

Hola Andrés

Sobre el artículo del buque MOL Comfort y además de los acertados comentarios tuyos y del capitán Pino, quisiera añadir algunas ideas que me vienen a la mente:

Sobre el tema de resistencia longitudinal, fatiga y fractura: El buque está sometido a una serie de esfuerzos y tensiones, que causan flexiones al casco y eventualmente fallas o fracturas. Estos esfuerzos pueden ser estructurales o locales. Además influyen en la resistencia a la falla estructural la calidad del acero, el tipo de construcción y las condiciones de operación: temperaturas, estados de la mar, temperatura, etc.

Flexiones Longitudinales: Fuerzas cortantes y momentos flectores:

Los esfuerzos longitudinales a que está sometido el casco del buque se dividen en dos: en aguas tranquilas (still water) y en mar abierta (ocean going)

Las dos tienen causas muy diferentes y se analizan por separado. Las de aguas tranquilas son mucho más complejas. En ambos casos, se estudian dos parámetros que caracterizan las flexiones longitudinales (longitudinal deflections): las fuerzas cortantes (shear forces) y momentos flectores (bending moments). Para ello se compara la sección transversal del buque con una barra o viga (beam or girder) ya que así es más fácil aplicar las expresiones matemáticas para el cálculo de momentos de inercia y distancia al eje neutral (neutral axis) y calcular la sección modular (section modulus).

En el caso de las aguas tranquilas (still water), los esfuerzos longitudinales (longitudinal stress) que afectan al casco y las flexiones que sufre están dados por la distribución del peso muerto y el peso en rosca que hundan el buque por unidades de eslora y la distribución de la fuerza de empuje (buoyancy upthrust) que lo mantienen a flote, por unidades de eslora.

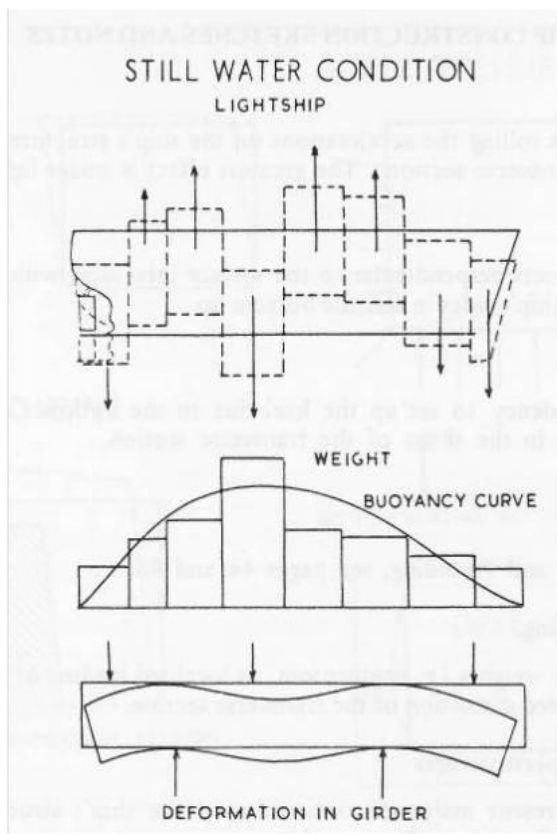
Si bien el buque flota donde el peso total se iguala a la fuerza de empuje (volumen sumergido x densidad), la distribución de uno y otro no son parejas a lo largo de la eslora del casco, por eso me refiero a unidades. Mientras que las unidades de peso en rosca dependen del peso de un compartimiento o sección de la eslora, y las unidades de peso muerto dependen de la distribución de la carga y los líquidos, la distribución de la fuerza de empuje depende del volumen sumergido del compartimiento o sección de la eslora.

Por ejemplo: en un buque dividido en 5 compartimientos: peak proa, bodega 1, bodega 2, bodega 3 y cuarto de máquinas los compartimientos no tienen el mismo volumen sumergido: mientras el peak de proa es pequeño, y la bodega 1 y cuarto de máquinas tienen afinamiento (fineness) y desplazan y flotan menos las bodegas centrales (bodega 2) son anchas y desplazan más por tanto flotan más.

Si encima de ello cargamos el buque con los pesos en los extremos, es decir, toda la carga en las bodegas 1 y 3 y agua en el peak de proa, tendremos los compartimientos extremos que flotan poco por su volumen y pesan mucho, con la tendencia a hundirse, y el compartimiento central (bodega 2) con tendencia a flotar, pues tiene gran volumen y ningún peso

Como resultado, la frontera o mamparo divisorio entre esos compartimientos tendera a cizallarse o cortarse, ya que son dos cuerpos contiguos moviéndose en direcciones opuestas (hundir-flotar) o sea, aparecen los shear forces. En cuanto a los momentos, que no son más que el área bajo la curva de fuerzas cortantes, serán de quebranto (hogging), al hundirse los extremos y levantarse en el medio

El diagrama muestra lo anterior



En cuanto a las flexiones en mar abierta (sea going condition), imagina el mismo barco en quebranto, flotando sobre la cresta de una ola de leva en su combes o sección media, con los extremos en los senos de las olas. Para este cálculo se considera una ola con longitud de onda equivalente a la eslora del buque, y una altura de aproximadamente $L/20$, donde L es la longitud de onda de la ola.

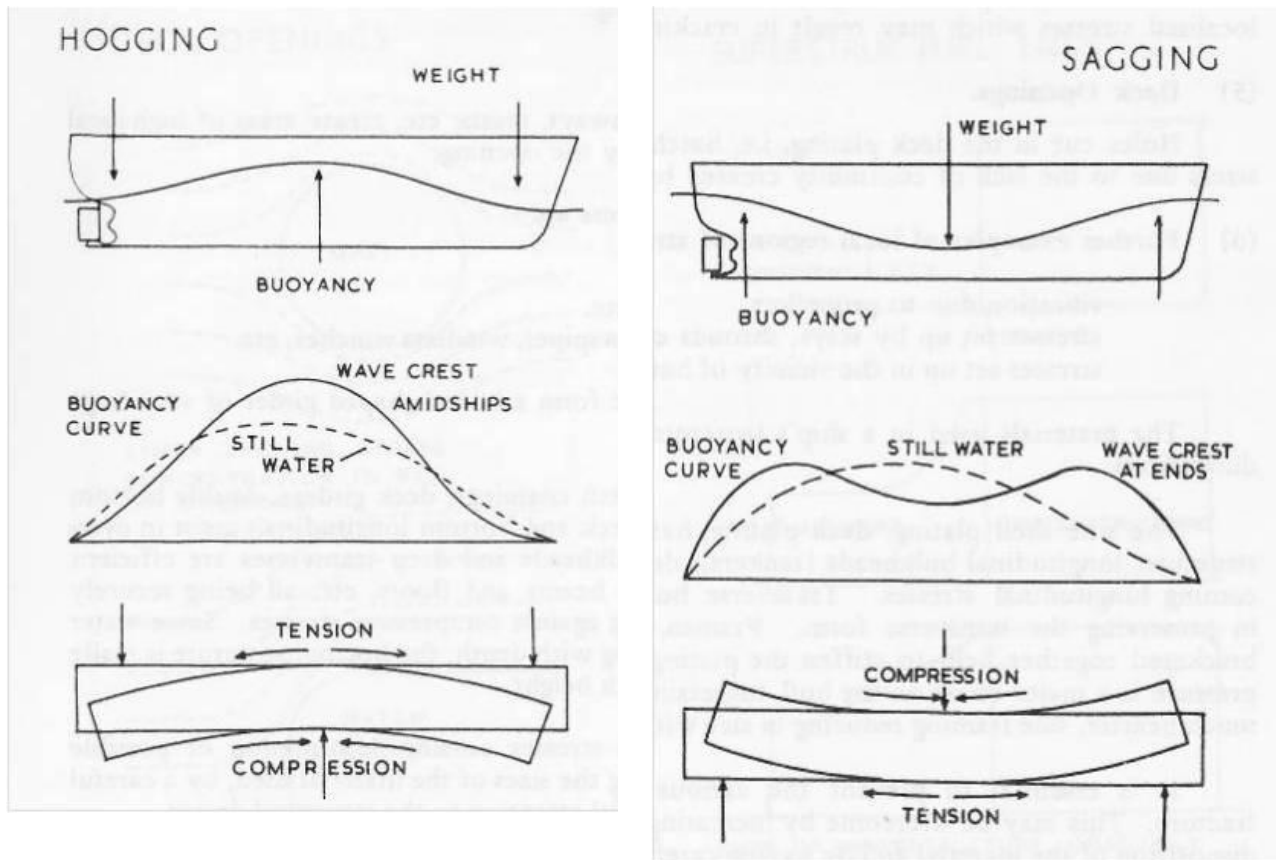
En ese momento toda la fuerza de empuje del buque se centra en el único punto sumergido, el centro, que además no tiene carga. En ese punto la fuerza de empuje tiene un valor máximo,

equivalente a todo el desplazamiento del barco, mientras que no hay peso. El compartimiento flota con toda fuerza.

En los extremos sucede lo contrario: los compartimientos están casi fuera del agua, la fuerza de empuje es mínima, y sobre ellos actúa todo el peso añadido al buque, tienden a hundirse con toda fuerza

Esta situación, conllevaría a un esfuerzo máximo para el barco: las fuerzas cortantes y sobre todo el momento flector serían máximos.

El diagrama muestra lo anterior:



Lo anterior es un análisis estático de los efectos de la ola en la resistencia longitudinal. Estudios se han hecho de los efectos dinámicos en la estructura del buque, instalando *statistical strain gauges* en el casco.

Las reglas de construcción (CSR) de las sociedades clasificadoras definen como calcular las fuerzas cortantes y momentos flectores máximos para cada buque, en aguas tranquilas y en mar abierta. Dichas formulas contemplan entre otros la eslora, la manga y el coeficiente de bloque del buque.

La relación valores reales / valores máximos, en por ciento, nos da una idea de cuan cerca se está del límite

Sobre este punto hay que aclarar que es relativamente seguro navegar con un por ciento alto de momentos flectores y fuerzas cortantes: en el cálculo de cantidad de aceros (scantling) se añade un factor por corrosión, lo que añade un margen de seguridad por la edad del buque. También los valores reales implican una ola cuya longitud de onda es prácticamente el peor caso que puede enfrentar el barco: aquella cuya longitud de onda es igual a la eslora del buque. La pregunta es en qué situación meteorológica navegar en esta condición y por cuanto tiempo.

Todas estas flexiones en la forma de arrufo o quebranto crean tensiones internas en el material, como muestra el segundo grafico. Si tomamos una barra y la doblamos en forma de quebranto, las fibras en la parte exterior de la curvatura estarán en tensión, es decir, estiradas. Las fibras en la parte interior de la curvatura estarán en compresión (en cierto eje no estarán ni en tensión ni compresión, este se llama eje neutral). Por una parte los metales solo pueden asimilar la tensión o la compresión hasta cierto límite (yield point) antes de sufrir deformaciones perennes. Por otra parte sucesivas deformaciones opuestas (cyclic stress), como arrufo-quebranto-arrufo debido a la forma en que un buque se posiciona en la ola, puede conducir a la fatiga y eventualmente a las rajaduras o fallo estructural.

Esfuerzos Locales:

Durante el servicio y la navegación los buques están sometidos a esfuerzos o tensiones locales en diferentes partes de la estructura

- 1- *Presión hidrostática del agua:* Se produce en los costados y el fondo plano, producto de la presión del agua que es mayor a mayor profundidad, es decir, la presión lateral ejercida sobre el casco en la zona de la flotación es menor que en la zona de los pantoques y fondo plano. La tendencia es a hundir el fondo y los costados en el centro.
- 2- *La varada:* Durante la varada la mayor parte del peso del buque se asienta sobre los bloques en el dique, que a su vez se sitúan debajo de la quilla. Si bien la quilla es un área reforzada y esta diseñada para ello, la magnitud del peso del buque y el área reducida de apoyo del casco eleva las tensiones en esa zona. La tendencia es a hundir el fondo en el centro
- 3- *Los pantocazos (pounding or slamming shocks):* La combinación del cabeceo del buque con su elevación y posterior caída en el seno de una ola es lo que provoca el pantocazo, de efectos conocido por todos los marinos. Las vibraciones son tremendas a lo largo de toda la eslora del buque y se sienten perfectamente en el puente, que está situado a popa. Debido a esto las mismas reglas mencionadas estipulan un reforzamiento en el doble fondo de la zona de proa. Los efectos del pantocazo van desde pequeñas deformaciones hasta tajamares aplastados.

- 4- *Panting*. Esto no sé como se dice en español, son los consecutivos cambios de presión en la zona de proa debido al cabeceo. Según se hunde la proa, la presión del agua aumenta, según se eleva, la presión en la misma zona disminuye.
- 5- *Cargas puntuales*: Cuando colocamos pesos enormes en el plan de la bodega, tales como grandes maquinarias, piezas de mármol, la concentración de pesos en un punto aumenta las tensiones en esa sección transversal. La tendencia es a hundir el fondo plano, o plan, separando los lados en el fondo y acercándolos en la parte superior de la sección transversal.
- 6- *Discontinuidades* : Las aberturas de los pedestales de las grúas, las esquinas de las brazolas, las terminaciones de las superestructuras son todos puntos de discontinuidad donde se van a acumular tensiones

Block Loading o Máxima Carga por bodegas y bodegas alternas:

En la actualidad cuando se diseñan los buques, se elaboran curvas para el máximo de carga por bodega. Dicho máximo de carga tiene en cuenta el calado. Lo anterior es resultado de analizar los efectos de la presión hidrostática del agua en la estructura transversal del buque, o en otras palabras: el balance entre peso y flotación en un compartimento determinado.

EL exceso de carga en una bodega, más allá de lo calculado en estas curvas, provocaría una deformación en las partes altas de la sección transversal: top sides y brazolas.

EL doble fondo de una bodega soporta una carga llamada Carga Vertical o Vertical Load. Esta fuerza es la diferencia entre el peso de la carga y la fuerza de empuje en ese compartimento. Como se sabe la fuerza de empuje depende del volumen sumergido que a su vez es una función del calado.

Si metes mucho peso en una sola bodega; pero aun así solo una fracción de la capacidad de peso muerto, la diferencia entre ese peso masivo y la relativamente pequeña fuerza de empuje será la carga vertical o Vertical load, actuando hacia abajo, hacia el doble fondo. La tendencia será a deformarlo y como parte de toda una estructura rectangular, a deformar la sección transversal de la bodega

Igualmente si se cargan bodegas contiguas: digamos un buque de 6 bodegas cargado con concentrados de minerales, cargas de muy alta densidad, en las bodega 1-2 y 4-5 (3 y 6 vacias). Aquí se le mete todo el peso a esas bodegas sin estar el buque a máximo calado. La diferencia entre el peso por bodegas contiguas contra la flotación va a incrementar la mencionada carga vertical.

Condición de inundación:

El reciente código de estabilidad intacta estipula las condiciones en las cuales un barco averiado aun con un compartimento inundado debe ser capaz de mantener su integridad. Si bien una condición o distribución de cargas puede ser satisfactoria en cuando a valores de SF y BM, que pasa si uno de los compartimentos se inundan?, serán los valores de SF y BM todavía aceptables en ese compartimento inundado después de la adición del peso del agua?

En caso de inundación no solo vale que el buque se mantenga a flote, pues para eso se calcula el francobordo y la capacidad de las bodegas o cantidad de divisiones transversales estancas, también es importante que una vez el compartimento este inundado el buque no sufra daños o falla estructural.

Los programas de estabilidad y carga que hoy calculan los valores de flexiones longitudinales, también calculan dichos valores después de la inundación de cada uno de los compartimientos de carga del buque

Condiciones de operación: temperaturas

Aunque los buques que se construyen para operar en bajas temperaturas tienen códigos de aceros especiales para ello, hay dos cosas a tener en cuenta aquí. A bajas temperaturas el comportamiento atómico del acero cambia.

Los metales evitan la fractura moviendo los átomos dentro de su estructura cristalina. El átomo “brinca” de un enlace a otro mientras las tensiones están presentes, para volver a su posición inicial una vez las tensiones han desaparecido, a menos que las tensiones sigan aumentando.

A altas temperaturas los átomos del acero vibran con más frecuencia y amplitud. Este incremento en las vibraciones es lo que le permite deslizarse bajo tensiones, rompiendo enlaces y formando nuevos con otros átomos dentro del material. Esto se observa desde afuera como deformaciones plásticas del material o la llamada Ductile Fracture.

Sin embargo a bajas temperaturas las vibraciones de los átomos disminuyen, y los átomos en lugar de deslizarse a nuevos emplazamientos en el material, simplemente rompen el enlace y no forman uno nuevo. Esto se llama Brittle Fracture.

En la primera parte hablaba de como las fibras de una viga están en tensión / contracción cuando se producen flexiones longitudinales. Pues bien cuando un buque opera en zonas frías o templadas, la temperatura del agua se mantendrá relativamente estable (entre 1 y 5 grados sobre cero), mientras que la temperatura exterior puede ser de decenas de grados bajo cero

A consecuencia de esto, la obra viva del buque tendrá una temperatura mucho mayor que la obra muerta. El metal de la obra viva se expande y el de la obra muerta se contrae, produciendo arrufo (sagging). Por el contrario en estas zonas en verano las temperaturas de las aguas permanecen frías mientras las temperaturas durante el día suben substancialmente, provocando que la parte de la obra viva se contraiga y la obra muerta se expanda causando quebranto (hogging).

Este efecto no puede ser subestimado: hace apenas dos semanas tuve que hacer el alijo de un buque que llego al seaway con exceso de calado y quebranto, y hacer la investigación del caso: entre las 6:15 de la mañana y las 11 del día, sin mover un solo peso, vi el quebranto aumentar 6 cms. Algunos capitanes han reportado aun mas de 6 cms. Para ello las tripulaciones rocían agua del rio y los lagos sobre la cubierta, para “enfriar” la obra muerta del buque.

Los aceros y sus propiedades:

Sobre esto no puedo decir mucho, esto es Metalurgia y es toda una ciencia, pero dentro de la arquitectura naval en el área de corrosión, fatiga y fractura se estudian los diferentes tipos de acero, la influencia del contenido de carbono y otras aleaciones en la dureza, resistencia a las tensiones y otras cualidades.

En el punto anterior hablaba de brittle fracture y la influencia de la temperatura.

Los aceros de construcción ya vienen con tensiones y daños, a veces rajaduras internas. La forma de producción del acero, y su enfriado va a influir en su calidad: los aceros enfriado rápidamente se vuelven quebradizos (brittle). Esto tiene que ver con la estructura cristalina del acero: a altas temperaturas el acero tiene una estructura cristalina cubica centrada en las caras (face centred cubic or austenite). Según la temperatura baja, la estructura cristalina cambia a cubica centrada en el cuerpo (body centred cubic or ferrite)

Cuando se bajan las temperaturas lentamente, el carbón sale de la solución y se enlaza con otros átomos de hierro formando un materia ductil: pearlite. Sin embargo si la temperatura baja rápidamente, el carbón se queda atrapado en la solución, formando un material fuerte pero quebradizo: martensite.

Esto es lo que sucede en el proceso de soldadura, la caída rápida de la temperatura puede producir rajaduras.

Las impurezas también reducen la calidad del acero, especialmente las relacionadas con el azufre. La presencia de impurezas de azufre crea capas internas en el acero. Cuando este acero se somete a soldaduras superficiales se produce un tipo de fractura llamado Lamellar tear.

Actualmente en la industria naval se producen aceros para diferentes tipos de condición de servicios, aceros como el martensite se pueden utilizar en plataformas offshore, siempre que la fatiga no sea un riesgo, también se le añaden otros materiales para mejorar sus propiedades: para aceros utilizados en la construcción de buque se reduce el carbón, para hacerlo menos brittle, pero a la vez se añaden cobre, níquel, manganeso, para aumentar su dureza, o aluminio, y vanadio para hacer el grano más pequeño.

También se están haciendo bastante generalizado los high tensile steel en algunas partes del buque.

Este es un tema que estoy empezando a estudiar, y es bastante complejo, pero la forma en que se forman determinadas fracturas o fallas en el buque depende del tipo de acero y sus propiedades.

Construcción:

Todos los buques se construyen de acuerdo a reglas de una sociedad clasificadora, hoy unificadas bajo un único código: common structural rules. Ello significa que todos deben estar listos para navegar con seguridad independientemente que unos diseños sean más fuertes que otros:

Existen dos maneras de diseñar las estructuras internas del buque: transversales o transversal framing y longitudinales o longitudinal framing. En realidad se usan combinaciones de ambas: en los graneleros es

usual utilizar la estructura transversal para los costados (cuadernas) y la longitudinal para los doble fondos. En los contenedores y tanqueros con doble casco es usual la longitudinal en los costados.

En cualquier caso, algunos diseños son más fuertes que otros, aun si todos se construyen bajo las mismas reglas: hay graneleros de doble casco contruidos con longitudinal framing en los costados, lo cual los hace más ligeros. Sin embargo su resistencia longitudinal no es fuerte, esos barcos han tenido que pasar por los astilleros y añadir otros 300 a 500 toneladas de acero en refuerzos a su peso en rosca.

Accidentes y averías:

Esto es obvio: durante la operación del buque se pueden producir accidentes como colisiones con objetos fijos o flotantes, varaduras, etc. que provocan averías al casco: hundimientos, rajaduras, etc. En las zonas afectadas por la avería, se va a producir una aceleración en la corrosión, perdida del calibre de la plancha y por tanto perdida de su resistencia, o simplemente la perdida de la integridad de la plancha con la rajadura como tal.

Hay que tener en cuenta las fases de una falla estructural por fatiga: rajadura inicial, propagación y fractura. Muchas veces la pequeña rajadura o crack está presente aun cuando las cargas aplicadas son pequeñas o incluso como consecuencia de las soldaduras. Hay que tener en cuenta la propagación de la rajadura y evitarla mediante prácticas como hacer un orificio en el extremo de la rajadura, disminuyendo las tensiones en esa área.

Existe toda una ciencia para determinar la velocidad de propagación de una rajadura, curvas S-N para calcular el tiempo de exposición a la fatiga antes de la falla estructural. Solo agregar que los esfuerzos cíclicos tienden a acelerar el proceso de la fractura.

Un medio corrosivo acelera el ritmo al cual ocurre la fatiga, por tanto es importante proveer y mantener un sistema de prevención de la corrosión en las estructuras más sensibles (protección catódica y pintura)

Posibles causas de fallas estructurales y su monitoreo:

Todo lo anterior es solo una muestra de cuantos factores afectan la resistencia longitudinal del buque.

Todos estos factores tienen que tenerse en cuenta al explotar el barco y a la larga depende del grado de marinería del mando preverlos, monitorearlos y evaluarlos.

- 1- Toca al oficial distribuir la carga correctamente, evitando siempre que sea posible flexiones excesivas. Si es un imperativo hacerlo, tener en cuenta la época del año y duración del viaje. Cuando los cálculos muestran que el buque de 200 metros de eslora navegara con 95% de BM, esto lo hace considerando olas de 10 metros con longitud de onda de casi 200 metros. Si la travesía es en verano, corta y en condiciones de mar buenas, el valor real de BM será casi la mitad. En invierno por el contrario esa condición no se debe aceptar

En el caso de los contenedores, es importante el peso correcto por unidad. Es sabido que en los últimos años ha habido una serie de accidentes provocados por declaración falsa del peso de los

contenedores. Eso ha provocado incluso buques escorados con GM negativo. La distribución longitudinal de los contenedores tiene que considerar el peso de los mismos, si el peso es falso puede dar lugar a la ubicación errónea de los pesos.

- 2- Si bien no se pueden escoger las condiciones de tiempo, si se puede escoger como lidiar con fenómenos meteorológicos y como capear la mar gruesa. Aquí se ha hablado de casos en el pasado donde tratando de implantar records de travesías se navegaba por zonas de mal tiempo. Cada pantocazo y flexiones continuas, si bien no parten el buque, disminuyen su periodo de servicio, crean pequeñas grietas, aumentan la corrosión del casco y lo hacen más vulnerables a fallas estructurales.

También es conocido que determinados ángulos de aproximación a la ola son más benévolos que otros, particularmente por las amuras y aletas. La mar de proa provoca los pantocazos, de costado balance excesivo. Además de evitar fenómenos meteorológicos importantes, a veces hay que desviarse de la ruta inicial haciendo “patas” para evitar la mar de costado o de frente, en cuyos casos arribar en tiempo no debe ser una prioridad.

El objetivo no solo es proteger la integridad del casco y de la pintura sino también evitar las cargas fluctuantes y cíclicas (fluctuating loads and cyclic stress)

- 3- Monitorear el estado de las flexiones en todo momento cuando hayan cambios en la distribución de los pesos a bordo. La práctica de calcular los loading / unloading schedules se acerca a este objetivo: no permitir ni siquiera transitoriamente una condición donde se excedan los valores permisibles de flexiones.
- 4- Independientemente de las inspecciones periódicas del casco por la Clase, así como las calibraciones de la plancha, después de cada navegación, sobre todo si ha habido exposición al mal tiempo se debe hacer una inspección del casco, mirando los puntos más vulnerables: esquinas de las brazolas y otros puntos de discontinuidad en la cubierta principal, así como extremos de las cuadernas y uniones con los cartabones en las bodegas, buscando rajaduras o deformaciones (buckling) por pequeñas que sean. También deben revisarse los cordones de soldadura sobre todo en estas áreas.
- 5- De detectarse problemas estructurales como se menciona arriba, hay que tomar medidas correctivas inmediatas como practicar orificios al final de la rajadura si no hay una solución inmediata y permanente aprobada por la clase, por ejemplo por encontrarse el buque en altamar navegando . En este caso hay que extremar las precauciones en cuanto a zona de navegación / estado de la mar.