' = \frac{Lwl}{10} = \frac{L_{pp}}{10 \cdot \cos \varphi}$$

El ángulo φ , será igual a:

$$\tan \varphi = \frac{t}{L_{pp}} = \frac{4,7 - 1,25}{137,75} = 0,025$$

$$\varphi = 1,435^\circ$$

Finalmente, $h' = 13,779 \text{ m}$. Como vemos aún usando todos los decimales la diferencia entre h y h' es mínima.

Entonces si usamos la primera regla de Simpson:

El volumen de trazado:

$$\nabla_{Tr} \cong \frac{h}{3} \cdot \sum FS \cdot As = \frac{h}{3} \cdot \sum FV$$

La posición vertical del centro de carena respecto la quilla:

$$KB = \frac{\sum FS \cdot m_k}{\sum FV} = \frac{\sum FM_K}{\sum FV}$$

La posición longitudinal del centro de carena respecto la cuaderna maestra:

$$\text{MB} = \frac{\sum FS \cdot Br \cdot As}{\sum FV} = h \cdot \frac{\sum FM_{MB}}{\sum FV}$$

El momento de inercia transversal, o momento de inercia correspondiente al área de flotación respecto al eje XX, es igual a:

$$I_t = \frac{2}{9} \cdot h' \cdot \sum FI_t$$

Como antes hemos indicado, como la flotación no está adrizada, el valor del h' será el intervalo entre secciones en este plano, que será distinto del correspondiente al plano base. Finalmente el radio metacéntrico transversal será igual a:

$$BM_t = \frac{\frac{2}{9} \cdot h' \cdot \sum FM_t}{\nabla}$$

Sec.	As	FS	FA = FS·As	Br.	FM _{MB} = FA·Br	m _K	FM _K = FS·m _K	y	y ³	FI _t = FS·y ³
0	4.990	0.5	2.495	-5	-12.475	12.570	6.285	0.605	0.221	0.111
0.5	9.250	2	18.500	-4.5	-83.250	23.230	46.460	1.193	1.698	3.396
1	23.960	1.5	35.940	-4	-143.760	60.080	90.120	3.874	58.141	87.211
2	49.560	4	198.240	-3	-594.720	110.130	440.520	7.935	499.621	1998.485
3	64.820	2	129.640	-2	-259.280	126.450	252.900	10.338	1104.866	2209.732
4	68.300	4	273.200	-1	-273.200	115.300	461.200	10.991	1327.736	5310.943
5	62.240	2	124.480	0	0.000	93.000	186.000	11	1331.000	2662.000
6	53.630	4	214.520	1	214.520	71.270	285.080	10.916	1300.740	5202.961
7	41.670	2	83.340	2	166.680	48.950	97.900	10.156	1047.534	2095.068
8	24.880	4	99.520	3	298.560	25.540	102.160	7.692	455.112	1820.446
9	7.930	1.5	11.895	4	47.580	7.090	10.635	3.389	38.924	58.386
9.5	3.210	2	6.420	4.5	28.890	2.700	5.400	1.707	4.974	9.948
10	0.990	0.5	0.495	5	2.475	0.880	0.440	0.924	0.789	0.394
		∑	1198.685	∑	-607.980	∑	1985.100		∑	21459.079
		Vol.	5503.962	MB	-6.987	KB	1.656	m	It	65707.701 m ⁴
									BMt	11.938 m

El desplazamiento en la experiencia será igual a:

$$\Delta_e = \Delta_{tr} \cdot \left(1 + \frac{1,5}{100}\right) \cdot \rho = 5670,319 \text{ ton}$$

El valor medio de los resultados de los péndulos es:

$$\tan \theta = \frac{\tan \theta_1 + \tan \theta_2 + \tan \theta_3 + \tan \theta_4}{4} = \frac{\sum \frac{a_i}{l_i}}{4}$$

$$\tan \theta = \frac{\frac{0,395}{10,5} + \frac{0,397}{10,5} + \frac{0,465}{12,4} + \frac{0,465}{12,4}}{4} = 0,037$$

Cálculo del GM_t. Con el movimiento de pesos obtenemos la altura metacéntrica transversal disponible:

$$GM_t = \frac{p \cdot d}{\Delta_e \cdot \tan \theta} = \frac{46,82 \cdot 18,80}{5670,319 \cdot 0,037} = 4,128 \text{ m}$$

Corrección por superficies libres:

$$GM_{tc} = GM_t - GGc = 4,128 - \frac{229,96}{5670,319} = 4,087 \text{ m}$$

Cálculo del centro de gravedad del buque en el momento de la experiencia:

$$KG_e = KB + BG_e \cdot \cos \varphi = KB + (BM_t - GM_t) \cdot \cos \varphi = 1,656 + (11,939 - 4,087) \cdot 0,999 = 9.5 \text{ m}$$

Posición longitudinal del centro de gravedad del buque en el momento de la experiencia:

$$\overline{KB}_e = \overline{KB} - (BM_t - GM_t) \cdot \sin \varphi = -6,987 + (11,939 - 4,087) \cdot \sin 1,435^\circ = -6,790 \text{ m}$$

BUQUE EN ROSCA

Denominación	Peso (Tn)	Kg (m)	Momento	Mg	Momento
Buque en la experiencia	5670,319	9,5	53868,869	-6,790	-38501,466
Pesos que faltan	10,780	-	148,007	-	-618,596
Pesos ajenos sólidos	- 100,065	-	-1311,841	-	+58,625
Pesos ajenos líquidos	- 527,861	-	-3814,790	-	+11045,330
Totales	5053,173	KG'_R	48890,245	-	
Tapas escotilla cubierta superior	44,670	-2,40	-107,208	-2,25	-100,508
Tapas escotilla cubierta baja	60,020	-2	-120,040	0	0
Totales finales	-	KG_R	48662,997	-	-28127,956

$$KG_R = 48662,997/5053,173 = 9,630 \text{ m}$$

$$\overline{KG}_R = -28127,956/5053,173 = -5,564 \text{ m}$$

2. En un buque se ha efectuado una experiencia de estabilidad con los siguientes resultados: Al trasladar un peso de 30 Ton, una distancia transversal de 7 metros, las plomadas de longitud de 6,50 m, se han desviado por término medio 0,092 m. Las características del buque en el momento de la experiencia, $\Delta = 3302$ tons, $KM = 10.12$ m.

Se pide:

- a. Calcular el KG_{te} del buque en el momento de la experiencia.

Cálculo del GM_{et} :

$$GM_{te} = \frac{p \cdot d \cdot L}{\Delta_e \cdot z} = \frac{38 \cdot 7 \cdot 6,50}{3302 \cdot 0,092} = 4,493 \text{ m}$$

Cálculo del KG_e :

Al no haber superficies libres, la altura del centro de gravedad en el momento de la experiencia será:

$$KG_e = KM - GM_{et} = 10,12 - 4,493 = 5,63 \text{ m}$$

3. A un buque se le ha practicado una experiencia de estabilidad, con los siguientes resultados: Un peso móvil de 2990 kg (1495 kg a cada costado) que se desplaza una distancia transversal recorrida de 12,02 m de costado a costado. Dos péndulos, uno en el palo de proa (de 6,27 m de longitud) y otro en el de popa (de 7,50 m). Los calados del buque en la experiencia son de $C_{pp} = 3,70$ m y $C_{pr} = 3,05$ m. Como $t = 3,70 - 3,05 = 0,65$ m < 1 m los datos de las curvas hidrostáticas son:

Entrando con el calado medio $C_m = 3,375$ m:

$$\Delta = 2097 \text{ tons}$$

$$\overline{\overline{C}} = -0.25 \text{ m}$$

$$\overline{\overline{F}} = -0.33 \text{ m}$$

$$M_{to} = 26 \text{ tons}\cdot\text{m/cm}$$

$$T_c = 6,94$$

$$KM = 5,23 \text{ m}$$

El desplazamiento en el momento de la experiencia:

$$\Delta_e = \Delta_{c.H} - \frac{\overline{\overline{F}} \cdot A \cdot 100 \cdot T_c}{L_{pp}} = 2097 - \frac{0,33 \cdot 0,65 \cdot 100}{L_{pp}} = 2097 - 2,00 = 2095 \text{ ton}$$

Tangentes medias:

$$\tan \theta_1 = \frac{122,5}{6,270} = 0,0195$$

$$\tan \theta_2 = \frac{145,0}{7,5} = 0,01933$$

$$\tan \theta_m = \frac{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}{2} = 0,01943$$

Finalmente el GM_t :

$$GM_{te} = \frac{1495 \cdot 12,02}{2095 \cdot 0,01943} = 0,441$$

La posición vertical del centro de gravedad en la experiencia:

$$KG_e = KM_e - GM_{te} = 5,230 - 0,441 = 4,789 \text{ m}$$

La posición longitudinal del centro de gravedad:

$$CG = \frac{A \cdot M_{tu}}{\Delta_e} = \frac{0,65 \cdot 26 \cdot 100}{2095} = 0,81 \text{ m}$$

$$\overline{\overline{G}} = \overline{\overline{C}} - CG = -0,25 + 0,81 = 0,56 \text{ m a popa}$$

4. En el momento de realizar una experiencia de estabilidad, un buque tiene las siguientes características: $L_{pp} = 37$ m, $C_{pp} = 3,49$ m y $C_{pr} = 2,54$ m. Para esta flotación en el plano de formas se leen las siguientes semimangas en metros:

Sec.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y	4,2	4,55	4,6	4,65	4,65	4,5	4,5	4,3	3,8	2,1	0

Y entrando en las Curvas Hidrostáticas C.H, con un peso específico de $\rho = 1,025$ tn/m³, con un calado de $C_{pm} = 3,015$ m, obtenemos: $\Delta = 500$ tn y $Tc = 2,75$ tn. La experiencia se realiza con dos pesos iguales de 1,7 ton, cada uno, colocados en cada banda, se desplaza uno de ellos a su banda contraria y se toma la lectura del péndulo. Posteriormente se repite el proceso de forma análoga con el otro peso. La distancia de traslado de cada peso en ambos casos es de 8,20 m y las desviaciones de un péndulo de 5 metros de longitud fueron las siguientes: escora a Er. 0,250 m y escora a babor de 0,272 m.

Los pesos extraños al buque, para llegar a la condición de rosca, en el momento de la experiencia son:

DESIGNACIÓN	PESO	KG	i x y
Pesos propios de la experiencia	3,4	4,8	-
Personal	0,225	9,325	-
Personal	0,225	7,2	-
Tanque de lastre nº1	5,7	1,75	4,8
Tanque de lastre nº2	16,418	4,1	23,420
Tanque de combustible nº3	2,734	4,77	2,350

Se pide:

a. Siguiendo el criterio de la Administración, en lo que corresponda, calcular la altura del centro de gravedad sobre la base, así como la de su metacentro transversal durante la experiencia, para ello se tendrá en cuenta el efecto del trimado.

b. Determinar el desplazamiento y la altura sobre la base del centro de gravedad del buque en la condición de rosca.

Notas:

1. Se supondrá que para el desplazamiento de la experiencia en las C.H nos dan un $KB_L = 1,950$ m.

2. Se despreciará la zona de la flotación que quede fuera de las perpendiculares.

Solución:

Cálculo del desplazamiento en la experiencia:

$T = C_{pp} - C_{pr} = 3,49 - 2,54 = 0,95 \text{ m} < 1 \text{ m}$ y como $0,03 \cdot 37 = 1,11 \text{ m} > 0,95 \text{ m}$ podemos usar las curvas hidrostáticas.

El calado medio es igual a: $C_m = (C_{pp} + C_{pr})/2 = 3.015 \text{ m}$. El ángulo debido al trimado de la embarcación será igual a:

$$\tan \varphi = \frac{C_{pr} - C_{pp}}{L_{pp}} = \frac{0,95}{37} = 0,026$$

$$\varphi = 1,471^\circ$$

Cálculo del \overline{OF} :

Cómo el buque tiene un cierto trimado la distancia entre secciones para dicha flotación será igual a:

$$L_{WL} = \sqrt{t^2 + L_{pp}^2} = \sqrt{0,95^2 + 37^2} = 37,012 \text{ m}$$

$$h' = 37,012/10 = 3,701 \text{ m}$$

Sec.	SM	FS	FA = SM·FS	Br	FM=Br·FA	y^3	FIt = $y^3 \cdot FS$	Fl _L = Br·FM
0	4.200	1	4.200	-5	-21.000	74.088	74.088	105.000
1	4.550	4	18.200	-4	-72.800	94.196	376.786	291.200
2	4.600	2	9.200	-3	-27.600	97.336	194.672	82.800
3	4.650	4	18.600	-2	-37.200	100.545	402.179	74.400
4	4.650	2	9.300	-1	-9.300	100.545	201.089	9.300
5	4.650	4	18.600	0	0.000	100.545	402.179	0.000
6	4.500	2	9.000	1	9.000	91.125	182.250	9.000
7	4.300	4	17.200	2	34.400	79.507	318.028	68.800
8	3.800	2	7.600	3	22.800	54.872	109.744	68.400
9	2.100	4	8.400	4	33.600	9.261	37.044	134.400
10	0.000	1	0.000	5	0.000	0.000	0.000	0.000
		ΣFA	120.3	ΣFM	-68.100	ΣFl_t	2298.058	843.300
		Área	296.8202	M'	-621.862	I' _t	1890.025	28500.212
				\overline{OF}'	-2.095		I' _L	27197.362

Pero estos resultados son sólo válidos para la flotación inclinada, luego para nuestra flotación:

$$\Sigma F = \Sigma F' \cdot \cos \varphi = -2,095 \cdot 0,999 = -2,094 \text{ m}$$

$$\Delta_e = \Delta_{C.H} \pm 100 \cdot Tc \cdot \Sigma F \cdot \tan \varphi = 500 + 100 \cdot 2,75 \cdot 2,094 = 514,792 \text{ ton}$$

Cálculo de la media de las tangentes:

$$\tan \theta_m = \frac{\frac{0,250}{5} + \frac{0,271}{5}}{2} = \frac{0,1042}{2} = 0,0521$$

Finalmente el valor del GM_t :

$$GM_{te} = \frac{p \cdot d}{\Delta_e \cdot \tan \theta} = \frac{1,7 \cdot 8,2}{514,792 \cdot 0,0521} = 0,519 \text{ m}$$

Corrección por superficies libres:

$$GG_c = \frac{\sum i \cdot \gamma}{\Delta_e} = \frac{4,8 + 23,42 + 2,35}{514,792} = 0,059 \text{ m}$$

Por lo que:

$$GM_t = GM_{te} - GG_c = 0,519 - 0,059 = 0,461 \text{ m}$$

Vamos a calcular el radio metacéntrico transversal y longitudinal en el momento de la experiencia:

$$BM_{te} = \frac{I'_t}{\nabla_e} = \frac{1,025 \cdot 1890,025}{514,792} = 3,763 \text{ m}$$

$$BM_{Le} = \frac{I'_L}{\nabla_e} = \frac{1,025 \cdot 27197,362}{514,792} = 54,153 \text{ m}$$

Cálculo de la altura del centro de carena en el momento de la experiencia:

$$KB_e = KB_{C.H} + 0,5 \cdot BM_L \cdot (\tan \varphi)^2 = 1,950 + 0,5 \cdot 54,153 \cdot (0,95/37)^2 = 1,968 \text{ m}$$

Cálculo de la altura del centro de gravedad en la experiencia:

$$KG_e = KB_e + (BM_{te} - GM_t) \cdot \cos \varphi = 1,968 + (3,763 - 0,461) \cdot \cos 1,471 = 5,268 \text{ m}$$

Cálculo de la altura metacéntrica en el momento de la experiencia:

$$KM_e = KB_e + BM_{te} \cdot \cos \varphi = 1,968 + 3,763 \cdot \cos 1,471 = 5,723 \text{ m}$$

Acabamos de calcular la posición del centro de gravedad del buque en la experiencia, ahora vamos a determinar dicha posición del buque en rosca tal como pide la administración:

CONCEPTO	PESO	kg	Momento
Buque en la experiencia	514,792	5,268	2711.924
Personal	-0,225	9,325	-2.098
Personal	-0,225	7,200	-1.620
Tanque 1	-5,700	1,750	-9.975
Tanque 2	-16,418	4,100	-67.314
Tanque 3	- 2,734	4,770	-13.041
Pesos propios en la experiencia	- 3,400	4,800	-16.32
<i>Totales</i>	<i>486,090</i>		<i>2601.556</i>

$$KG_R = 2601,556/486,09 = 5,362 \text{ m}$$

5. Se realiza una experiencia de estabilidad, en un buque que desplaza 5000 ton, contando con una carga líquida de aceite de $\gamma = 0,9 \text{ ton/m}^3$, en un tanque de $l \cdot b = 15 \cdot 12 \text{ m}$, que tiene un mamparo longitudinal central y no está lleno. La carga de aceite es de 150 ton, con su c.d.g a 0,80 m sobre la línea base del buque. Al mover 10 ton en cubierta 7 metros en través se mueve 6 cm un péndulo de 6 metros de longitud. Si el metacentro transversal está a 6 metros sobre la base, calcular la altura del centro de gravedad del buque cuándo haya descargado el aceite del tanque citado.

Solución:

Cálculo del ángulo de escora y el GM_{te} :

$$\tan \theta = \frac{0.06}{6} = 0.01 \rightarrow \theta = 0.573^\circ$$

$$GM_{te} = \frac{p \cdot d}{\Delta_e \cdot \tan \theta} = \frac{10 \cdot 7}{5000 \cdot 0,01} = 1.4 \text{ m}$$

Cálculo del momento de inercia de la superficie del tanque. Como el tanque está partido por la mitad, restando dos tanques y uno vacío:

$$i = \frac{1}{12} \cdot 15 \cdot 6^3 = 270 \text{ m}^4$$

$$i \cdot \gamma = 270 \cdot 0.9 = 243 \text{ tn} \cdot \text{m}$$

$$GG_c = 243 / 5000 = 0.0486$$

$$GM_t = GM_{te} - GG_c = 1.4 - 0.0486 = 1.351 \text{ m}$$

El enunciado del problema nos da la altura metacéntrica transversal del buque $KM_t = 6 \text{ m}$. Eso significa que el KG_e :

$$KG_e = KM_t - GM_t = 6 - 1,351 = 4,649 \text{ m}$$

CONCEPTO	DESPLAZAMIENTO	kg	Momento
Buque en la experiencia	5000	4,649	23245
Tanque aceite	-150	0.80	- 120
<i>Total</i>	<i>4850</i>		<i>23125</i>

$$KG_{\text{sin aceite}} = 23125/4850 = 4,768 \text{ m}$$

7. Inicialmente a un buque adrizado de $\Delta = 4500$ ton, $KM_L = 5,527$ m y $\sum i \cdot \gamma = 1000$ ton·m, se le realiza una experiencia de estabilidad moviendo un peso de a bordo de 7.5 ton una distancia horizontal de 8 m obteniéndose una escora de 2.5° . Entre las superficies libres se encuentra la debida a 45 ton de petróleo ($\gamma = 0.9$ ton/m³), cuya forma se puede asimilar a un trapecio rectángulo de dimensiones $b_{max} = 10$ m, $b_{min} = 4$ m y $l = 20$ m. Partiendo de la situación de adrizado se descargan 45 ton, con lo que el buque queda con una escora de 4° a Br, para contrarrestarla se decide trasladar horizontalmente un peso de 20 ton una distancia de 13 m a Er. Quedando el buque finalmente con una escora a 1° a Er. Se pide determinar la coordenada transversal del c.d.g del petróleo descargado, sabiendo que para el desplazamiento final $KM_t = 5,775$ m. Nota: Al ser la superficie libre de un trapecio, el método de Simpson es matemáticamente exacto.

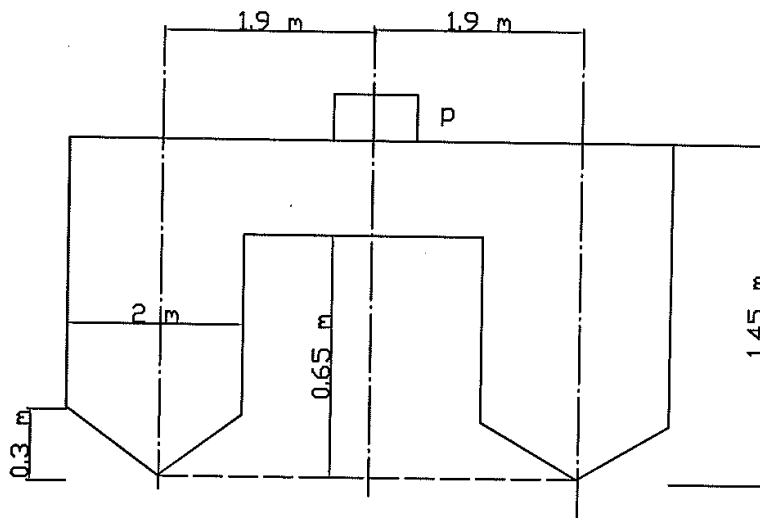
X Inicialmente a un buque adrizado de $\Delta = 4500$ Tm. ; $KM_L = 5,527$ m. y $\sum i \gamma = 1000$ Tm · m, se le realiza una experiencia de estabilidad moviendo un peso de a bordo de 7,5 Tm. una distancia horizontal de 8 m., obteniéndose una escora de $2,5^\circ$. Entre las superficies libres se encuentra la debida a 45 Tm. de petroleo ($\gamma = 0,9$ Tm/ m³), cuya forma se puede asimilar a un trapecio rectángulo de dimensiones : $b_{max} = 10$ m.; $b_{min} = 4$ m. y $l = 20$ m..
Partiendo de la situación de adrizado se descargan las 45 Tm., con lo que el buque queda con una escora de 4° a Br.; para contrarrestarla se decide trasladar horizontalmente un peso de 20 Tm. una distancia de 13 m. a Er., quedando el buque finalmente con una escora de 1° a Er. Se pide determinar la coordenada transversal de c.d.g. del petróleo descargado, sabiendo que para el desplazamiento final , $KM_t = 5,775$ m.
Nota.- Al ser la superficie libre un trapecio, el método de Simpson es matematicamente exacto.

X Se realiza una experiencia de estabilidad en un buque que desplaza 5000 Tm., contando con una carga líquida de aceite de $\gamma = 0,9$ Tm/m³, en un tanque de $l \cdot b = 15 \cdot 12$ m., que tiene un mamparo longitudinal central y no está lleno. La carga de aceite es de 150 Tm. con su c.d.g. a 0,80 m. sobre la línea base del buque. Al mover 10 Tm. en cubierta 7 m. en traves se mueve 6 cm. un péndulo de 6 m. de longitud. Si el metacentro transversal está a 6 m. sobre la base, calcular la altura del c.d.g. del buque cuando haya descargado el aceite del tanque citado.

X Se desea determinar un peso para una experiencia de estabilidad, de modo que al trasladar el peso a una banda y a otra el buque adquiriera una escora $\theta = 2^\circ$, siendo el peso P despreciable respecto al desplazamiento.

El buque es un catamarán de dos flotadores simétricos, cuya sección transversal es constante en toda la eslora. Las dimensiones son $L = 15$ m, $B = 5,8$ m y $H = 1,45$ m. El peso del buque en la báscula fué de 22 Tm y el KG aproximado de 1,25 m.

Una vez determinado el peso, calcular el ángulo de escora que alcanzará el barco, elevando el peso 1 m sobre la cubierta.



BIBLIOGRAFÍA

Apuntes y exámenes de la asignatura de Teoría del Buque e Hidrostática y Estabilidad de la Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT – ETSINO.

Resolución MSC.267(85) (adoptada el 4 de diciembre de 2008). Adopción del código internacional de estabilidad sin avería, 2008. (Código is 2008).

Teoría del buque. Flotabilidad y estabilidad. Autor: Joan Olivella. Editorial: Edicions UPC.