

ESFUERZOS SOBRE EL CASCO (3)

Preparado por
Ing. Boris L. GUERRERO B.

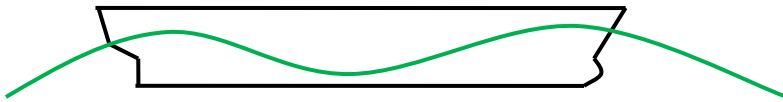
Valparaíso, CHILE, 2012.

INDICE DE MATERIAS

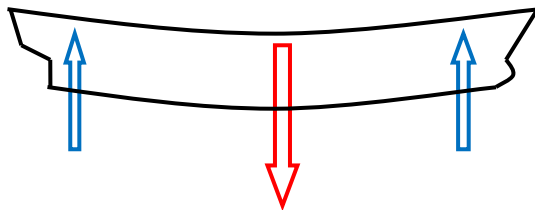
El barco como viga. Arrufo	3
Quebranto	4
Fuerzas que actúan sobre el casco	6
Peso de la nave vacía	6
Fuerzas de flotabilidad	7
Peso muerto o dead weight	9
Generación de esfuerzos en un trozo de popa	10
Esfuerzo de corte	10
Momento flector	11
Uso de programas computacionales	13
Curvas de Bonjean	14

EL BARCO COMO VIGA

Una nave que se encuentra a flote es, estructuralmente, una viga que se encuentra sometida a diferentes fuerzas distribuidas, fuerzas puntuales, presiones, torsiones, momentos de fuerzas, pares de fuerzas, esfuerzos térmicos, etc.



Uno de los casos más desfavorables para la estructura de una nave se presenta al navegar en una mar que tenga un largo de ola (distancia entre crestas de las olas) parecido a la eslora de ella. En el gráfico se puede apreciar que en la proa y la popa existirá una considerable fuerza de boyantez o flotabilidad hacia arriba, por efecto de las olas, en cambio en la parte central existirá poca flotabilidad y el peso del barco ejercerá una fuerza hacia abajo, por lo que las fuerzas externas que actúan sobre el casco serían las indicadas en el siguiente gráfico:



El barco-viga se curvará, ya que el acero es elástico. Se dice que el casco sufrirá un “arrufo” (sagging, en idioma inglés). Esto implica que la parte superior de la viga, o sea la cubierta, estará sometida a un esfuerzo de

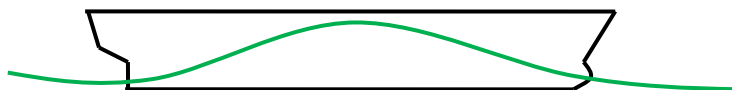
‘compresión’. Lo mismo sucederá con las cubiertas que estén más arriba de la cubierta principal, como así mismo de algunas de ellas que estén bajo ella.

En cambio las planchas y refuerzos estructurales del fondo del casco (bottom) estarán sometidos a un esfuerzo de ‘tensión’.

El autor recuerda haber realizado una inspección a una nave de unos 170 metros de eslora que sufrió un arrufo considerable y que presentaba en su cubierta principal “ondulaciones” de unos 50 centímetros de altura, de banda a banda. Ese material debió renovarse debido a la deformación plástica que había sufrido.

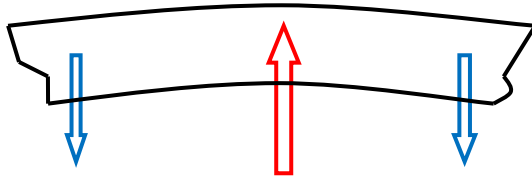
Existirá una sección horizontal que no estará sometida a tensión ni a compresión, en una posición intermedia entre la cubierta principal y el fondo del casco, que será la sección ‘neutra’.

La ola continuará pasando con respecto al casco. Analizaremos lo que sucede cuando la cresta de ella llegue a la parte central de la nave, como se indica en el gráfico que sigue:

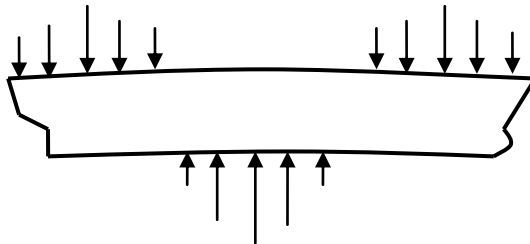


Las fuerzas analizadas anteriormente se invierten y tendremos una gran fuerza de boyantez actuando en la parte central de la nave y muy poca flotabilidad en la proa y en la popa, por lo que los pesos de ellas actuarán hacia abajo. El casco se curvará también en forma contraria a la anterior sufriendo el casco lo que se llama un “quebranto” (hogging, en idioma inglés).

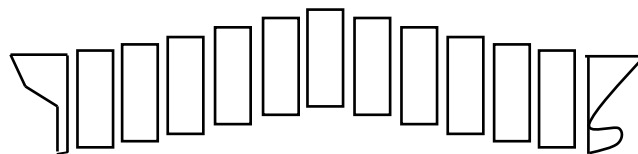
En este caso la cubierta principal y sus refuerzos longitudinales trabajarán en 'tensión' y el fondo, con la quilla y refuerzos longitudinales estarán sometidos a 'compresión'.



Las naves con caseríos a popa tienen una tendencia natural al **quebranto**, debido al peso de la maquinaria y caserío y a los pesos de proa que deben cargarse para disminuir el asiento, normalmente lastre. También influye la gran boyantez o flotabilidad de la parte central del casco. Suele suceder que se diseñen esas naves de tal forma que tengan más resistencia al quebranto que al arrufo.

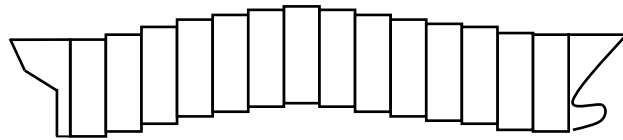


Si el casco estuviera formado por pontones que pudieran deslizarse entre ellos, tomarían la forma indicada a continuación:



Entre los pontones NO existiría fuerza que inter actuara entre ellos..... Pero al no poder deslizarse, el casco tomará la forma indicada en el gráfico que sigue a continuación, con una deformación menor que en el caso anterior.

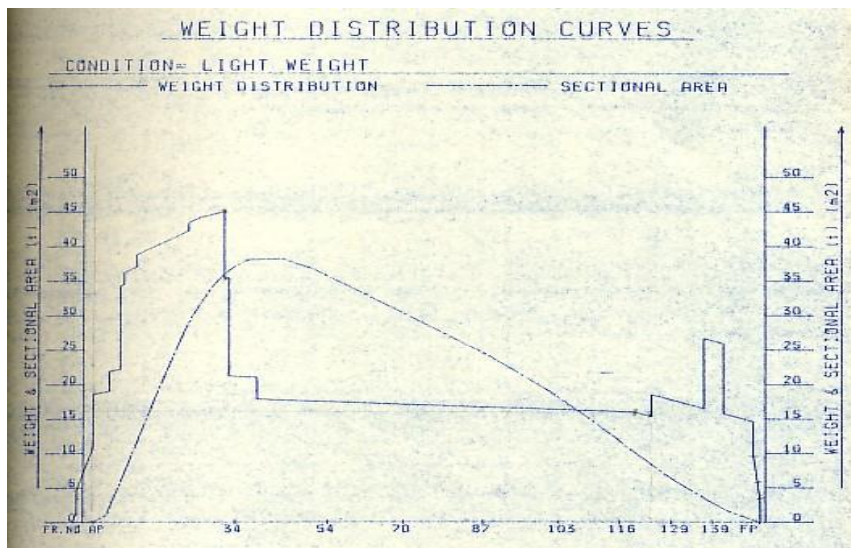
Entre los límites de los pontones imaginarios existirán esfuerzos que los mantienen unidos (SF y BM). Estos pontones representan las infinitas secciones transversales que podríamos considerar que conforman la nave. Desde ya podremos asumir que ‘todas’ estas secciones transversales están siendo sometidas a esfuerzos. El trabajo del encargado de la estiba del barco será controlar que “siempre” estos esfuerzos estén dentro de los límites aceptables, de acuerdo a los cálculos de los diseñadores de la nave.



Fuerzas que actúan sobre el Casco

- a) Una componente importante es el peso de la nave vacía (Light Ship)

Los Astilleros proporcionan un gráfico de su distribución a lo largo de la eslora, en TM/metro de eslora. En el gráfico que se muestra a continuación se puede apreciar la distribución de pesos del ‘barco liviano’ (light ship) de un petrolero relativamente pequeño



La línea llena representa la distribución de pesos del 'barco liviano' y la línea de segmentos indica el área de las secciones transversales. En el sector izquierdo del gráfico (correspondiente a la popa) las líneas son más altas debido al peso de las maquinarias motrices y auxiliares y al peso de la superestructura.

Si se integra el área bajo la curva se obtendrá el peso del barco liviano (Light Ship).

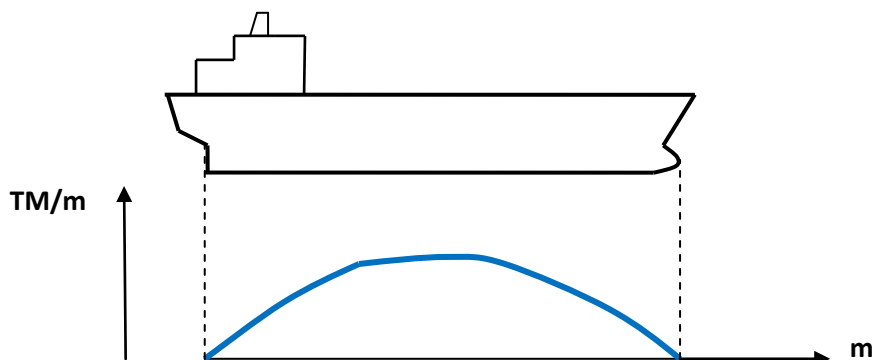
La posición longitudinal del centro geométrico o baricentro del gráfico corresponde a la posición longitudinal del Centro de gravedad del barco liviano.

Lamentablemente es poco frecuente que se cuente con este gráfico, tanto abordo como en las oficinas técnicas.

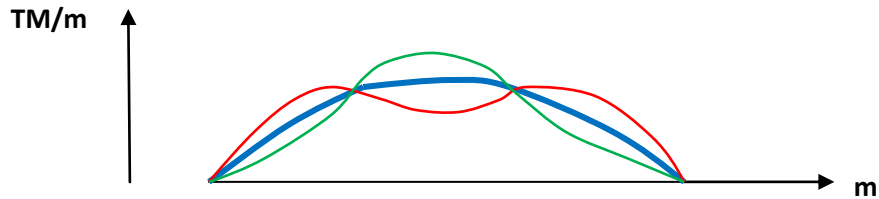
- b) Otra componente importante entre las fuerzas que actúan sobre el casco es la Flotabilidad o Boyantez.

Para los calados existentes tendrá una forma similar a la línea azul del gráfico inferior, en TM/metro de eslora, en aguas quietas. Las olas, indudablemente, pueden cambiar la forma de la curva de distribución de las fuerzas de boyantez.

La forma de calcular la Boyantez es mediante las Curvas de Bonjean, las que se describirán posteriormente



Si se integra el área bajo la curva se obtendrá el desplazamiento, en toneladas métricas (TM), el que será igual al peso de la nave, si flota libremente. El centro geométrico de esta área corresponderá a la posición longitudinal del centro de boyantez (Mid B o LCB).

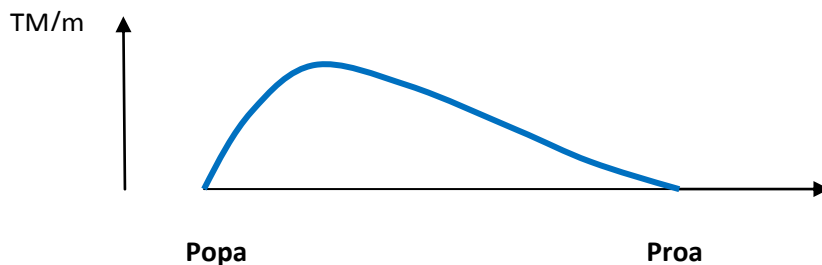


Si la nave es sometida a la acción de una ola cuya amplitud es cercana a la eslora, la curva de boyantez será parecida a la curva roja, al estar el seno de la ola en la sección media del barco, o sea con sus crestas cerca de la popa y de la proa. Dichas flotabilidades tratarán de producir 'arrufo' en el casco.

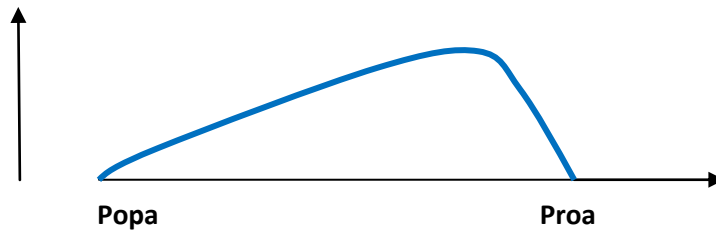
Al avanzar la ola y llegar la cresta a la sección media la curva de boyantez tomará una forma parecida a la curva verde. El casco estará sometido a un 'quebranto'.

Las curvas anteriores corresponden a una nave que no tiene mucho asiento ni encabuzamiento. Si existiera una considerable diferencia entre los calados de proa y popa las curvas de flotabilidad tratarían de tomar las siguientes formas, en aguas quietas:

Para nave 'sentada':



Para nave 'encabuzada':



Otras fuerzas que actúan sobre el casco son los pesos que forman el 'peso muerto' (dead weight), o sea la carga, los lastres, los combustibles, víveres, etc.

Los gráficos de los pesos muertos sumados a los gráficos del 'barco liviano' deberán ser igual al gráfico de las boyanteces (o flotabilidades).

Aplicando las sumatorias entre todas las fuerzas descritas podremos obtener las resultantes para los sectores que analicemos, con lo que podremos construir los diagramas de SF y BM.

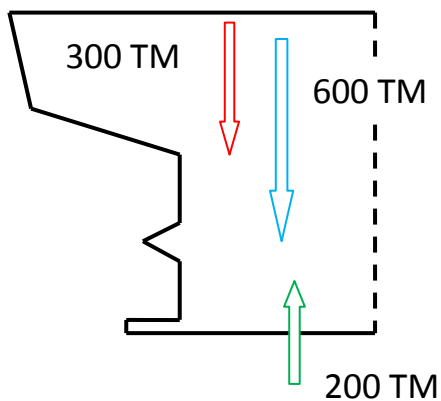
Para calcular la fuerza de empuje o boyantez es necesario determinar el volumen sumergido del casco o de una parte de él. Para facilitar este cálculo se han desarrollado las **Curvas de Bonjean**, las que se describirán posteriormente, al final del presente capítulo.

- c) Las terceras fuerzas que actúan sobre el casco son todos los pesos que conforman el "PESO MUERTO" (o Dead Weight), vale decir los lastres, combustibles, lubricantes, cargas, peso de la constante, etc...

Vale decir, si tomamos un "trozo" de buque como 'cuerpo libre' podremos analizar estos tres tipos de fuerzas que actúan en dicha sección y así podremos calcular los ESFUERZOS que se producen en las secciones estructurales que estamos analizando. La función del oficial que controla los esfuerzos sobre el casco será cargar la nave de tal forma que **nunca** dichos esfuerzos sobrepasen los permitidos por el diseñador del barco.

Veremos cómo se producen los esfuerzos en las diferentes partes estructurales de la nave.

Tomemos la popa de un buque, como un “cuerpo libre”, en el espacio, afectada por todas las fuerzas activas y reactivas que actúan “**SOBRE ELLA**”.



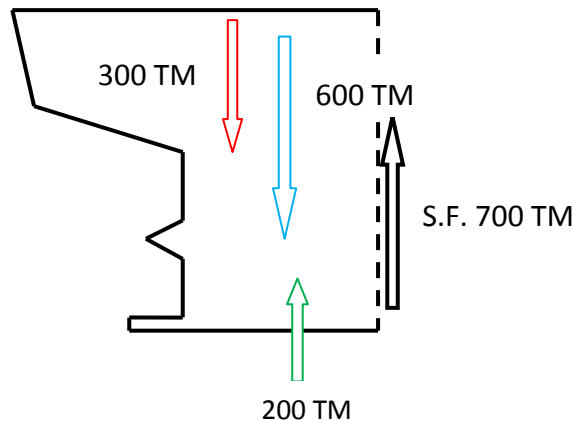
Supongamos que el trozo de popa (de buque vacío o light ship) pesa 600 TM (vector celeste), las cargas o pesos muertos valen 300 TM (vector rojo) y la flotabilidad, de bajo valor por la forma de la popa, pesa 200 TM (vector verde). Esto nos da una fuerza resultante de

$$600 \text{ TM} + 300 \text{ TM} - 200 \text{ TM} = 700 \text{ TM hacia abajo}$$

Vale decir, la popa está tratando de caerse con una fuerza de 700 TM, pero indudablemente NO se cae. ¿Quién la sostiene? EL RESTO DE LA NAVE, con una fuerza de 700 TM ‘hacia arriba’.

Veamos la sección límite del cuerpo libre, mostrado con línea de segmentos, que es nuestra sección de análisis. Apreciamos que justo a la izquierda de dicho límite tenemos un trozo de nave que esta ‘tratando’ de bajar con una fuerza de 700 TM y que a la derecha de la sección el ‘resto del barco’ está haciendo una fuerza ‘hacia arriba’. O sea justo en la sección de análisis existe un **esfuerzo de corte** o shearing force (S.F.), representado por el vector “equilibrante” de 700 TM hacia arriba. De esta forma se generan los esfuerzos de corte.

En el gráfico inferior se muestra el vector que representa el esfuerzo de corte. (vector negro)

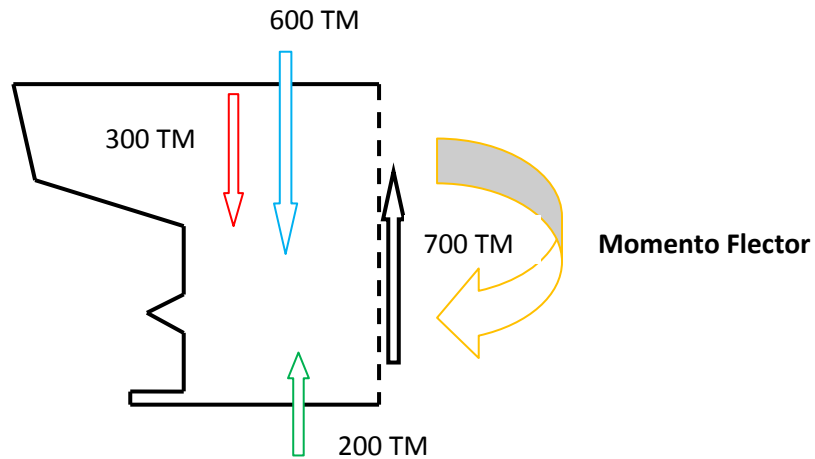


Entre la popa y la línea de segmentos existen infinitas posibles secciones que podríamos haber analizado, y cada una de ellas tendrá su respectivo esfuerzo de corte que está equilibrando las fuerzas que están a la izquierda de ella. Podemos concluir por lo tanto, que todas las secciones están sometidas a esfuerzos de corte. El diseñador de la nave deberá calcular las planchas y refuerzos estructurales puedan resistir los mayores esfuerzos de corte que puedan presentarse en la situación más desfavorable.

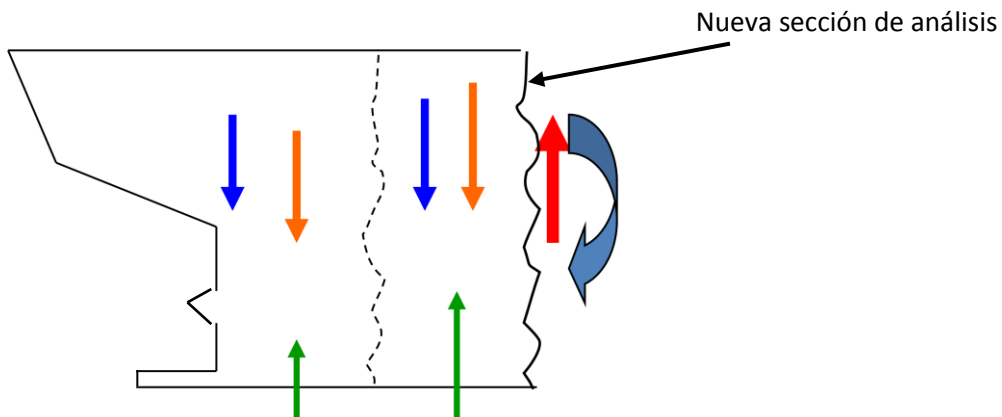
Si observamos el gráfico anterior veremos que ahora sí hay equilibrio de las fuerzas verticales, pero que el cuerpo libre tendría una tendencia a “girar” en sentido anti-horario. ¿Qué lo impide? El resto de la nave que está hacia la derecha de él. Podríamos calcular el valor del momento producido por las fuerzas verticales. En la sección de análisis (línea de segmentos) deberá aplicarse un momento igual y contrario al momento producido que ahora sí permitirá que el cuerpo libre esté en perfecto equilibrio. Este momento equilibrante es el “momento flector” (bending moment [BM]).

Igualmente podremos deducir que las infinitas secciones transversales de la nave estarán sometidas a momentos flectores. En el gráfico que se muestra a

continuación estarán representadas las fuerzas y el momento (BM) que permitirán que el cuerpo libre esté en equilibrio estático.



Podríamos ir agregando al cuerpo libre nuevas secciones, para estudiar el comportamiento de los nuevos esfuerzos que se generarían, tal como se muestra en el gráfico que se incluye a continuación:



El esfuerzo de corte y el momento flector que se obtuvieron anteriormente se equilibrarán con las fuerzas componentes (acción y reacción).

En el nuevo cuerpo libre procederemos con el mismo procedimiento anterior, o sea

- a) Calculamos la resultante de todas las fuerzas verticales. El esfuerzo de corte en la nueva sección de análisis (límite de la sección agregada con el resto de la nave) será el vector igual y contrario a la resultante y actuará justo en la nueva sección de análisis.
- b) Calculamos la sumatoria de momentos con respecto a la nueva sección de análisis. El momento flector (BM) será el momento equilibrante, o sea un momento igual y contrario al momento resultante obtenido anteriormente.

Uso de Programas Computacionales

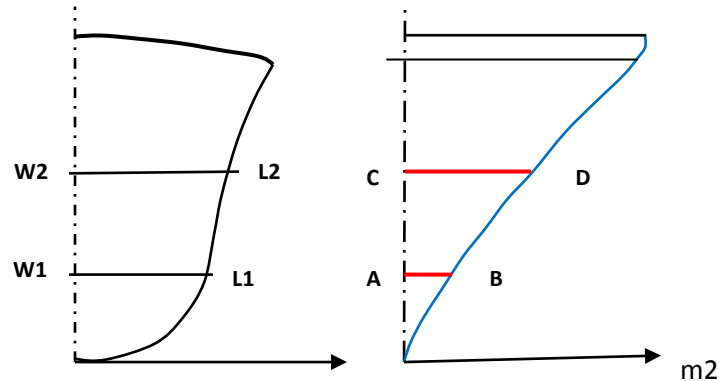
El cálculo manual de los esfuerzos es, prácticamente, NO posible de realizar, especialmente por el cálculo de las fuerzas de flotación que se originan en cada sección. Algunos Manuales de Estabilidad (Stability Booklet) entregan disposiciones de cálculo que permiten calcular los esfuerzos con una relativa facilidad, especialmente si dichas disposiciones se convierten en planillas computacionales (Excel, por ejemplo).

Los programas computacionales sí nos permitirán tener una rápida respuesta que permita simular cualquier condición de carga, pudiendo hacerse un plan de carga que asegure que en todo momento la nave estará dentro de los parámetros permitidos por el constructor.

Normalmente se exige analizar los esfuerzos en ciertos planos verticales críticos que normalmente son los mamparos entre bodegas y el mamparo entre la bodega de popa y el departamento de máquinas. Los límites de esfuerzos en esos mamparos han sido calculados por los constructores de la nave y aprobados por las Casas Clasificadoras.

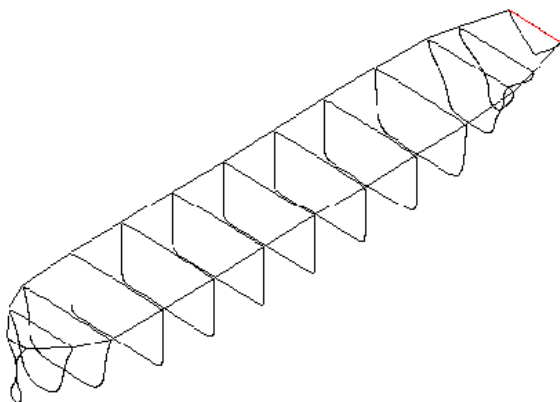
APÉNDICE

Curvas de Bonjean.



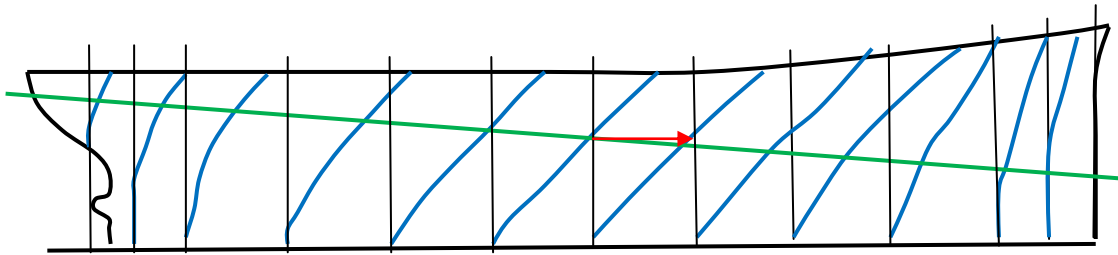
El gráfico de la izquierda representa la semi-área de una sección cualquiera de una nave. Supongamos que hemos calculado el valor del área de la sección comprendida entre la quilla y la línea de agua W_1L_1 . Esta área la representaremos, mediante una escala conveniente, por un trazo AB, el que lo dibujamos en el gráfico de la derecha a la misma altura de la línea de agua. Si la misma operación la repetimos para diferentes líneas de agua podremos obtener la función gráfica (línea azul) que represente las áreas de las semi-secciones transversales para sus correspondientes líneas de agua. Esta línea azul sería la **Curva de Bonjean** para esa sección transversal.

Normalmente se hace el mismo cálculo para 10 o 20 secciones transversales, según sea el tamaño de la nave. En la proa y en la popa se pueden calcular secciones intermedias para obtener más exactitud en esa zona de forma complicada.



Secciones transversales

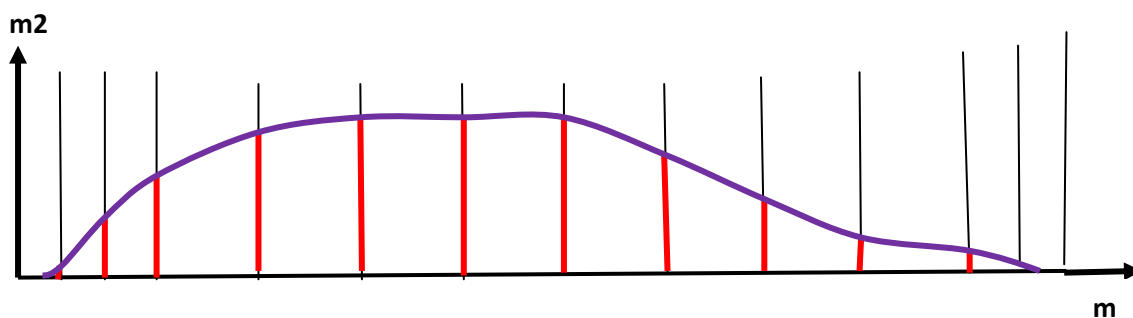
Se obtendrán así las diferentes curvas que representan las áreas de las secciones transversales, como se indica en el gráfico que se adjunta a continuación.



Las líneas azules corresponden a las Curvas de Bonjean.

Por ejemplo, si quisiéramos calcular el área bajo la línea de agua (o semi área) de la quinta sección transversal desde la proa, deberíamos trazar una horizontal desde la intersección de la línea de agua con la sección, hasta corta la curva de Bonjean correspondiente. Ese trazo, al aplicarle la escala nos dará el área (o semi área). El trazo se muestra como una flecha roja.

Se puede trazar un nuevo gráfico en que indiquen en las ordenadas las áreas obtenidas mediante las Curvas de Bonjean, como se indica a continuación:



Ya que en las ordenadas tenemos las áreas de las secciones transversales, en m^2 , si integramos el área bajo la curva, obtendremos el volumen del casco sumergido (obra viva).

Usando las Curvas de Bonjean se puede calcular otros volúmenes de una nave, por ejemplo, de una bodega. Para ello se considera como calado la altura de la bodega sobre la quilla y se le resta el volumen correspondiente a los doble-fondos, dentro de los límites longitudinales que corresponda. En los requisitos de ascenso de Piloto 2º a Piloto 1º se pide calcular el volumen de una bodega extrema, lo que se puede realizar con el procedimiento descrito anteriormente.

En el gráfico que se muestra a continuación se muestra unas Curvas de Bonjean de un petrolero. Todas las curvas se dibujaron a partir de un mismo punto común.

