



Análisis Estructural

Del velero

————— Por A. Besednjak —————

La embarcación de vela no ha permanecido pasiva ante los cambios que se produjeron durante el siglo XX. Con la aparición de nuevos materiales, que permiten construir estructuras más livianas, más resistentes, en menos tiempo y con menor coste, la ingeniería naval se ha visto obligada a determinar con mayor exactitud las cargas actuantes sobre la estructura de la embarcación.

Durante siglos, la construcción naval se ha valido de hipótesis y reglas basadas en la experiencia para el cálculo y construcción de embarcaciones de vela; pero hoy, con las nuevas herramientas disponibles es posible precisar mucho más los esfuerzos a los que será sometida la estructura.

Como toda estructura de ingeniería, la embarcación de vela, está sometida a diferentes esfuerzos originados por la acción de causas externas e internas, por lo que su conocimiento se convierte en prioritario para poder hacer un diseño adecuado de la misma.

Clasificación de los esfuerzos

Los esfuerzos que actúan sobre la estructura del velero son numerosos, pero pueden clasificarse, en primera instancia, en dos grandes grupos:

- a) Esfuerzos del barco como estructura integral o esfuerzos estructurales
- b) Esfuerzos sobre partes determinadas del barco o esfuerzos locales

Esfuerzos estructurales longitudinales Viga – Buque.

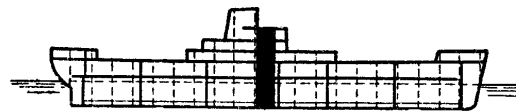
Para analizar la resistencia de una embarcación se puede considerar a ésta como una viga de construcción terrestre pero flotando; esto quiere decir si en las vigas comunes normalmente existen dos o más puntos definidos de apoyo, en nuestro caso la viga se apoya en toda su extensión, ya que es soportada por el agua.

Entonces, la embarcación es considerada como una viga formada por todo los elementos que la integran, de proa a popa de modo continuo, como el forro o laminado del casco, la cubierta, los refuerzos longitudinales, etc.

Los elementos transversales desempeñan el papel de elementos de conexión entre los longitudinales; es el caso de las cuadernas, baos, mamparos, etc.

Analicemos primero un caso muy general de barco de motor, con la sala de máquinas al centro, flotando en aguas tranquilas y con carga en sus bodegas.

Si pudiésemos dividirlo idealmente en trozos desde proa hasta popa y analizáramos por ejemplo uno de los trozos, como el de la figura, veríamos que las fuerza actuantes serían :



- a) Peso propio (compuestos por el peso del casco, superestructura, máquinas, etc.).
- b) El peso de la carga, combustible y agua contenidos en dicho trozo.

- c) El empuje, igual, por el principio de Arquímedes, al peso del agua desalojada por la carena de dicho trozo.

La porción analizada del buque no se encuentra en equilibrio. Lo que se encuentra en equilibrio es el conjunto total de la embarcación. Por esto, este trozo de viga puede tener una componente actuante donde predomine el peso (hacia abajo) o una componente actuante que predomine el empuje (hacia arriba).

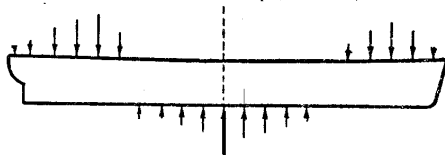
Por lo tanto, no habrá razón para que la suma de los pesos a) y b) sea igual al empuje c).

Repitiendo este razonamiento para cada uno de los trozos en que se ha imaginado subdividido el buque, se obtendrá en cada caso una cierta resultante parcial.

En la zona central del buque podemos ver que el empuje es mayor; esto es debido a que en esta zona, los pesos actuantes son livianos en relación con el volumen que ocupan (máquinas y alojamientos) y la forma de carena es bastante llena. Por lo tanto, las resultantes parciales están dirigidas hacia arriba.

En los extremos del buque ocurre lo contrario. Los pesos (cargas de las bodegas) son considerables con respecto al volumen ocupado, y, la forma de la carena es más estrecha o afinada, por lo que los empujes son menores. Esto determina que las resultantes parciales estén dirigidas hacia abajo.

La viga buque, considerada aisladamente, estará sometida a las resultantes mencionadas, tal como indica la figura.



Estas resultantes darán origen a tensiones internas que pueden ser determinadas fácilmente por los métodos de resistencia de materiales. La viga intentará ser deformada por momentos flectores y esfuerzos de corte, como se indica en las siguientes figuras.



Momento flector



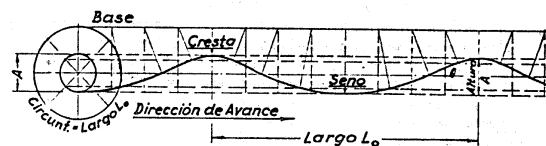
Esfuerzo cortante

El momento flector, alcanzará su máximo valor en el centro del buque, en tanto que el esfuerzo de corte, nulo en el centro, será máximo en puntos situados aproximadamente $\frac{1}{4}$ de la eslora desde los extremos. Entonces, las estructuras longitudinales continuas, que forman la viga buque, deberán ser, pues, calculadas de modo que puedan soportar las tensiones de flexión y corte analizadas.

Esfuerzos estructurales longitudinales en el mar Quebranto y Arrufo

Hasta el momento, hemos considerado a la embarcación en aguas tranquilas. Pero cuando la embarcación navega, la superficie del mar ya no es horizontal, se ve alterada por la presencia de olas.

A efectos de poder hacer comparaciones, debemos adoptar un tipo de ola "estándar" para todos los casos. Las formas de las olas (altura y longitud) pueden ser muy diferentes, por lo que se adopta como ola estándar al perfil longitudinal de una trocoide. (recordemos que trocoide o cicloide corta es la curva generada por un punto interior a una circunferencia cuando ésta rueda sin resbalar sobre una recta). Que la longitud de dicha ola es la eslora del barco y que su altura es $\frac{1}{20}$ de la eslora.



Geometría de ola trocoidal

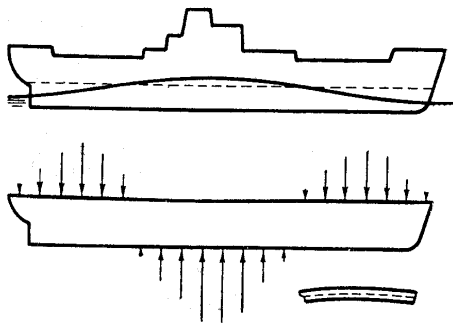
Una embarcación navegando sobre la superficie del mar puede adoptar diferentes posiciones respecto de un tren de olas. Si suponemos éstas olas como estándar, podemos decir que la condición más desfavorable para la embarcación es cuando navega perpendicularmente a estas de olas y cuando se encuentra en las dos posiciones extremas de las

mismas, cuando la sección media del barco está sobre la cresta de la ola o en el seno de la misma.

Estas posiciones se llaman, respectivamente, quebranto y arrufo (en inglés “hogging” y “sagging”). Analizaremos, pues, estas dos posibilidades.

Quebranto o “hogging”

Es cuando la embarcación se encuentra con su sección media sobre la cresta de una ola.

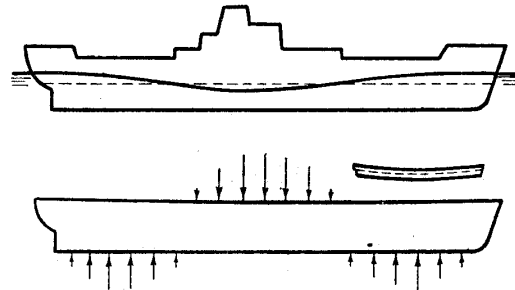


Cuando el agua alcanza la zona de la sección media de la embarcación, la altura del agua es mayor que la altura de la flotación en aguas tranquilas. Por el contrario, en los extremos de proa y popa el nivel del agua es inferior. Por lo tanto, en la zona central aumentará el empuje y disminuirá en los extremos . Si los pesos no han sufrido ninguna modificación, la diferencia a favor de los empujes en la zona central será más acentuada y más acentuada la diferencia de los pesos en los extremos respecto de la condición de aguas tranquilas.

Esta distribución resultante, con una fuerza de empuje mayor en el centro y unas fuerzas de peso mayores en los extremos tenderá a flexionar el barco, de modo que, como indica la figura pequeña, se producirán tensiones de tracción en la cubierta y de compresión en el fondo.

Arrufo o “sagging”

Es cuando la embarcación se encuentra con su sección media en el seno de una ola.



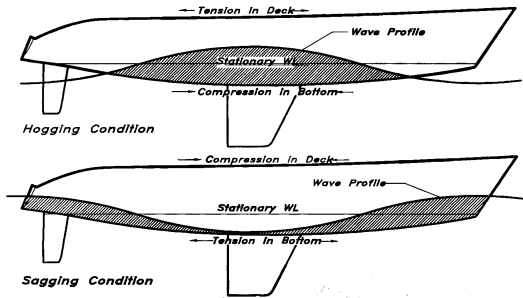
Cuando el agua alcanza el nivel más bajo en el centro de la embarcación (zona de la sección media), respecto al nivel de flotación en aguas tranquilas, en los extremos de proa y popa el nivel del agua es más elevado. Por tanto, es evidente que en la parte central del buque disminuirán los empujes, y en los extremos, en cambio, aumentarán.

Si los pesos han permanecido invariables, la diferencia a favor de los empujes en los extremos se incrementará y en el centro, será la diferencia a favor de los pesos la que se incrementará.

Esta distribución resultante, con una fuerza de empuje mayor en los extremos de proa y popa y con mayores componentes de peso en el centro, tenderá a flexionar el barco, tal como se puede observar en la figura, y se producirán tensiones de compresión en la cubierta superior y de tracción en el fondo.

Cargas globales en los veleros

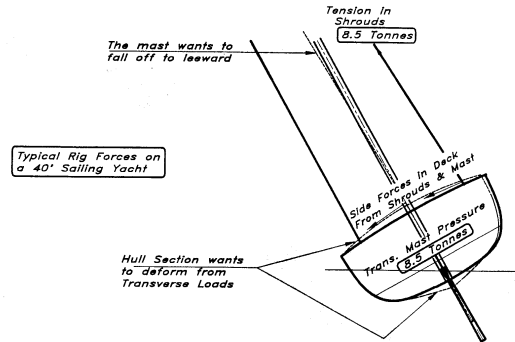
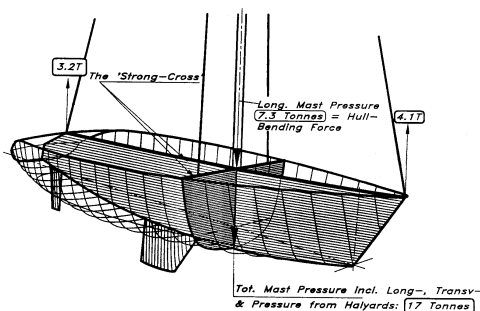
En las embarcaciones de vela, de las dos condiciones anteriormente expuestas, la más crítica es la de arrufo, es decir, cuando la sección media de la embarcación se encuentra en el seno de una ola. La razón de esto es porque a la falta de empuje que sucede en la sección media debemos sumarle la fuerza ejercida por el palo sobre la viga buque, traducándose en un momento flector longitudinal mayor.



Dicha fuerza proviene de la tensión de los obenques de barlovento, y de las tensiones en los estay de proa y de popa. La primera está directamente unida al momento adrizante, y las últimas, a la necesidad de soportar lo más recto posible al estay de proa para obtener la mejor performance de la vela.

En un velero lastrado normal, la presión acumulada en la base del palo, proveniente de stays, obenques y drizas en tensión, puede alcanzar un valor del doble del desplazamiento del barco. Las cargas provenientes de los obenques alcanzan valores de la misma magnitud que el desplazamiento, y las tensiones de las drizas alcanzan valores aproximados de hasta el 15% del desplazamiento. La tensión en los stays de proa y popa inducen a un momento flector longitudinal en la viga buque, resultando una fuerza flectora de aproximadamente el 85% del desplazamiento.

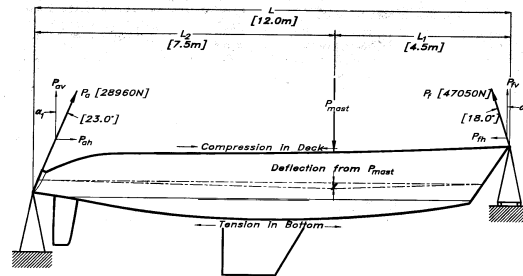
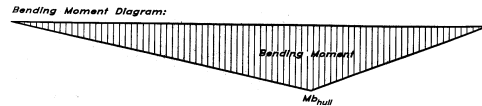
Transversalmente, la sección del casco en el área de los obenques debe ser suficientemente reforzada para no perder su forma.



Esto se consigue con un tipo de estructura en forma de cruz, con el mástil en su centro.

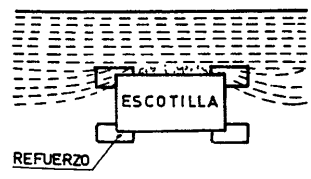
El resultado de estas fuerzas actuantes se traduce en la expresión del momento flector, que adopta la siguiente forma:

$$M_f = \frac{P_{mast} * L_1 * L_2}{L}$$



El máximo momento flector ocurre en la sección transversal del mástil, entonces es aquí donde debemos calcular el módulo de sección del casco.

Otra consecuencia directa de la flexión de la viga buque es que el casco estará sometido a tracción y la cubierta a compresión. Si la cubierta es muy liviana, puede que no soporte esta compresión, muchas veces agravada por la disminución del área efectiva por la presencia de escotillas y aberturas que producen concentraciones de tensiones.



Una técnica sencilla para contrarrestar este efecto consiste en utilizar el refuerzo que debería haber estado en el agujero como un refuerzo extra en los límites de la abertura.

Como vemos, siempre es posible determinar los esfuerzos en la viga buque conociendo la distribución de las cargas y asumiendo un perfil de ola trocoidal adecuado.

Las Sociedades de Clasificación reglamentan el cálculo estructural de modo preciso, y para simplificarlo, consideran a la embarcación en condición de aguas tranquilas, y, a los esfuerzos determinados en esta condición se le agregan distintos factores presentes cuando la embarcación navega en el mar (efectos dinámicos, movimientos del barco, etc.).

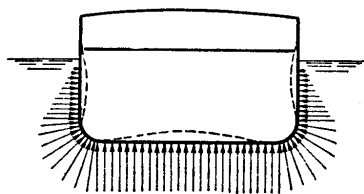
De este modo se arribará a los esfuerzos finales (momentos flectores y esfuerzos de corte), los que no deberán superar, en ninguna condición de carga, los esfuerzos admisibles preestablecidos (a su vez función de las tensiones admisibles en el material).

Sin embargo, algunas Sociedades de Clasificación no consideran necesarios los cálculos de momento flector y resistencia de la viga buque para embarcaciones pequeñas (menos de 24 mts) por considerar que sus efectos no son significativos.

Esfuerzos estructurales transversales

El origen de los principales esfuerzos que actúan transversalmente son :

1. Presión del agua: la presión hidrostática que actúa sobre la parte sumergida de la embarcación (obra viva) se distribuye como se ve en la figura. Tanto el costado como el fondo de la embarcación tienden a ser "hundidos" (línea punteada) por lo que deben ser dimensionados, conjuntamente con los elementos de refuerzo (cuadernas, longitudinales, etc.) para soportar esta presión.



Presión hidrostática

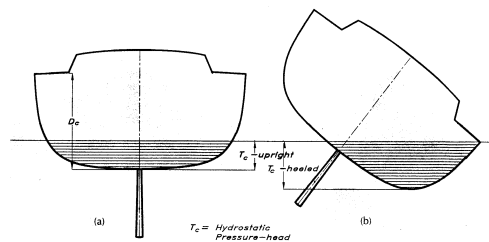
$$\text{Presión hidrostática } Ph = \gamma * H$$

Donde,

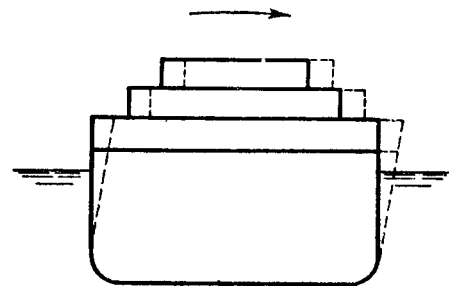
γ : Peso específico del agua salada

H : Altura de columna de agua.

En el caso particular de los veleros, no es suficiente considerar la presión hidrostática como aquella que afecta sólo a la parte sumergida de la embarcación en aguas tranquilas, debido a que, cuando navega escorada, las crestas de las olas alcanzan fácilmente la borda, por lo que el valor de la presión hidrostática deberá ser considerado como mayor que aquel.



2. Deformación transversal por esfuerzo de inercia : Cuando el barco rola hacia una banda, la parte superior del mismo (obra muerta) tiende a ser arrancada por las fuerzas de inercia ocasionadas por la aceleración tangencial del movimiento oscilatorio de rolido. Éstos esfuerzos deben ser soportados por todos aquellos elementos estructurales como cuadernas, baos y sus respectivas conexiones.



Deformación transversal

Esfuerzos Locales

Las cargas o esfuerzos locales son aquellos que afectan a zonas limitadas de la embarcación, y pueden ser de muy diversas, tanto en carácter como en magnitud. He aquí una breve reseña :

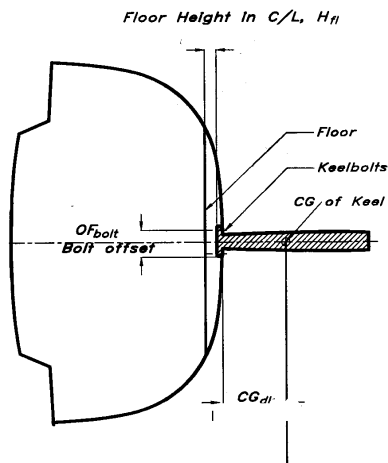
- Cargas internas concentradas
- Cargas externas concentradas
- Impactos contra el agua
- Esfuerzos dinámicos locales
- Esfuerzos locales originados por esfuerzos estructurales

Cargas internas concentradas

Son aquellas que originan tensiones considerables en zonas o porciones internas relativamente pequeñas de la embarcación (grandes pesos de máquinas, superestructuras, quillas, timones, etc.) , y por lo tanto, deben ser especialmente reforzadas.

En el caso de los veleros, dos de las cargas locales más importantes son las producidas por la quilla y el timón.

En el caso de la quilla, para poder determinar esta carga se adopta una postura de diseño que consiste en colocar la embarcación escorada 90° y fuera del agua, y considerar a la quilla como una viga empotrada en uno de sus extremos. Dicho cálculo deberá afectarse de factores de seguridad de 4 a 6 para considerar los efectos dinámicos.



Las fuerzas del timón son desarrolladas cuando el timón está produciendo una fuerza lateral, es decir, cuando navega. Por lo tanto, es una función de la velocidad y del ángulo de ataque del fluido. Esta fuerza lateral es la que determina el momento flector y momento torsor, que adoptan la siguiente expresión,

Momento flector del timón

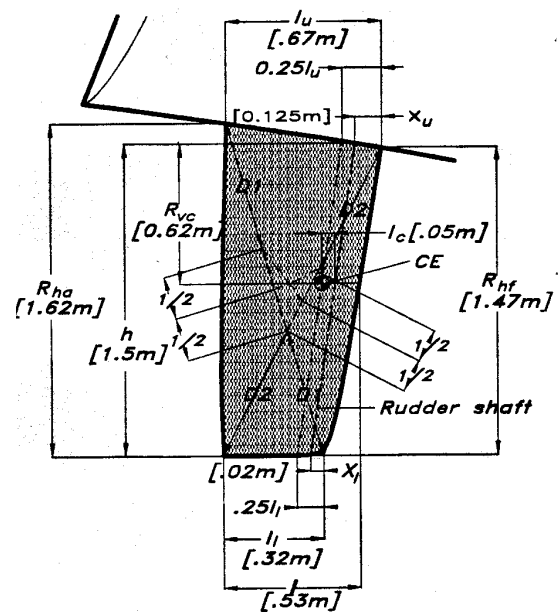
$$M_f = R_{vc} * F_r$$

Donde, R_{vc} es la distancia vertical desde el centro de esfuerzo y F_r es la fuerza lateral.

Momento Torsor del timón

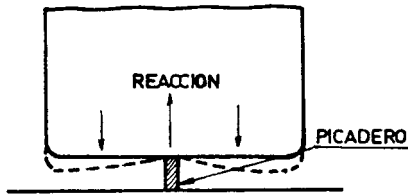
$$M_t = I_c * F_r$$

Donde I_c es la distancia horizontal desde la mecha del timón hasta el centro de esfuerzo.

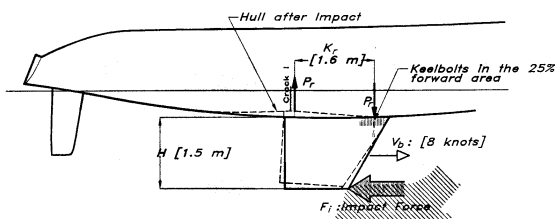


Cargas externas concentradas

Son aquellas que originan tensiones considerables en zonas o porciones externas relativamente pequeñas de la embarcación (puntales, presión concentrada en una zona del fondo por varadura casual o intencional, etc.)



En el caso específico de una varada, es casi imposible calcular la fuerza de impacto con exactitud. Esto es debido a deberíamos conocer con exactitud el peso y velocidad que llevaba la embarcación en el momento del impacto, la forma del fondo del mar, el material del que se encuentra constituido, y la geometría de la embarcación; estos últimos factores a efectos de poder estimar el amortiguamiento. Sin embargo, podemos hacer algunas simplificaciones y estimar esta fuerza de impacto, y así poder garantizar la resistencia de la embarcación con un ligero incremento del peso en esta zona.



Fuerza de impacto

$$F_i = \text{Desplazamiento} * ar$$

Donde ar : retardación : V_s/T_s

$$V_s: 0.514 * V_b$$

V_b : velocidad del barco

T_s : Tiempo a detenerse completamente

Momento de impacto

$$M_i = F_i * H$$

Donde H : distancia vertical de la quilla u orza

Impactos contra el agua

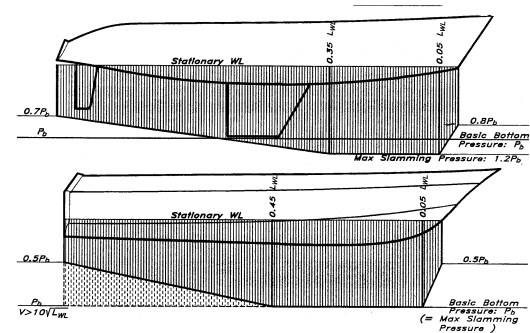
Las presiones hidrodinámicas locales aumentan con el cuadrado de la velocidad.

Cuando la proa de la embarcación sale del agua y golpea violentamente contra la superficie de la misma (por ejemplo cuando la embarcación planea o hay mala mar), se producen impactos locales muy severos.

Durante muchos años se han venido llevando a cabo diversos tests y mediciones para determinar dichas cargas, especialmente en embarcaciones de motor de planeo, donde el efecto del slamming es más severo. Uno de los métodos más reconocidos es el Heller & Jasper. La fórmula toma velocidad, eslora y ángulo de astilla muerta, desplazamiento y trimado para poder definir presiones del fondo.

Para veleros, la aproximación es ligeramente diferente. El procedimiento consiste en calcular una presión de diseño y afectarla luego por un factor de slamming, en función de la zona del barco que se esté estudiando.

El trabajo de Heller & Jasper nos muestra que el área de slamming primario está en las secciones delanteras del barco.



Esfuerzos dinámicos locales

Todos los pesos de una embarcación navegando adquieren una cierta aceleración y, por ende, son solicitados por fuerzas de inercia. (por ejemplo los motores, que tienden a ser "arrancados" de sus fijaciones durante un rolido.

Esfuerzos locales originados por esfuerzos estructurales

Analizando el barco como viga buque hemos visto que está sometido a una flexión longitudinal. Esto comprime o tensiona las chapas de casco y cubierta dependiendo de la condición de quebranto o arrufo. Si una de estas chapas la consideramos apoyada entre dos baos, sucesivos, por ejemplo, dicha chapa se

encontrará sometida a tensión ó compresión , y si la consideramos aisladamente, existe la posibilidad de que sufra pandeo.

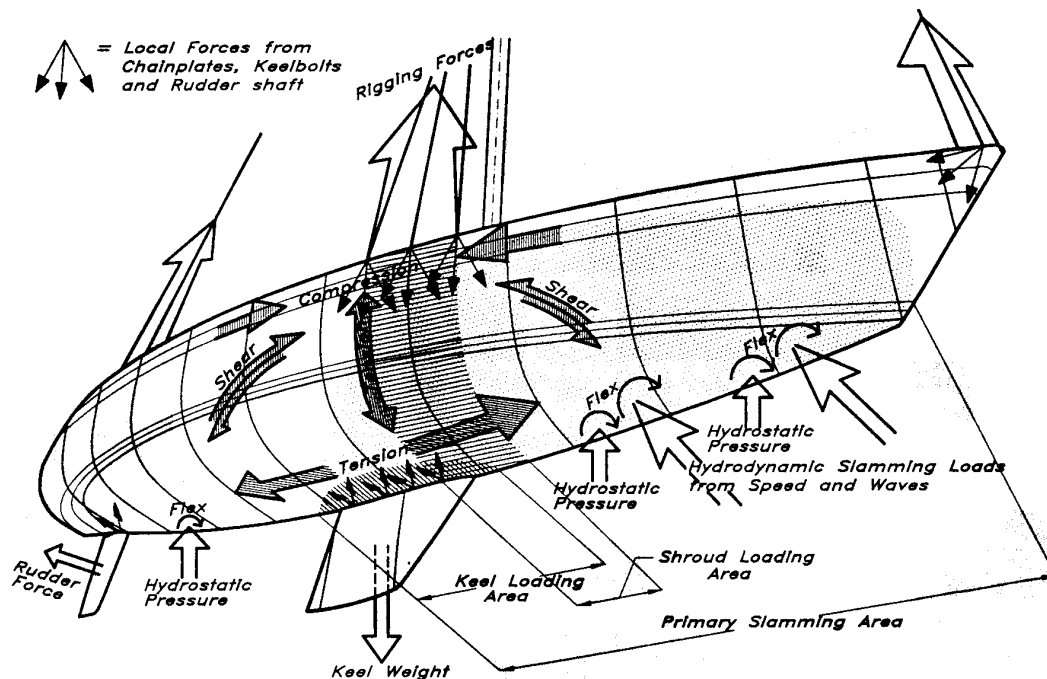
Sumario de cargas*

La siguiente figura nos muestra un velero navegando visto desde barlovento. Las flechas sombreadas nos indican las cargas globales impuestas en la viga buque por las fuerzas de su aparejo. Estas fuerzas se ven incrementadas cuando la embarcación se encuentra en arrufo, como cuando, por ejemplo, navega en aguas tranquilas. Como puede verse, la viga buque está sujeta a flexión lo que produce compresión a lo largo de la cubierta, tensión a lo largo del fondo y fuerzas de corte en los costados laterales. En la zona de los obenques se produce tensión transversal sobre el casco. Cuando el velero navega en mar picado, se produce quebranto, pero el momento flector no

llega a cambiar de signo, debido a que las fuerzas del aparejo son demasiado grandes para que suceda esto. Sin embargo, puede existir pulsaciones de compresión o tensión, con un inherente riesgo de fatiga.

Además de estas cargas globales tenemos cargas locales, como la presión hidrostática, con la adición de cargas de slamming en la parte delantera del barco, que intentan combar el forro y doblar los refuerzos. Esta es la fuerza más importante cuando calculamos el espesor de las pieles y dimensionamos los refuerzos.

Como vemos, la resistencia global del barco es suficiente si éste es dimensionado para soportar cargas hidrostáticas e hidrodinámicas, al menos, si es un tipo de barco normal. Otras cargas locales que deben ser tenidas en consideración son las producidas por los obenques, los estays, los bulones de la quilla, eje del timón, winches y otros accesorios de cubierta.



Referencias

* – Según Principles of Yacht Design – Lars Larsson & Rolf E. Eliasson – Adlard Coles Nautical – Londres - 1994

Bibliografía

Principles of Yacht Design – Lars Larsson & Rolf E. Eliasson – Adlard Coles Nautical – Londres - 1994

Cálculo de estructuras de buques – Ricardo Martín Domínguez – ETSIN – 1969

Construcción naval y teoría del Buque – Gerardo Guerrero García – 1969

Elementos de arquitectura naval – Antonio Mandelli – Editorial Alsina – Buenos Aires - 1986