

## Charla 3ª sobre construcción naval

### Tema XIII: La resistencia debida al "sistema de olas"

#### 2ª Parte

"Un experto es un hombre que ha cometido todos los errores posibles en un campo muy pequeño"  
Niels Bohr (1885-1962), científico danés.

**Simbad:** ¿A sí, y cuales son?

**Capitán Isidore Caubin:** La parte aerodinámica del navío u obra muerta, resiste al avance (Viento contrario, etc.) así como la que ahora nos interesa o parte sumergida, carena u obra viva. Pero otro fenómeno especial o resistencia, se agrega a lo que hemos dicho.

Cuando el navío se desplaza, la superficie del agua se va deformando delante de él.

Esta deformación se traduce en "un sistema de olas".

**Simbad:** ¿Y eso que es, las olas que produce el viento?

**Capitán Isidore Caubin:** Se ha observado que cuando el navío se desplaza a poca velocidad, se forma un sistema de olas; se trata de olas muy cercanas entre si. En cambio a velocidades altas, las distancias entre estas olas aumenta. Este fenómeno se llama "resistencia de ola". Finalmente vemos que la resistencia total al avance del navío, está compuesta de la mezcla de todos los fenómenos que hemos visto y a esta resistencia total  $R_t$ , se llama "resistencia de remolque" y se puede considerar como la suma de tres componentes ( "Hipótesis de Froude"):

$$R_t = R_w + R_v + R_{AA}$$

(XIII.1.1)

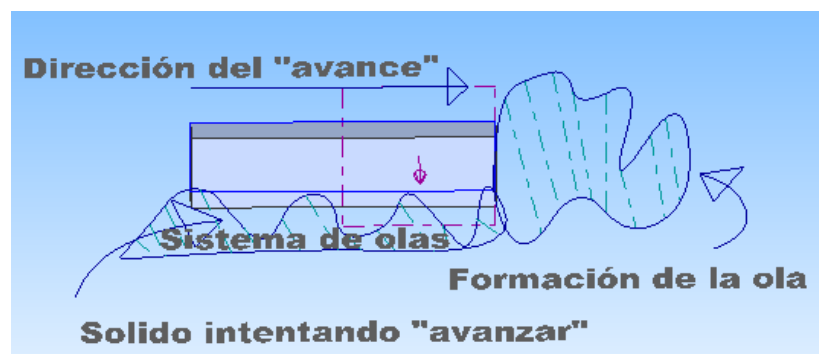


Figura XIII.1.1: La resistencia debida al "sistema de olas"

Donde:  $R_w$  : La resistencia de ola (Wave en inglés);  $R_v$  : La resistencia hidrodinámica dicha como hemos visto "Resistencia viscosa" y que es la suma de la resistencia de frotamiento  $R_f$  del agua sobre la carena y que depende de la "superficie mojada" ( $S$ ) y del estado "mas o menos liso" de esta carena o más bien de su "rugosidad". La rugosidad intervendrá, en la evaluación del coeficiente de frotamiento correspondiente  $C_f$  y de la "resistencia de remolino", finalmente de  $R_{AA}$ : O "resistencia aerodinámica" que en una primera aproximación es bastante pequeña.

En realidad el estudio de la resistencia al avance es consecuencia de los trabajos de Froude en 1869 y se puede resumir de la manera siguiente:

$$R_t = R_f + R_r,$$

(XIII.1.2)

y vemos que la resistencia viscosa y la resistencia de ola son remplazadas aquí por el termino "Resistencia de frotamiento" y de "Resistencia residual"

Donde  $R_f$  es la resistencia de frotamiento, aproximadamente igual a la resistencia viscosa y que se calcula por la "ley de Similitud de Reynolds"

$R_t$  es la resistencia total de la carena o parte sumergida de nuestro casco, sin considerar los apéndices.

$R_r$  es la resistencia residual, que es todo lo que no está comprendido en  $R_f$  que es sobre todo la resistencia de las olas...

**Simbad:** Bueno ya veo capitán que la resistencia al avance de nuestro casco hace intervenir varias resistencias que sumadas nos dan la resistencia total al avance, pero Ud., ha nombrado a un "tal Froude" y no sé quién es ni que tiene que ver con todo esto...

**Capitán Isidore Caubin:** Este científico llamado Froude, se puso a estudiar "longitudes de onda" tal como ocurre en telecomunicaciones y "velocidades de propagación", encontrando finalmente una fórmula que se aplica en construcción naval y que es muy interesante como vamos a ver.

**Tema XIV: Velocidad de propagación, energía del oleaje**

"Es mucho mejor conocer algo acerca de todo, que acerca de una sola cosa. Lo universal es siempre mejor". Blaise Pascal (1623-1662); científico y filósofo francés.

**Simbad:** Bueno, y ¿se podrá saber lo que halló este señor?

**Capitán Isidore Caubin:** Para ello tendré que hablarte de "la velocidad de propagación y de la energía del oleaje", así que allá vamos. La resistencia de ola  $R_w$ , es una de las que más influye en la resistencia al avance. La deformación de una superficie libre como el agua, se llama "onda de gravedad" o más corrientemente "oleaje", cualquiera que sea su origen pero siempre la debemos considerar encima de una "profundidad infinita" (teórica) de agua, ya que no queremos que esté influenciada por obstáculos sumergidos por ejemplo y solo que lo sea por la atracción terrestre o fuerza de gravedad.

Esta onda de gravedad u oleaje natural, se caracteriza sobre todo por su longitud  $\Lambda$  (m) o "longitud de onda", que es la distancia entre dos crestas o cimas de ola sucesivas, y que varía como "la raíz cuadrada de esta longitud" según la relación siguiente:

$$c = \sqrt{(g \cdot \Lambda / 2\pi)}, \tag{XIV.1.1}$$

donde  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  y  $c$  es la "velocidad de propagación" y que puede también escribirse en la práctica y simplificando como:

$$c / \sqrt{g \cdot \Lambda} = \sqrt{1/2\pi} \approx 0,4 \tag{XIV.1.2}$$

de donde:

$$c = 1,25 \cdot \sqrt{\Lambda} \tag{XIV.1.3}$$

Y que es lo que averiguó Froude.

Por ejemplo si la distancia entre dos crestas es de 4 metros tendríamos:



**Figura XIV.1.1:** En la foto se puede apreciar un "sistema de olas".

$c = 1,25 \cdot \sqrt{4} = 5 \text{ m/s}$ : La ola "se propagaría a 5 metros por segundo"

Por otro lado una ola también posee una "energía potencial" o "energía cinética" que se expresa por la relación:

$$E = (1/8) \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \Lambda \tag{XIV.1.4}$$

Donde  $\rho$ , es la masa volumínica específica del fluido que para el agua de mar es:  $1025 \text{ kg/m}^3$

Es decir que: "la energía de la ola, varía como su longitud de onda y también como el cuadrado de su altura  $H$ ".

**Simbad:** Esto es súper interesante, pero ¿cómo lo aplicamos en la práctica?

**Capitán Isidore Caubin:** Para aplicar todo esto en la práctica te voy a hablar de la "Resistencia de ola y del número de Reech- Froude". Cuando un navío navega y avanza en la mar, "arrastra con él

una ola o un sistema de olas" que van a su misma velocidad ( $c = v$ ), y que se llaman "Olas de acompañamiento". Estas olas se forman a lo largo de su línea de flotación, (ver Figura XIV.1.1.) Por analogía con lo que se dijo antes con respecto a la relación:  $c / \sqrt{g \cdot \Lambda}$ , (XIV.1.2), se define para un navío de longitud aproximada de flotación  $L$  y que se desplace a una velocidad  $v$  (m/s), Un valor sin dimensión:

$$F_n = v / \sqrt{g \cdot L} \quad (XIV.1.5)$$

Llamado "Numero de Reech – Froude" o más corrientemente "Numero de Froude", el cual caracteriza la velocidad del navío con relación a su longitud, por lo tanto ya sabes lo que hizo este Froude.

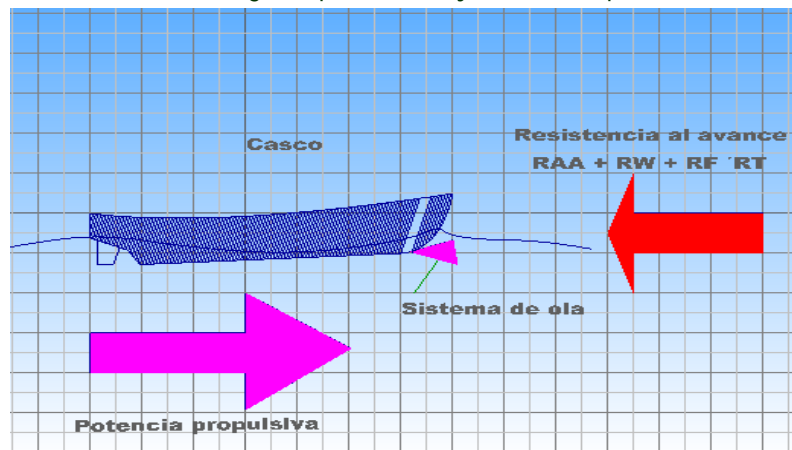


Figura XIV.1.2: Sistema de ola y Resistencia al avance

Así gracias a Froude, se distinguen 4 casos diferentes, (ver figura XIV.1.3):

1) A velocidad reducida, las olas de acompañamiento, tienen una longitud de onda inferior a la longitud del navío:  $\Lambda < L$  y entonces se encuentran varias olas a lo largo de la flotación. Esto corresponde "a un pequeño numero de Froude":  $F_n < 0,4$ . donde  $F_n$  quiere decir "Froude number", o "numero de Froude". Cuando hay dos o más olas, lo que correspondería a  $F_n \leq 0,4 / \sqrt{2} \approx 0,28$ , se puede admitir que la resistencia de ola es pequeña y que en cambio la resistencia de frotamiento es grande y predominante y del orden de 60 a 90% de la resistencia total, según  $F_n$  y la forma del flotador. Más allá, la resistencia de ola es progresivamente más y más importante con la velocidad.

2) Cuando la velocidad aumenta, la longitud de onda de las olas aumenta hasta corresponder aproximadamente a la longitud del navío,  $\Lambda = L$ , y el navío está prácticamente "portado" por la ola

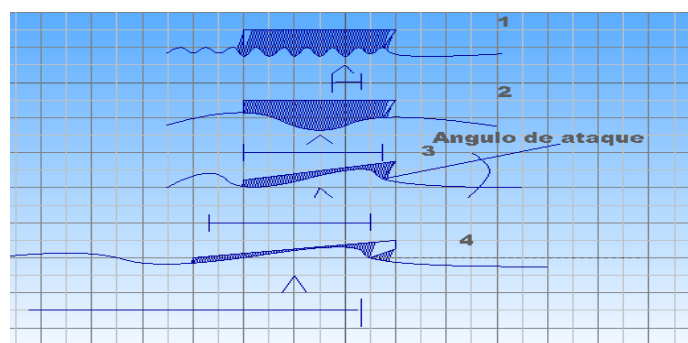


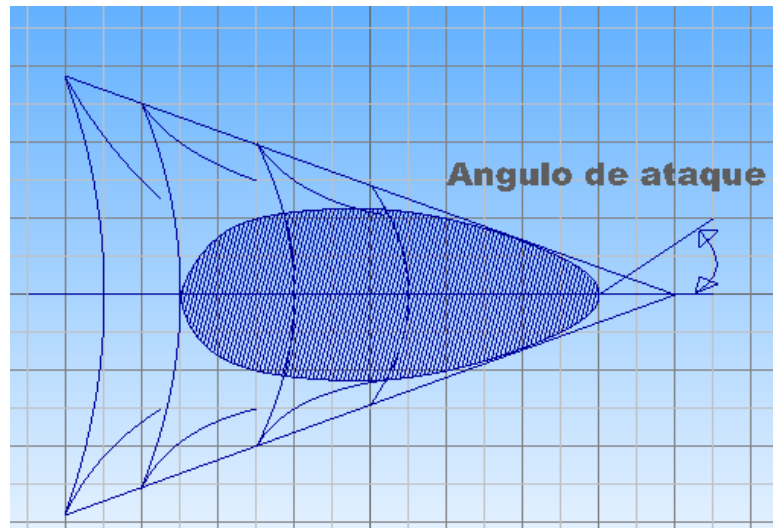
Figura XIV.1.3: Los cuatro casos del nº de Reech-Froude

misma que posee una cresta avante, un seno en el centro y una cresta a popa, lo que corresponde a un número de Froude de  $F_n \approx 0,4$ , para el cuál y sobre todo si el navío es de tipo "arquimediano" (a desplazamiento) es llamada "Velocidad limite teórica de la carena".

3) Si la velocidad aumente aún, la cresta trasera se aleja del navío y la popa ya no es portada por la cresta trasera, sino por la pendiente de la ola entre dos crestas.

El navío se encuentra en situación "encabritada", muy desfavorable desde el punto de vista de la resistencia al avance ya que no se desplaza más según su eje de referencia horizontal que corresponde normalmente a la mejor trayectoria. Esta situación corresponde aproximadamente a un numero de Froude comprendido entre 0,4 y 0,7 con  $L < \Lambda < 3L$ , aproximadamente.

La resistencia de ola es predominante y del orden de 70 a 85% de la resistencia total según  $F_n$  y la forma del flotador.



**Figura XIV.1.4: El ángulo de ataque "ideal" está alrededor de los 20°...**

4) Si la velocidad aumenta todavía, el navío puede estar completamente portado por su ola delantera en una posición que es casi horizontal y entra en situación de "hidroplaneamiento" o "planning". Esto corresponde a un número de Froude superior a 0,7, es decir  $\Lambda > 3L$ .

Se puede observar sin embargo que en esta situación el navío no está portado en toda su longitud efectiva  $L$ , si no solamente por su parte trasera, mientras que su parte delantera está prácticamente en el aire y a plomo por encima del agua delante de la cresta que lo porta.

Extraordinario ¿No?, seguro que todos hemos vivido esta situación sin saber que Froude la había descubierto y cuantificado ¡¡en 1869!!.

**Simbad:** ¡Fantástico mi capitán, el que sabe sabe y el que no que se meta a político!

**Capitán Isidore Caubin:** En los esquemas o casos anteriores, los casos 2 y más aun todavía más el 1, son los mas corrientes que encontramos. Estos corresponden a los navíos "Arquimedianos" o "a desplazamiento", que son los que más hay entre los buques comerciales y de guerra muy pesados dedicados sobre todo al transporte de tropas o al combustible. En cambio los casos 3 y 4 corresponden a navíos relativamente ligeros y provistos de una fuerza de propulsión importante.

Estos últimos suelen tener formas "portadoras" dichas "hidroplaneantes" o simplemente "planeantes", es decir presentando una gran superficie plana principalmente detrás para el caso 4, o fina y alargada, es decir estrechas y poco profundas para minimizar la resistencia de ola. Para el caso 3 se observarían formas "semiplaneantes" y que corresponden a la zona intermedia muy delicada a concebir por parte del arquitecto naval. Esto se observa en ciertos barcos o lanchas rápidas donde hay que acelerar "a fondo" para romper un "pico de resistencia" antes y durante su "encabritamiento", para después reducir gases y navegar rápido en situación de planeamiento.

También se puede entender gracias a Froude que los navíos fabricados "o pensados" para el Atlántico (olas de longitud de onda grande), sean diferentes de los que se fabrican para el Mediterráneo.

Un análisis mas detallado del sistema de olas de acompañamiento, muestra que en realidad forman dos conjuntos, uno avante y otro atrás y que estos mismos están constituidos por varias olas divergentes y transversales que se desarrollan desde la roda y en cada bordo en el interior de un ángulo  $\alpha$  de unos 20° aproximadamente formado con el eje longitudinal del navío y se llega a demostrar muy precisamente que  $\text{tg } \alpha = 1/\sqrt{8}$ , es decir que  $\alpha = 19,47^\circ$ ... En este sistema las olas transversales son aquellas que tienen mas influencia sobre la resistencia al avance, (ver figura XIV.1.3).

Nos podemos también dar cuenta de que como la energía disipada o "perdida", por la formación de olas

E variaba como  $H^2$ , si la carena pasa por olas pequeñas, esta energía será también más pequeña ofreciendo menor resistencia. Para reducir entonces la resistencia al avance, buscaremos carenas que generen un sistema de olas pequeñas o poco altas.

**Simbad:** ¡Ahora veo la cosa practica, ahora sé como se debe calcular un casco según la velocidad y la fuerza de propulsión de la que uno disponga...este Froude...!, pero... ¿se pueden obtener velocidades más altas a pesar de que se trate de un navío "Arquimediano"?



**Figura XIV.1.5:** El ángulo de ataque se mejora con un "Bulbo de roda"...

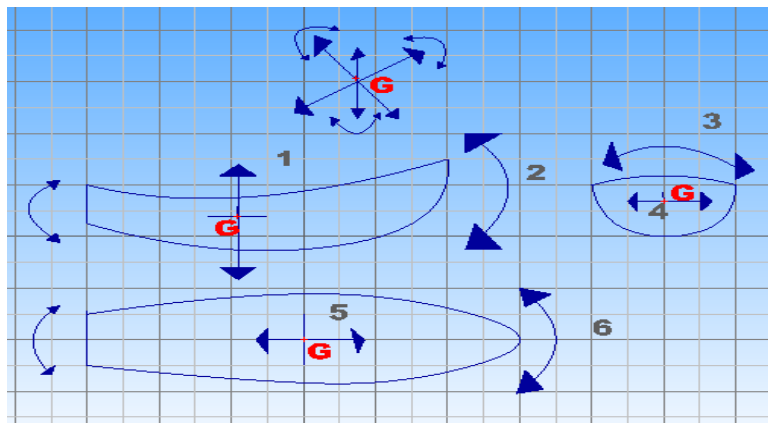
**Capitán Isidore Caubin:** Si, pero no mucho más y una manera de conseguirlo se obtiene agregando un "bulbo" en la extremidad de las "obras vivas" en proa o "Bulbo de roda", el cual disminuye sensiblemente el "seno de ola de roda" empujando hacia adelante la cresta y alargando de otro tanto la longitud de onda del sistema generado al paso de la carena. (Se trata de conseguir que  $\Lambda$ , sea lo más cercano a  $\Lambda > 3L$ ). Este sistema complica la construcción del navío y la repartición y centrado del volumen sumergido y el de la superficie de la quilla o deriva.

También habrá que tener en cuenta los diferentes niveles de asiento de proa en función de la carga del buque o simplemente en función de la altura media de las olas propias al lugar de navegación del navío. No es por lo tanto recomendable siempre, sobre todo para los buques de pequeñas dimensiones.

#### **Tema XV: Movimientos del navío a la mar**

"No progresas mejorando lo que ya esta hecho, sino esforzándote por lograr lo que aún queda por hacer". Khalil Gibran (1883-1931); ensayista, novelista y poeta libanés.

**Simbad:** El estado de la mar también debe influenciar el avance de nuestro casco, ¿no?



**Figura XV.1.1:** Movimientos según los "seis grados de libertad" del casco con respecto a G.

**Capitán Isidore Caubin:** Hemos supuesto al flotador avanzando en su sentido longitudinal hacia adelante, y sometido a la resistencia al avance en su traslado normal hacia adelante.

Pero en función del estado de la mar y de su estado propio, el navío sufre otros movimientos corrientemente llamados "Movimientos de plataforma" y que corresponden a "Seis grados de libertad" definidos dos a dos, en traslación y en rotación en el plano o "sistema ortonormado" habitual y reportado al centro de gravedad del navío, G.

Estos movimientos son, (ver figura XV.1.1):

- 1) Con relación al eje longitudinal y en traslación: Aceleración, desaceleración (5) y en rotación: bandazos y balanceos (3)
- 2) Con relación al eje transversal, en traslación (babor, estribor): desvíos bruscos o guiñadas (4) y en rotación: cabezadas o cabeceos (2).
- 3) Con relación al eje vertical, en traslación: "martinetadas" (1), o golpes de ariete, hacia arriba, hacia abajo y en rotación: lazos y guiñadas horizontales (6).



**Simbad:** ¡Dios mío! ¿Hay que saber todos estos movimientos de memoria?

**Capitán Isidore Caubin:** No, hombre... Solo tienes que entender lo que pasa y así, todos estos movimientos tienen por causa el estado más o menos desordenado del plan de aguas sobre el que evoluciona el navío. Los movimientos de desvío brusco, guiñadas y cabezadas son sobre todo debidos al encuentro frontal del navío con las olas y por el contrario, los movimientos de bandazos y de golpe de martinete o de ariete, corresponden a su encuentro lateral. Todos estos movimientos se encuentran con diversos grados de importancia, en el caso general de un encuentro oblicuo del navío y las olas.

**Simbad:** ¿Estos movimientos bastante "aleatorios", frenan el buque?

**Capitán Isidore Caubin:** Todos estos movimientos absorben energía de la propia carena y por lo tanto contrarrestan su propulsión en mayor o menor grado, reduciendo su velocidad. Estos movimientos, si son importantes, hacen sufrir al personal y al material y en condiciones de mala mar pueden ser peligrosos. La manera de contrarrestar estos problemas es la de "un equipaje experimentado que maniobra con habilidad" y una buena concepción del navío sobre todo en los movimientos rotatorios. Hay que empezar por prever y corregir, todos los movimientos que tengan un carácter "periódico", es decir que se reproducen iguales a sí mismos en periodos de tiempo iguales. Estos movimientos periódicos se deben "amortiguar", evitando fenómenos de resonancia o de "autoentretimiento" que producirían oscilaciones incesantes.

**Simbad:** Ok, está claro que "el hombre de barra" debe ser un experto como Ud., capitán...¿Pero hay normas?

**Capitán Isidore Caubin:** Hay que corregir los movimientos no deseados. Los movimientos rotatorios pueden corregirse en gran manera según las clasificaciones siguientes de estos:

1) *Movimientos de cabeceo, "pantocazos" o "slamming"*. El cabeceo tiene su principal origen en el encuentro de la proa con las olas. En efecto, las formas avante de un buque están concebidas sea para "pasar en fuerza" a través de las olas, como es el caso de proas finas o en inglés las "wave piercer" (perfora olas), con los riesgos correspondientes que esto comporta: "romper todo" o "enhornar", sea por el contrario para "aliviar" a su paso para limitar o evitar este riesgo. Este movimiento puede provocar choques violentos o "pantocazos", sobre todo si la velocidad es importante. Este movimiento es responsable de los fenómenos de vibración en las estructuras de los fondos del casco conocidos bajo el nombre de pantocazos o "slamming", muy sensibles en los navíos rápidos y en todo caso sobre los grandes buques. En general el cabeceo de un buque se amortiza bien si se tiene cuidado de situar o concentrar las masas que lo componen, alrededor de su centro de gravedad G.

2) *Bandazos, balanceos, periodo propio, estabilidad*. Todo navío (o flotador), posee un periodo de balanceo propio que corresponde en aguas calmas a las oscilaciones transversales que toma de una parte a otra de su posición de equilibrio inicial después de que se le haya aplicado una fuerza inclinante bruscamente liberada. Esas oscilaciones se amortiguan al cabo de un cierto tiempo y se demuestra que su periodo T (en segundos), varia como el "Momento de inercia  $M_{it}$ " de las masas del navío con relación al eje de rotación longitudinal de su plano transversal que pasa por su centro de gravedad G (En la practica se aumenta entre un 5 a 10% para tener en cuenta la masa de agua que lo acompaña), y como la inversa de su módulo de estabilidad P.GM, según una relación de la forma:

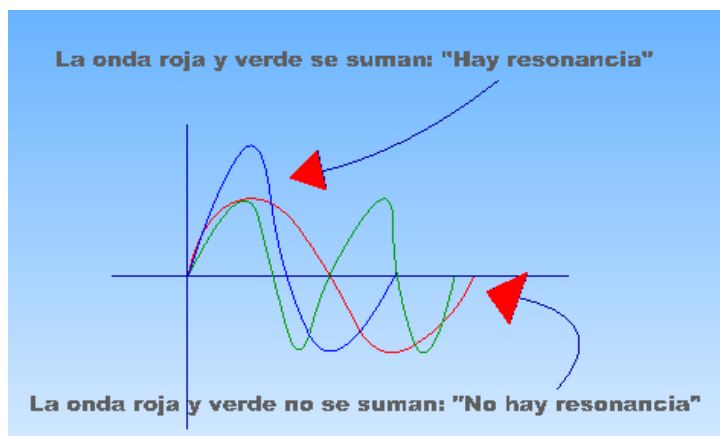
$$T = 2\pi \sqrt{M_{it} / (P.GM)} \quad (XV.1.1)$$

Si no estamos en situación de calcular exactamente el  $M_{it}$ , si el navío es de un tipo corriente y que sus masas están relativamente repartidas homogéneamente, T puede obtenerse con la formula simplificada siguiente:

$$T = 0,75 G / \sqrt{GM} \quad (XV.1.2)$$

Este periodo oscila entre algunos pocos segundos para pequeños buques hasta una decena o más para los más grandes o para navíos de dimensiones medias pero con pequeño modulo de estabilidad P.GM (poco estables) La evaluación de T es interesante ya que nos permite verificar el valor aproximado del modulo de estabilidad inicial ó "resonancia", a falta de poder realizar un test real de estabilidad y que su valor sea sensiblemente alejado del periodo medio de las olas del lugar de navegación potencial que frecuentará el buque, para evitar en lo posible fenómenos de resonancia que podrían aumentar el balanceo hasta posiblemente rendirlo peligroso, en lugar de amortizarlo.

Los navíos que tienen un periodo  $T$  propio, superior al periodo de ola son en general los más confortables, pero esto no es posible casi nunca de realizar con los pequeños y en acuerdo con sus exigencias de estabilidad. Para atenuar el balanceo se pueden añadir las "quillas anti-balanceo" o "quillas de pantoque" fijas, las cuales deben estar juiciosamente dispuestas de manera a no aumentar demasiado sensiblemente las resistencias al avance. También se pueden colocar alerones orientables

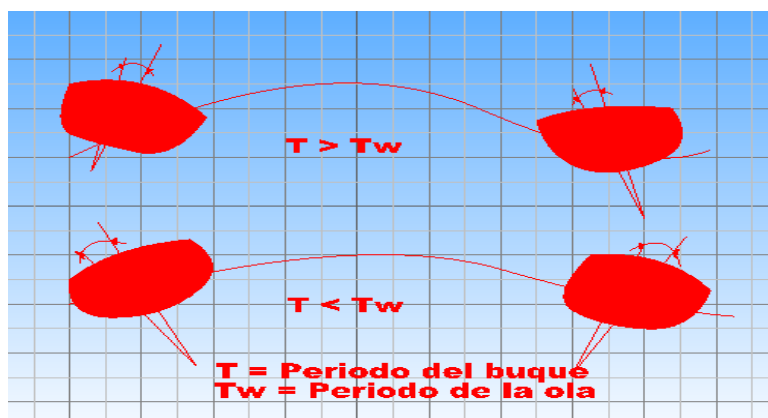


**Figura XV.1.2: Suma de movimientos o "resonancia"**

o si el navío lo permite por su gran tamaño, estabilizadores a cisterna pasivos o activos.

**Simbad:** ¿Y como se comportará el buque con todo esto?

**Capitán Isidore Caubin:** Para explicártelo te tengo que hablar de "lazos y estabilidad de ruta".

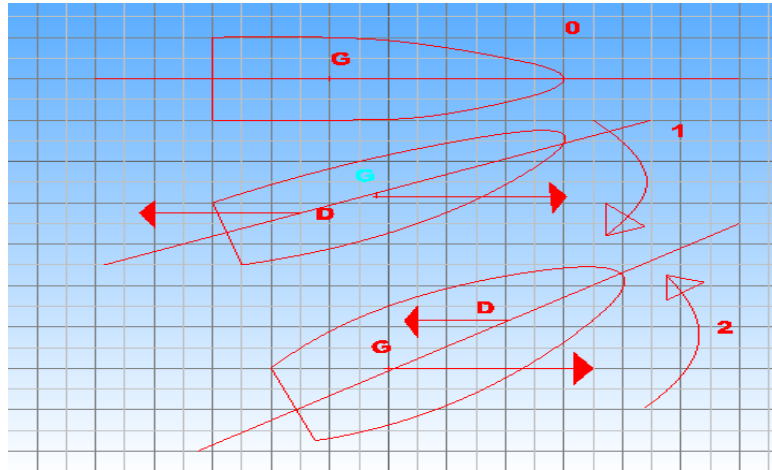


**Figura XV.1.3: Período de "resonancia" entre la ola y el casco...**

En efecto la estabilidad en ruta, caracteriza la aptitud que tiene un buque a "recobrar su rumbo" o trayectoria después de haberse alejado de ella y ello, sin acción sobre la barra. La dirección de esta trayectoria es normalmente la del plano longitudinal. Si por alguna razón, el navío se desvía, como por ejemplo al encuentro de una ola oblicua, por el hecho de su propia inercia, cuya fuerza resultante se aplica a su centro de gravedad  $G$ , tenderá a seguir un momento de esta manera mientras que su plano longitudinal adquirirá una ligera desviación o "angulación" con relación a esa dirección. El navío está entonces en situación de "deriva". En estas condiciones la fuerza resultante, se aplica en la obra viva, en un punto  $D$  llamado "Centro de deriva" (ver figura XIV.1.3), del cual no conocemos su posición exacta, ya que varía por un lado según la configuración del perfil sumergido y por otra según el ángulo de deriva.

Se comprenderá que entonces se producirá un decalaje entre el centro de gravedad  $G$  y  $D$  que creará (como siempre), "un par de fuerzas" en el sentido de la trayectoria, tal que si  $D$  se encuentra detrás de  $G$ , el navío tenderá a volver a su posición o trayectoria de origen, pero que si  $D$  se encuentra por delante de  $G$ , cada vez se separará más de esta trayectoria. En el primer caso se dice que el navío "es estable en ruta" y en el segundo que es "inestable en ruta". En el caso de inestabilidad, se comprende que el timonel tratando de hacer revenir a rumbo, pase a la otra banda y que tenga otra y otra vez que realizar esta operación. En este caso el buque navega "En lazo". Este

problema es muy sensible en los buques de pequeñas dimensiones debido a su propia relación de escala entre eslora y olas que pueden encontrar muy a menudo.



**Figura XV.1.4: Fuerza resultante de desvío entre D y G**

En estos navíos se intenta que el centro de deriva D se encuentre siempre detrás de G, construyéndolos "en diferencia", es decir haciendo que su parte trasera tenga un calado bastante más importante que su parte delantera o desarrollando atrás un "plan de deriva reportado" (plan delgado que incluye el timón), más o menos importante. En los navíos de cierta talla, se pueden colocar, además del timón para mejorar la capacidad a virar, uno o varios propulsores que operan transversalmente principalmente, como es el "Propulsor de roda o de proa" (hélice) y otros sistemas de "posicionamiento dinámico".

**Simbad:** Todo es muy interesante, aunque tendré que releer mis notas, ya que lo que Ud., me ha contado es muy pero que muy denso...Supongo que de todas maneras habrán pruebas antes de lanzar un navío a la mar, ¿no?

**Capitán Isidore Caubin:** Ciertamente y cuando se puede, hay que hacer pruebas en "piscinas o estanques de ensayos de carena". Casi todos los problemas enumerados anteriormente pueden ser estudiados en estas piscinas de ensayo de carenas. En este lugar se realizan tanto ensayos cualitativos como cuantitativos que se realizan con "Maquetas". Estas piscinas están equipadas con instrumentos de medida adecuados y en ellos se puede estudiar muy particularmente, "la resistencia al avance" (Rt).

Gracias a ello, el arquitecto naval podrá optimizar la propulsión del navío y tratar de realizar las performances exigidas por su cliente. Los ensayos en piscina, están regidos por las dos leyes de similitud siguientes:

- 1) Ley de "Similitud de Reynolds"
- 2) Ley de "similitud de Froude"

Se retiene principalmente la de Froude, ya que las dos juntas no pueden ser respetadas, y como veo que "estás agotado", no te las voy a explicar...

**Simbad:** ¡Uf, capitán, tiene razón...estoy agotado!...¿Nos tomamos ese ron?

**Capitán Isidore Caubin:** Nos lo tomamos, nos lo tomamos marino...

**Fin de la 2ª parte de la 3ª charla sobre construcción naval**