CAPITULO 3

Propiedades y Cálculo de Carenas Derechas

Carenas Derechas y sus Atributos

La característica que identifica una carena derecha es la posición relativa de su plano de flotación, el cual debe ser por un lado perpendicular al Plano de Crujía y por otro, también perpendicular al Plano Base.

Como cuerpo geométrico, está definida por su forma y propiedades asociadas, como lo son su volumen, posición del centroide de éste, etc.

Estas propiedades son denominadas *atributos de carenas derechas* y en conjunto constituyen lo que se denominan *Curvas Hidrostáticas*.

Su presentación es un requisito específico establecido por la mayoría de las Sociedades de Clasificación y Autoridades Marítimas del mundo, estando aceptada su presentación en formato de tablas, lo cual es actualmente la práctica habitual, incorporadas en algunos casos en aplicaciones de estabilidad integrales computarizadas, o en forma gráfica de acuerdo con las prácticas tradicionales.

Su utilización es imprescindible para el trabajo de diseño de ingeniería, pero también constituye la herramienta con la que cuenta el patrón o capitán del buque para llevar una buena navegación, la realización bajo criterios de seguridad de movimientos de carga, etc.

Curvas Hidrostáticas

Las *Curvas Hidrostáticas* representan las propiedades de las carenas derechas limitadas para una serie sistemática de flotaciones, cada una de las cuales está asociada a un calado específico.

La primera flotación considerada es aquella coincidente con el plano base a la que le corresponde el calado nulo, siendo la última la flotación de diseño o de máxima carga. La distancia entre ambas se conoce como *calado de diseño* o *calado de máxima carga*.

Históricamente esa serie estaba compuesta por once flotaciones o planos de agua, incluyendo el plano base, con una separación uniforme entre ellas correspondiente a una décima parte del calado de diseño. Esta limitación estaba fundamentada en la extensión de los cálculos asociados y las herramientas de cálculo con las que se contaba. Actualmente, el uso de ordenadores y programas informáticos permite definir una partición tan pequeña como se desee sin modificar sustancialmente los tiempos de cálculo.

Propiedades o atributos de las carenas derechas

Los cascos de los buques adquieren formas diversas, adecuadas para las misiones a las que estarán destinados, con algunas características comunes como son el afinamiento en la proa para disminuir las perturbaciones que esta genera en su avance, o las formas suaves de las popas para permitir el ingreso ordenado del fluido hacia el propulsor.

Estas formas no pueden ser representadas, en la mayoría de los casos, por superficies desarrollables matemáticamente, razón por la cual las propiedades asociadas no pueden ser determinadas en forma analítica, siendo necesaria la aplicación de métodos aproximados.

Tradicionalmente, la solución consistió en el tratamiento de áreas y volúmenes a partir de una perspectiva numérica del cálculo diferencial, mediante la discretización de las funciones en los intervalos de integración.

Actualmente nuevas metodologías introducidas por aplicaciones computacionales de manejo de volúmenes permiten determinar con mayor exactitud y celeridad estos parámetros.

Una descripción extensiva de estos atributos se detalla a continación, incluyendo modelos matemáticos desarrollados para el cálculo estimativo de alguno de ellos.

Volumen de carena y desplazamiento

El *volumen de carena* es el volumen de la parte sumergida del buque, definido por la superficie exterior del casco y el plano de flotación.

El líquido desplazado por el volumen de carena se denomina desplazamiento; a partir del *Principio de Arquímedes* se conoce que ambas cantidades, el volumen y el desplazamiento, están relacionadas mediante la expresión:

$$\Delta = \rho_{AGUA} \cdot \nabla \qquad [1.]$$

siendo Δ el desplazamiento, ∇ el volumen de carena y ρ_{AGUA} la densidad del medio fluido.

Este cálculo se realiza considerando las formas de trazado, sin considerar elementos exteriores a esas líneas. El forro del casco, hélice, timón, ejes, bocinas, arbotantes, etc. representan un desplazamiento adicional, pudiendo variar su porcentaje de acuerdo al porte de la embarcación. La porción correspondiente al forro puede variar entre el 85 y 99% del desplazamiento total de apéndices dependiendo del porte del buque y del material de construcción del casco, y por tanto se deberán hacer esfuerzos para su determinación con una buena aproximación.

Centro de Flotación

El *centro de flotación* es el centroide del área de flotación, punto por el cual pasan los ejes de giro de todas las flotaciones isocarenas.

De acuerdo con las definiciones de la estática del sólido, es el punto que cumple la condición de que el momento de primer orden respecto a cualquier eje que lo contenga, es nulo.

Posición longitudinal del centro de flotación

La *posición longitudinal del centro de flotación* es la distancia entre el centro de flotación y el eje de referencia longitudinal o perpendicular de popa.

$$LCF = X_F = \frac{M_y}{A_{FL}} \qquad [2.]$$

M_y es el momento de primer orden del área correspondiente a la flotación respecto al eje transversal de referencia.

Posición vertical y transversal del centro de flotación

Por tratarse de un punto perteneciente a un plano paralelo al plano de referencia, su posición vertical coincidirá con el calado $Z_F = T$ correspondiente a la flotación considerada.

Por su parte, la posición transversal del centro de flotación coincidirá con el eje de simetría cuya ordenada es $Y_F = 0$, en razón que los planos de flotación son normalmente simétricos respecto a la posición del plano de crujía, lo que se traduce algebraicamente en que el momento estático respecto a ese eje será nulo.

Centro de carena

La carena del buque, considerada como cuerpo geométrico formado por la porción sumergida del casco cerrada en su porción superior por el plano de flotación, tiene un centroide denominado *centro de carena*, cuyas coordenadas se determinan utilizando la metodología clásica de la estática del sólido al igual que en el caso del centro de flotación.

Posiciones longitudinal y vertical del centro de carena

$$LCB = X_B = \frac{M_{yz}}{\nabla} \qquad [3.]$$

$$VCB = Z_B = \frac{M_{xy}}{\nabla} \qquad [4.]$$

M_{yz} e M_{xy} son los momentos de primer orden longitudinal y vertical del volumen respecto al plano transversal por la perpendicular de popa y respecto al plano base respectivamente.

En el caso general la geometría del buque es simétrica respecto al plano de crujía y por tanto no será necesario determinar su posición transversal ya que estará ubicado sobre el propio plano de simetría, $Y_B = 0$.

Estimación de la posición vertical del centro de carena

Existen modelos matemáticos que permiten estimar la altura del centro de carena en función de distintas dimensiones del buque; estas fórmulas dan una buena aproximación para realizar cálculos preliminares, entendiéndose que no sustituyen en ningún momento los cálculos más precisos utilizando directamente las formas del buque.

Fórmula de Morrish

$$KB = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{5T}{2} - \frac{\nabla}{A_{FLl}}\right) \qquad [5.]$$

Donde

T es el calado del buque
∇ es el volumen de carena
A_{FL} es el área de flotación para el calado

Una segunda fomulación sin nominación conocida se presenta a continuación

$$KB = T \cdot \left(\frac{A_{fl}}{A_{FL} + \frac{\nabla}{T}}\right) \qquad [6.]$$

Como ejemplo, se estimará la posición vertical del centro de carena de un buque pesquero del cual se conocen los datos de las variables requeridas, y se compararán esos valores con el valor determinado por métodos matemáticos.

Calado	*3.875 m*
Área de la flotación	*368.4* m^2
Desplazamiento	*1028.6* m^3

La posición vertical del centro de carena como dato de las Curvas Hidrostáticas es *VCB = 2.336 m*, mientras que la aplicación de la formulación de Morrish resulta en un valor de *VCB = 2.298 m* (diferencia: 1.6 %) y la aplicación de la segunda formulación resulta en *VCB = 2.250 m* (diferencia 3.7 %), con lo cual se comprueba que ambos métodos ofrecen una aproximación relativamente buena para ser utilizada en etapas iniciales de diseño.

Radios metacéntricos transversal y longitudinal

Los *radios metacéntricos transversal y longitudinal* se corresponden respectivamente con los radios de giro instantáneos de la carena alrededor de los ejes longitudinal y transversal (perpendicular al plano de crujía).

A continuación se determinará la expresión anteriormente definida en forma genérica considerando el giro en el plano transversal, que es el caso de interés, pero es necesario indicar que la formulación tiene validez para el giro en el plano longitudinal.

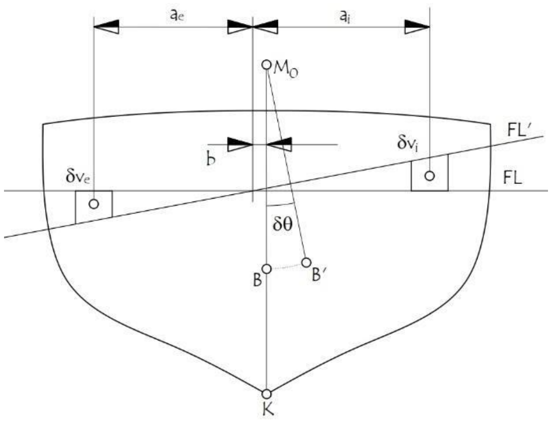

Fig. 1 - Determinación del radio metacéntrico

Se considera la Fig. 1 que representa un flotador cuyo volumen sumergido es ∇ para la posición inicial dada por la flotación *FL*, es forzado a tomar una posición final coincidente con la flotación *FL'*.

En este movimiento donde el volumen inicial y final son iguales al no variar el peso, el centroide inicial *B* se transforma en *B'*, siendo M_0 el metacentro inicial. Se calcularán los momentos estáticos respecto al plano normal que pasa por *B* de los volúmenes de las cuñas emergente e inmersa:

$$\nabla_0 \cdot BB' = \int [(a_e \cdot \delta s \cdot \delta\theta) \cdot (a_e + b) + (a_i \cdot \delta s \cdot \delta\theta) \cdot (a_i - b)] \quad [7.]$$

Donde δ*s* es la base que define el elemento diferencial de volumen de las cuñas y δθ es el giro infinitesimal producido en la posición del flotador. Desarrollando los términos de la ecuación anterior se obtiene:

$$\nabla_0 \cdot BB' = \int (a_e^2 \cdot \delta s \cdot \delta\theta) + (a_e \cdot b \cdot \delta s \cdot \delta\theta) - (a_i \cdot b \cdot \delta s \cdot \delta\theta) + (a_i^2 \cdot b \cdot \delta s \cdot \delta\theta) \quad [8.]$$

$$\nabla_0 \cdot BB' = \delta\theta \cdot \int (a_e^2 - a_i^2) \cdot \delta s + b \cdot \delta\theta \cdot \int (a_e - a_i) \cdot \delta s \quad [9.]$$

La primer integral corresponde al momento de inercia con relación al eje baricéntrico, mientras que la segunda es el momento de primer orden respecto al mismo eje, siendo cero el valor de esta última. Se puede deducir entonces que

$$BB' = \frac{I_0}{\nabla}\delta\theta \qquad [10.]$$

Como el movimiento de giro es infinitesimal, también podemos expresar

$$BB' = BM_0 \cdot \delta\theta \qquad [11.]$$

obteniendo la expresión para el radio metacéntrico

$$BM_0 = \frac{I_0}{\nabla} \qquad [12.]$$

Esta demostración es general y tiene validez para cualesquiera de los infinitos planos de giro que puede tomar la carena, por lo cual en forma particular se aplican a los giros en el plano transversal, *Radio Metacéntrico Transversal* (BM_T) y longitudinal, *Radio Metacéntrico Longitudinal* (BM_L), cuyas expresiones correspondientes se detallan a continuación:

$$BM_T = \frac{I_x}{\nabla} \qquad [13.]$$

$$BM_L = \frac{I_y}{\nabla} \qquad [14.]$$

I_y e I_x son los momentos de inercia transversal y longitudinal del área correspondiente a la flotación respecto a su centro de flotación.

Por su parte la posición vertical de los metacentros iniciales, definida como la distancia desde el plano de referencia o Plano Base hasta esos puntos, centros instantánesos de giro, se determina como :

$$VCMT = BM_T + VCB \qquad [15.]$$

$$VCML = BM_L + VCB \qquad [16.]$$

donde *VCB* es la posición vertical del centro de carena.

Es interesante analizar las expresiones de los radios metacéntricos transversal y longitudinal a los efectos de cuantificar de alguna manera sus valores, teniendo en cuenta que son indicativos de la estabilidad inicial en uno y otro caso.

En el caso del radio metacéntrico transversal, la inercia del plano de flotación en relación al eje longitudinal puede expresarse como:

$$I_x \approx \frac{L \cdot B^3}{12} = k_1 \cdot L \cdot B^3 \qquad [17.]$$

Por lo cual:

$$BM_T = \frac{k_1 \cdot L \cdot B^3}{\nabla} = \frac{k_1 \cdot L \cdot B^3}{C_B \cdot L \cdot B \cdot T} \qquad [18.]$$

Si se tiene en cuenta que la manga del buque es normalmente del mismo orden que el calado, esta última expresión puede transformarse en:

$$BM_T = k_1' \cdot T \qquad [19.]$$

lo que significa que el radio metacéntrico transversal es del mismo orden que el calado del buque. Es necesario entender que no se está estableciendo paralelismo alguno en relación con el valor numérico, sino simplemente un marco de referencia en el cual es razonable encuadrar dicho valor numérico. Una valoración más minusciosa indicará que el coeficiente de ajuste es menor a la unidad.

En el caso del radio metacéntrico longitudinal, la inercia del plano de flotación en relación al eje transversal puede expresarse como:

$$I_y \approx \frac{L^3 \cdot B}{12} = k_2 \cdot L^3 \cdot B \qquad [20.]$$

Por lo cual el radio metacéntrico transversal inicial se puede expresar como:

$$BM_L = \frac{k_2 \cdot L^3 \cdot B}{\nabla} = \frac{k_2 \cdot L^3 \cdot B}{C_B \cdot L \cdot B \cdot T} \qquad [21.]$$

En este caso, sabemos que L es de un orden superior a T, en cuyo caso podremos igualmente transformar la expresión anterior en la siguiente, teniendo en cuenta que el coeficiente debe tener en cuenta dicha circunstancia:

$$BM_L = k_2' \cdot L \approx L \qquad [22.]$$

Una valoración similar que en el caso anterior, indicará que dicho coeficiente es normalmente, mayor a la unidad. El análisis anterior muestra que el radio metacéntrico longitudinal inicial es del mismo orden que la eslora del buque. Nuevamente es necesario recordar que es una aproximación al comportamiento de esta magnitud y no a su valor numérico específico.

Como ejemplos de comparación, los radios metacéntricos transversal y longitudinal se muestran para dos tipos de buques diferentes en porte y formas. En ambos casos se verifica en todos sus términos el análisis comparativo y sus conclusiones, tanto para el radio metacéntrico transversal como para el longitudinal.

Arenas del Hum (Draga Arenera)

Eslora total (L)	*16.00 m*
Calado (T)	*1.20 m*
Radio metacéntrico transversal inicial (BM_T)	*1.64 m*
$\boldsymbol{BM_T = 1.4 \cdot T}$	
Radio metacéntrico longitudinal inicial (BM_L)	*17.46 m*
$\boldsymbol{BM_L = 1.1 \cdot L}$	

S. L. (Buque Tanque)

Eslora total (L)	*105.50 m*
Calado (T)	*5.80 m*
Radio metacéntrico transversal inicial (BM_T)	*3.94 m*
$\boldsymbol{BM_T = 0.7 \cdot T}$	
Radio metacéntrico longitudinal inicial (BML)	*119.49 m*
$\boldsymbol{BM_L = 1.1 \cdot L}$	

Cambio de desplazamiento por inmersión

Cuando se incorpora o quita un peso en un buque se producirá un cambio en la condición de flotabilidad que implicará un hundimiento o emersión del mismo que en general implica un nuevo posicionamiento angular de la flotación o nuevo trimado. El mismo fenómeno sucede cuando cambia la densidad del medio.

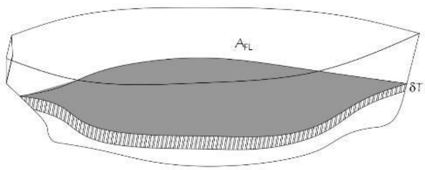

Fig. 2 - Cambio de volumen diferencial

Se considerará sólo el hundimiento paralelo, para lo cual se supondrá que el centro de gravedad de dicho peso coincide con el centro de gravedad del buque adrizado, y de tal magnitud que el nuevo desplazamiento no modifica en forma apreciable la posición longitudinal inicial del centro de carena.

La cantidad de agua desplazada cuando la embarcación tiene una variación de una fracción de calado infinitesimal, se puede aproximar a través de la siguiente formulación:

$$\delta\Delta = \delta T \cdot A_{FL} \cdot \rho \qquad [23.]$$

donde $\delta\Delta$ representa la variación de desplazamiento, A_{FL} es el área de la flotación o en forma equivalente, de la base del cilindro de líquido desplazado, y δT la altura de dicho cilindro correspondiente a la diferencia de calado entre la situación inicial y final; esta aproximación es cierta en la medida que δT sea lo suficientemente pequeño para considerar despreciable el incremento en el área A_{FL}. Si se divide por δT se obtiene el desplazamiento unitario:

$$\delta\Delta_u = \frac{\delta\Delta}{\delta T} = \cdot \frac{A_{FL}\cdot\rho}{k_1} \qquad [24.]$$

donde A_{FL} es el área de la flotación en m^2 y ρ es la densidad del líquido en kg/m^3.

Deberemos considerar $k_1 = 1$ si el asiento se expresa en *m*, mientras que deberá ser $k_1 = 100$ si el asiento quiere ser expresado en *cm*.

Momento de asiento unitario

El desplazamiento longitudinal del peso *w* establece una traslación paralela del centro de gravedad del buque, que de acuerdo al teorema de traslación de pesos se expresa de la siguiente manera:

$$(G' - G) \cdot \Delta = (g_f - g_i) \cdot w = w \cdot d \qquad [25.]$$

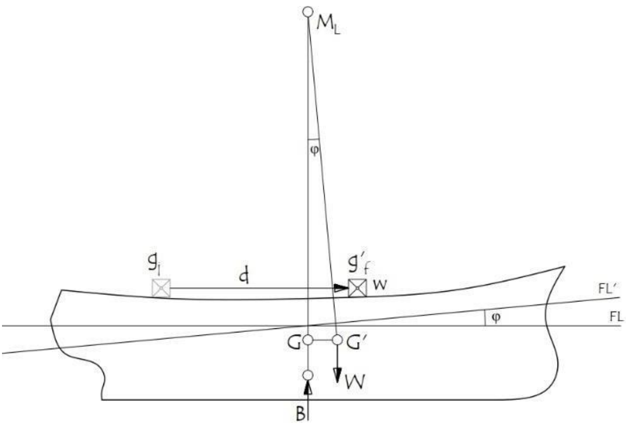

Fig. 3 - Trimado debido al movimiento longitudinal de un peso

Se genera así un momento de giro debido a la excentricidad de las fuerzas en su nueva posición, provocando entonces el movimiento de la carena buscando una nueva posición de equilibrio.

Una vez que el centro de carena se vuelve a alinear con el nuevo centro de gravedad se eliminan los efectos de la acción inicial, habiéndose producido un asiento *t.*

Se considerará que el peso movido es suficientemente pequeño como para producir un giro infinitesimal, por lo cual se puede considerar despreciable la diferencia entre la superficie de la flotación inicial y la girada.

También debemos considerar trimados relativamente despreciables, de manera de poder identificar las áreas de flotación giradas con las áreas de flotación de las carenas derechas. Esto limitará la magnitud de los asientos para la aplicación de esta formulación; un criterio utilizado y aceptado indica que el asiento debería ser menor que la clara entre dos planos de agua.

También se cumple, en el triángulo $GG'M_L$, la relación geométrica

$$(G' - G) = GM_L \cdot tg\theta \qquad [26.]$$

Analizando en conjunto las ecuaciones anteriores se puede deducir la siguiente igualdad:

$$\Delta \cdot GM_L . tg\theta = w \, . d \qquad [27.]$$

de donde resulta

$$tg\theta = \frac{p \cdot d}{\Delta \cdot GM_L} = \frac{M}{\Delta \cdot GM_L} \qquad [28.]$$

Por otro lado, el asiento se define como la diferencia de calados y geométricamente se calcula como:

$$\mathrm{t} = tg\theta \cdot L_{PP} \qquad [29.]$$

Luego comparando las ecuaciones [28.] y [23.] obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{M}{t} = \frac{\Delta \cdot GM_L}{L_{pp}} \qquad [30.]$$

Cuando el asiento *t* equivale a la unidad, el momento *M* se transforma en lo que se denomina *Momento de Asiento Unitario*, *MAU*:

$$MAU = \frac{\Delta \cdot GM_L}{L_{pp}} \qquad [31.]$$

Expresado de esta manera, el momento de asiento unitario no es un atributo de carena derecha en la medida que en su formulación aparece un término que depende de la configuración de carga, como es la altura metacéntrica.

En la práctica real, dada la posición vertical del metacentro longitudinal, los valores de GM_L son relativamente equivalentes a los del radio metacéntrico longitudinal BM_L, por lo cual este último se puede sustituir por el anterior con una muy buena aproximación obteniendo de esta manera una expresión que se transforma efectivamente en un atributo de carena derecha:

$$MAU = \frac{\Delta \cdot BM_L}{k_2 \cdot L_{pp}} \qquad [32.]$$

Donde Δ es el desplazamiento de la carena, BM_L es la denominada altura metacéntrica longitudinal, L_{PP} es la eslora entre perpendiculares, y $k_2 = 100$ si el asiento está expresado en *cm* o $k_2 = 1$ en caso de expresarlo en *m*.

Corrección de desplazamiento por trimado

Cuando el buque tiene condiciones iniciales de asiento no nulo, la determinación del desplazamiento y demás atributos se puede aproximar utilizando el calado en la sección media de la flotación *FL'*, esto es, el promedio de los calados sobre las perpendiculares de proa y popa. La flotación de la carena derecha para ese punto de referencia es *FL''*.

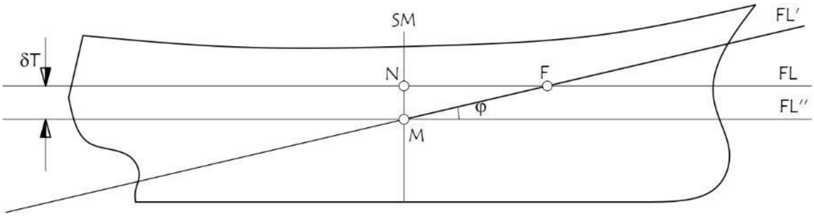

Fig. 4 - Corrección de desplazamiento por asiento

Sin embargo, el giro de la flotación se produce en el punto *F*, centro de flotación, y no en el punto *M*, y de esta manera se comete un error porque los atributos buscados corresponden a la flotación isocarena *FL* que pasa por *F*. La magnitud del error cometido dependerá de la posición longitudinal del centro de flotación.

Para asientos de naturaleza marginal o limitados de acuerdo a un criterio que podría establecerse en una clara entre planos de agua, normalmente este error se corrige teniendo en cuenta la posición del centro de flotación, de acuerdo al procedimiento que se explica a continuación.

El calado en la sección media de la flotación *FL'* (girada) corresponde al calado medio de la flotación de la carena derecha *FL''*, pero el calado medio de *FL'* se corresponde con el calado en la sección media de la flotación *FL*. La diferencia de desplazamientos está representada por la rebanada comprendida entre *FL* y *FL''*.

Para determinar el desplazamiento de la porción diferencial, se debe determinar la diferencia de calados δT entre las flotaciones *FL* y *FL''*, que corresponde al segmento definido como *MN* en la figura. La magnitud de este segmento se puede calcular como

$$\delta T = MN = (\frac{L_{PP}}{2} - LCF) \cdot tg\varphi \qquad [33.]$$

Recordando que $t = tg\theta \cdot L_{PP}$, podremos transformar la anterior expresión en la siguiente:

$$\delta T = \frac{(\frac{L_{PP}}{2} - LCF) \cdot t}{L_{PP}} \quad [34.]$$

Esta diferencia de calado δT debe sumarse (algebraicamente) al calado medio considerado inicialmente para la línea de agua *FL''*.

Cuando se divide δT por *t* se obtiene una cantidad que representa la diferencia de calado por centímetro de asiento:

$$\delta u = \frac{(\frac{L_{PP}}{2} - LCF)}{L_{PP}} \quad [35.]$$

El volumen de la porción diferencial entre ambas flotaciones se puede expresar entonces como

$$\delta \Delta_u = \frac{(\frac{L_{PP}}{2} - LCF) \cdot A_{FL} \cdot \rho}{k_3 \cdot L_{PP}} \quad [36.]$$

Donde $k_3 = 100$ si el asiento está expresado en *cm* o $k_3 = 1$ en caso de expresarlo en *m.*

Como fue observado anteriormente, para un asiento importante, del orden por ejemplo de la distancia entre planos de agua y mayor, no es de aplicación la hipótesis de que la variación del área de flotación es despreciable y por lo tanto se cometerá un error significativo al determinar la diferencia de desplazamiento sobre esas bases.

En ese caso es necesario utilizar una metodología más apropiada, como por ejemplo los Diagramas o Curvas de Bonjean que se detallarán posteriormente y que permiten determinar el desplazamiento dados los calados sobre las perpendiculares de proa y popa.

Coeficientes de forma

Los coeficientes de forma son relaciones adimensionales que se establecen para evaluar de una manera objetiva la geometría de las embarcaciones; estos coeficientes establecen una medida de una determinada característica del buque relacionada con su geometría y particularidades marineras.

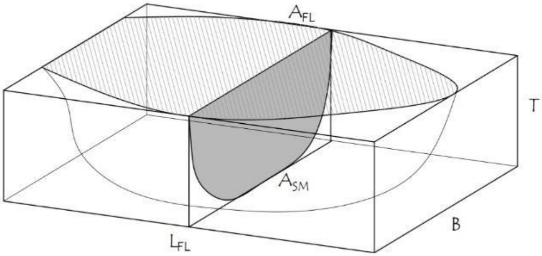

Fig. 5 - Esquema básico para el cálculo de los coeficientes de forma

A modo de ejemplo se puede establecer que un coeficiente de bloque cercano a la unidad indica un casco de formas llenas, lo que implica una velocidad de servicio limitada.

Coeficiente de bloque

Es la relación entre el volumen de desplazamiento hasta una cierta flotación y el volumen del prisma definido por la eslora, la manga y el calado correspondiente.

$$C_b = \frac{\nabla}{L_{FL} \cdot B \cdot T} \qquad [37.]$$

Coeficiente de sección media

Es la relación entre el área sumergida de la sección media y el área del rectángulo circunscrito cuyas dimensiones son la manga y el calado correspondientes a la flotación.

$$C_{sm} = \frac{A_{SM}}{B \cdot T} \qquad [38.]$$

Coeficiente prismático

Es la relación entre el volumen de desplazamiento hasta una cierta flotación y el volumen del prisma cuyo largo es la eslora y su sección transversal coincide con el área de la sección media hasta el correspondiente calado.

$$C_p = \frac{\nabla}{L_{FL} \cdot A_{SM}} = \frac{C_b}{C_{SM}} \qquad [39.]$$

Este coeficiente también es conocido como coeficiente longitudinal por ser una indicación de la distribución longitudinal del desplazamiento.

Dicha distribución tiene gran influencia sobre la resistencia residual del casco a una velocidad dada y por tanto este coeficiente es utilizado en conexión con la determinación de este parámetro.

Coeficiente de flotación

Es la relación entre el área de la flotación y el rectángulo que la circunscribe, cuyas dimensiones son la eslora y la manga de dicha flotación.

$$C_{FL} = \frac{A_{FL}}{L_{FL} \cdot B} \qquad [40.]$$

Este coeficiente se refiere normalmente a la flotación de diseño o máxima carga, a menos que se establezca de otra manera.

Superficie mojada

La determinación de la superficie mojada es de suma importancia a los efectos de la determinación de la resistencia del buque, del peso total del forro del casco y la cantidad de pintura necesaria para su recubrimiento; desde el punto de vista del diseño arquitectónico o el manejo a bordo no representa un dato relevante.

Un método sencillo de cálculo de dicha superficie consiste en la determinación de las que se podría denominar curvas de perímetros seccionales. Para un calado dado se determinan los semiperímetros seccionales tomados desde la quilla hasta el borde de la flotación, y se grafican a lo largo de la eslora, obteniendo la curva conocida como expansión transversal de la superficie de construcción.

Su integración mediante alguno de los métodos numéricos permite conocer el área de la superficie mojada con una incertidumbre no mayor al 2%. De ser necesario una mayor precisión, se deberán utilizar métodos alternativos como la rectificación de las curvas de flotación o el método de secantes para modificar las curvas de semiperímetros (Godino Gil, 1934) (SNAME, 1967).

Por su parte se han desarrollado modelos matemáticos cuyas formulaciones establecen una aproximación del área de la superficie mojada del casco en función de parámetros geométricos, aplicables a algunos tipos de buques, que pueden resultar de utilidad para su estimación en etapas tempranas de diseño; algunas de éstas se describen a continuación.

Método de Kirk

Se expone a continución este método relativamente primitivo que ha sido expuesto en algunas referencias consultadas pero sin tener una referencia exacta de su origen.

Se aproxima el casco del buque mediante un prisma compuesto por una sección central paralela y secciones triangulares en los extremos, siendo su altura T el calado de la embarcación y b' el ancho igual al cociente entre el área de la sección maestra y el calado

$$b' = \frac{A_M}{T} \quad [41.]$$

La altura del triángulo que se proyecta en proa y popa tiene una dimensión dada por

$$h = L - \frac{\nabla}{b' \cdot T} = L - \frac{\nabla}{A_M} \quad [42.]$$

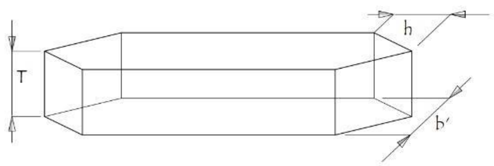

Fig. 6 - Esquema de carena, método de Kirk

En estas condiciones, se determina el área lateral y fondo mediante la siguiente formulación:

$$S = 2 \cdot L' \cdot T + \frac{\nabla}{T} \quad [43.]$$

Donde L' es la medida del semiperímetro del área de la base del prisma, que se establece como una eslora de cálculo a los efectos del método. La superficie calculada de esta manera excede de la superficie real aproximadamente en un *8 %* para buques de formas finas, *3 %* para los buques de porte medio y *2 %* para los buques de formas llenas con cuerpo paralelo.

Fórmula de Denny

Esta formulación es similar a la presentada por el método de Kirk, pero su desarrollo se basa en el estudio de formas de cascos reales, transformándose en un modelo matemático más ajustado.

$$S = 1.7 \cdot L \cdot T + \frac{\nabla}{T} \quad [44.]$$

Donde S es la superficie mojada medida en ft^2, L la eslora entre perpendiculares en *ft*, T el calado hasta la flotación en *ft* y ∇ el volumen de desplazamiento en ft^3.

La fórmula sugerida por A. Denny es aplicable en buques de carga u otros de velocidad moderada y de formas suaves y llenas. (Denny, 1895)

Fórmula de Taylor

$$S = C\sqrt{\Delta \cdot L} \quad [45.]$$

Donde S es la superficie mojada medida en ft^2, L la eslora entre perpendiculares en ft, Δ es el desplazamiento hasta la flotación en *long ton*[1], y C es un coeficiente que depende de otras variables, con un valor promedio $C = 15.4$.

La fórmula sugerida por D. E. Taylor se aplica en embarcaciones de formas esbeltas. (Taylor, 1910)

Curvas de áreas seccionales o Diagramas de Bonjean

Según fue mencionado en párrafos anteriores, es inconveniente determinar la variación del desplazamiento utilizando las curvas hidrostáticas cuando el asiento es de tal magnitud que no es posible aproximar la flotación girada con la flotación de una carena derecha. El error que se comete en ese caso no es admisible y por tanto es necesario la utilización de un método alternativo para la determinación del desplazamiento y el correspondiente centro de carena.

Las Curvas o diagramas de Bonjean, desarrolladas por el ingeniero naval homónimo en el siglo *XIX*, son las curvas que muestran la relación del área seccional en función del calado para las distintas secciones en que se divide la eslora. Normalmente se incluyen dentro de esta clasificación las curvas de momentos estáticos respecto a los planos de referencia.

Dada una sección transversal el procedimiento consiste en determinar las áreas seccionales para distintas alturas o calados generando una nueva curva de áreas para los correspondientes calados; de la misma manera se procede con los momentos respecto al plano de base de cada una de estas áreas, obteniéndose la curva de momentos estáticos seccionales (Fig. 7).

El procedimiento para calcular un desplazamiento consiste en determinar sección por sección las alturas de los puntos de intersección de la línea o curva de flotación con cada una de éstas (Fig. 8).

Se definen luego en el diagrama, las ordenadas de la curvas de áreas que corresponderán a las secciones por debajo de la flotación, como se muestra en la figura.

Una vez determinadas todas las áreas de sección, éstas se integran mediante alguno de los métodos vistos anteriormente y se determina el volumen de carena; de la misma manera, trabajando con los diagramas de momentos de primer orden del volumen respecto al plano de base o plano de crujía se obtendrán los momentos volumétricos correspondientes.

---

[1] *Una tonelada larga (long ton) equivalía a 2240.0 libras o1016.0 kilogramos*

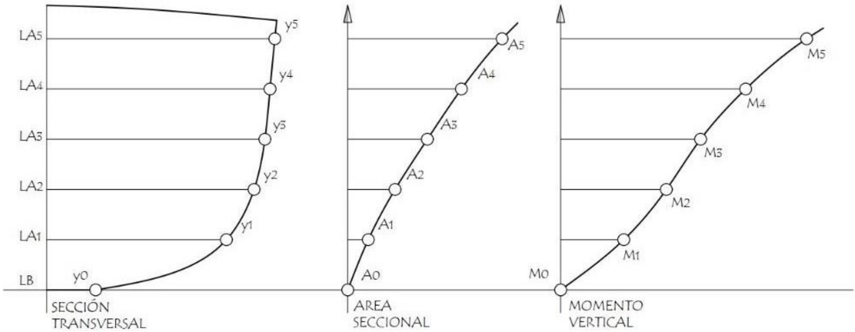

Fig. 7 - Curvas de áreas y momentos seccionales

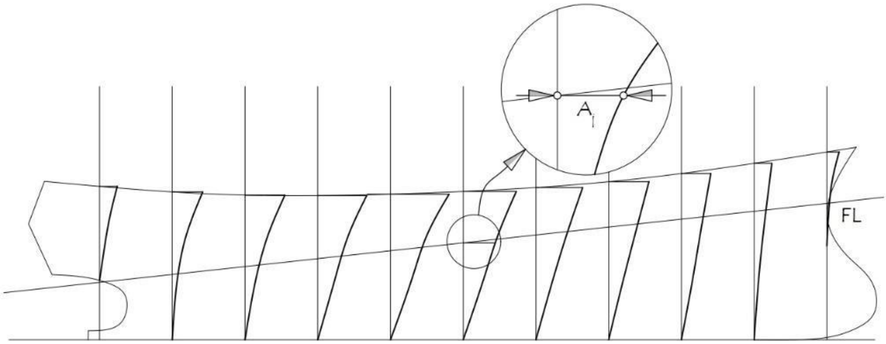

Fig. 8 – Medidas en el diagrama de áreas de sección

Dada la flexibilidad del método, es posible determinar el volumen de carena y la posición del centro de carena tanto cuando se produce un asiento como cuando el buque se encuentra sobre una ola de parámetros conocidos.