

TÉCNICAS DE CÁLCULO APLICABLES AL SALVAMENTO DE BUQUES VARADOS.-

Por el Capt. SEBASTIÁN ROJO GARCÍA-
Práctico de Garrucha-Carboneras



1. INTRODUCCIÓN.-

Existe un concepto muy general e incluso habitual del término varada que comprende el hecho de situar un buque en un dique seco o varadero para inspeccionar, limpiar, reparar y pintar su carena; pero el sentido técnico del vocablo hace referencia al hecho de que un buque toque fondo y quede inmovilizado en él sin poder seguir flotando (siendo indiferente la naturaleza del fondo que produce la inmovilización), corriendo el riesgo de originarse averías importantes; en este sentido, se hace hincapié en que la varada significa que el buque queda inmovilizado, pero sin hundirse ni fracturarse contra la costa. En algunos casos la varada puede desembocar en una catástrofe ecológica por el vertido de combustible y/o carga a la mar¹.

El hecho de tocar o golpear con la quilla el fondo no se considera como una varada si no se ha dejado de flotar y el buque no queda inmovilizado durante un cierto tiempo; sin embargo tampoco se considera varada, cuando un buque se apoya sobre fondos blandos (arena, fango) en un estuario, ría o puerto por efecto de la bajamar, sin riesgo ni daños, pero con facilidad para recobrar su flotabilidad durante la pleamar sin asistencia.

Las dificultades para calificar la varada aparecen cuando un buque vara y sale navegando con la única fuerza de su propulsor. En realidad la varada queda determinada con la intervención de un remol-



Fig. 1 - Buque Pasha Bulker varado en off Nobbys Beach, Newcastle (Australia) 06-2007.-
Fuente: Couriermail.com.au

cador o la imposibilidad de ser re-flotado autónomamente, por las características del fondo, del buque o de la mar y viento.

Desde el punto de vista del Derecho Marítimo la varada tiene naturaleza de avería simple y por excepción, de gruesa o común, formando parte de un característico accidente de mar que acontece durante la navegación y, en particular al entrar, salir, navegar y fondear en puertos, canales, o ríos. La varada puede ser de tres tipos: a) *justificada*, cuando se ha buscado voluntaria-

mente para evitar otro accidente de mayor gravedad; b) *no culpable*, cuando se trata de supuestos de caso fortuito o de fuerza mayor y, c) *culpable*, producida por imprudencia, negligencia o impericia del capitán del buque o del oficial de guardia.

2. CONCEPTO Y OBJETIVOS.-

Históricamente, los equipos de rescate² que coordinan las operaciones de salvamento de buques varados, han tenido que evaluar su estado en lo referente a su estabili-

1.- Varar equivale también a apoyar un buque la quilla en el fondo, por no haber profundidad suficiente para flotar. En este sentido es sinónimo de embarrancar, clavarse, enfangarse y encallar. Sin embargo, normalmente el verbo varar se usa cuando se trata de fondos de fango o arena, y el de encallar cuando son de piedra.

2.- La mayoría de los rescatadores profesionales son miembros de la Unión Internacional de Salvamento (ISU). Son compañías preparadas para asistir a una contingencia marítima con personal experimentado y medios suficientes para responder a las operaciones de salvamento (actos o actividades emprendidos para auxiliar o asistir a un buque o para salvaguardar cualesquiera otros bienes que se encuentren en peligro en aguas navegables o en cualesquiera otras aguas). Desde el punto de vista jurídico, la norma principal aplicable es el "Convenio Internacional de Salvamento Marítimo" de 1989 (CSALV/89) que entró en vigor el 14 de julio de 1996 y que a su vez deroga la Ley 60/1962, de 24 de noviembre, sobre "Auxilios, Salvamentos, Hallazgos y Extracciones Marítimas". La base tradicional de "no cure-no pay" tiene una nueva estipulación en el Convenio del 89, los artículos 12, 13 y 14, establecen las condiciones y los criterios al derecho a la recompensa: *las operaciones de salvamento que hayan producido un resultado útil darán derecho a recompensa, la recompensa no podrá exceder el valor del buque y otros objetos salvados.*

dad, resistencia longitudinal, posibilidad de derrames de hidrocarburos, efecto de la bajada de la marea, cambio en las condiciones del viento y/o mar sobre el buque, etc., utilizando técnicas estimadas para llevar a cabo los cálculos apropiados a las circunstancias y condiciones en las que se encuentra el buque a rescatar, operando con importantes limitaciones en la recapitulación de los datos necesarios y contando con una capacidad de cálculo limitada.

Considerando que los problemas para obtener y medir los datos de la situación del buque varado son inherentes a la propia situación del salvamento, que dichos datos están afectados por algo de incertidumbre, y que además, la información del buque intacto frecuentemente está limitada en su disponibilidad, fiabilidad y en el tiempo, los

rescatadores deben estar preparados para estimar y operar rápidamente con un mínimo de datos reales o de una fiabilidad razonable.

Si los rescatadores dispusieran inicialmente de la información necesaria y suficiente para cuantificar el problema de la varada de una forma rápida, se facilitaría la toma de decisiones de movilización y con ello se agilizaría mucho la ejecución de la estrategia final que se fuera a emplear. Es también importante el grado de experiencia de los equipos de intervención, ya que gracias a ella los esfuerzos para reflotar el buque tendrán mayor éxito, evitando pérdidas de tiempo que prolongan innecesariamente la exposición del buque dañado a riesgos adicionales.

Para facilitar el problema de la disponibilidad y fiabilidad de los datos necesarios, gracias a la informática,

estos expertos han desarrollado ayudas analíticas y métodos actualizados de estimación, como los utilizados en el proceso de diseño preliminar de cualquier buque³, con el objetivo fundamental de definir de forma fidedigna un flotador similar al buque varado y desarrollar un plan de respuesta rápida para el mismo, utilizando una información concisa del buque relativa a dimensiones principales, tipo, número y distribución de tanques y/o bodegas, tanques de lastre, combustible, etc. Para poner en marcha todo lo indicado y como punto de partida, se utilizan los coeficientes de carena o de forma y otros parámetros derivados para calcular varias propiedades hidrostáticas, factores de estabilidad, escora y calados, reacción del fondo sobre el buque, así como los esfuerzos estructurales a los que está sometido.

3. SIMBOLOGÍA.-

A_{LA}	= Área del plano de flotación.	$Mto.A$	= Momento del par adrizante.
a	= Asiento o trimado.	$Mto.E$	= Momento del par escorante.
C_B	= Coeficiente de bloque.	$Mto.U$	= Momento unitario o para variar el asiento 1 cm.
C_{LA}	= Coeficiente del plano de flotación.	$Mto.U_1$	= Momento unitario en máxima carga.
C_L	= Coeficiente de inercia longitudinal.	$Mto.U_2$	= Momento unitario para una nueva condición.
C_T	= Coeficiente de inercia transversal.	P	= Puntal.
CG	= Brazo del asiento o trimado.	P_{pp}	= Perpendicular de popa.
C_m	= Calado medio.	PM	= Peso muerto de verano.
C_{m1}	= Calado medio en condición de máxima carga.	$P_{pp}C$	= Posición longitudinal del centro de carena.
C_{m2}	= Calado medio para una nueva condición.	$P_{pp}C_1$	= Posición centro de carena en máxima carga.
C_{mb}	= Calado medio antes de la varada del buque.	$P_{pp}C_2$	= Posición centro de carena (nueva condición).
C_{ma}	= Calado medio después de la varada del buque.	$P_{pp}F$	= Posición longitudinal centro de flotación.
CM	= Radio metacéntrico transversal.	$P_{pp}F_1$	= Posición centro flotación en máxima carga.
CM_L	= Radio metacéntrico longitudinal.	$P_{pp}F_2$	= Posición centro de flotación (nueva condición).
C_P	= Coeficiente prismático.	$P_{pp}G$	= Posición longitudinal del centro de gravedad.
E	= Eslora.	Q	= Distancia longitudinal entre centro de flotación y R.
E_{pp}	= Eslora entre perpendiculares.	R	= Reacción del fondo.
f	= Factor en función del tipo de buque.	S	= Distancia transversal entre R y la línea de crujía.
GM_L	= Altura metacéntrica longitudinal.	Tpc	= Toneladas por centímetro.
G_vM	= Altura metacéntrica corregida por sup. libres.	Tpc_1	= Toneladas por centímetro para máxima carga.
G_sM_s	= Altura metacéntrica transversal buque varado.	Tpc_2	= Toneladas por centímetro para nueva condición.
G_s	= Centro de gravedad del buque varado.	Vm	= Velocidad de servicio del buque.
I_x	= Momento de inercia transversal de la flotación.	Δ	= Desplazamiento en general.
I_F	= Momento de inercia longitudinal de la flotación.	Δ_D	= Desplazamiento de verano o máximo.
K	= Quilla.	Δ_R	= Desplazamiento en rosca.
KC	= Altura del centro de carena sobre la quilla.	Δ_s	= Desplazamiento del buque varado.
KG	= Altura del centro de gravedad sobre la quilla.	∇_R	= Volumen de la rebanada de altura 1 centímetro.
KG_s	= Altura del centro de gravedad durante la varada.	δ	= Densidad del agua donde flota el buque.
KG_v	= Altura del centro de gravedad corregida por SL.	λC_{pr}	= Variación del calado a proa.
KM	= Altura del metacentro sobre la quilla.	λKM	= Variación de la distancia metacentro-quilla.
M	= Manga.	\otimes	= Cuaderna maestra (perpendicular media).

3.- El proyectar las formas de la carena de un buque es un proceso complejo, en el que intervienen distintos aspectos de la ingeniería naval, principalmente resistencia y propulsión, estabilidad, trimado, compartimentado, maniobrabilidad, capacidad de los espacios de carga y su estiba más adecuada, procesos de fabricación, etc. Es decir, que una gran parte de la construcción naval está presente de forma activa durante el proceso de definición de las formas del buque.



4. CONSIDERACIONES EN EL CASO DE VARADA.-

En Teoría del Buque estudiamos que cualquier buque tiene libertad para moverse en todas las direcciones y que las fuerzas exteriores que actúan son independientes, en magnitud, de las posiciones que pudiese tomar al flotar libremente. Cuando un buque queda varado, resulta que la magnitud de dichas fuerzas varía con las posiciones que toma el mismo. Es decir, si por cualquier circunstancia se produce una varada, las fuerzas que actuaban cuando flotaba libremente (desplazamiento y empuje), se modifican debido a que ahora el buque queda soportado por el fondo y por el empuje del agua. En esta situación la nueva condición de equilibrio se establece entre el desplazamiento, el empuje y la reacción del fondo.

En el instante de quedar un buque varado, queda sometido a una fuerza adicional vertical que pasa por el punto de varada y que está situada en el plano longitudinal. Como se sabe, el fondo ejerce una fuerza hacia arriba denominada reacción, que actúa sobre la parte del casco que se encuentra en contacto con él, siendo igual en magnitud a la pérdida de flotabilidad que ha sufrido el buque. Esa presión del fondo o fuerza de presión equivalente en toneladas, tiene el mismo efecto sobre el calado, la escora, el asiento, y la estabilidad del buque, como en el caso de descargar un peso de igual magnitud desde el punto exacto de aplicación de la fuerza de presión en la zona de contacto entre el casco del buque y el fondo donde quedó varado; en otras palabras, existe una pérdida de peso aparente o virtual que provoca una pérdida de calado y un cambio del asiento (la pérdida de flotabilidad es igual a la pérdida del volumen de carena cuando está intacto). En el caso de estar el punto de aplicación de la fuerza de presión situado fuera del plano longitudinal, diametral o de crujía, el buque se escorará. Como resulta que el calado, el asiento y la escora se alteran, entonces el volumen sumergido, el plano de flotación y las

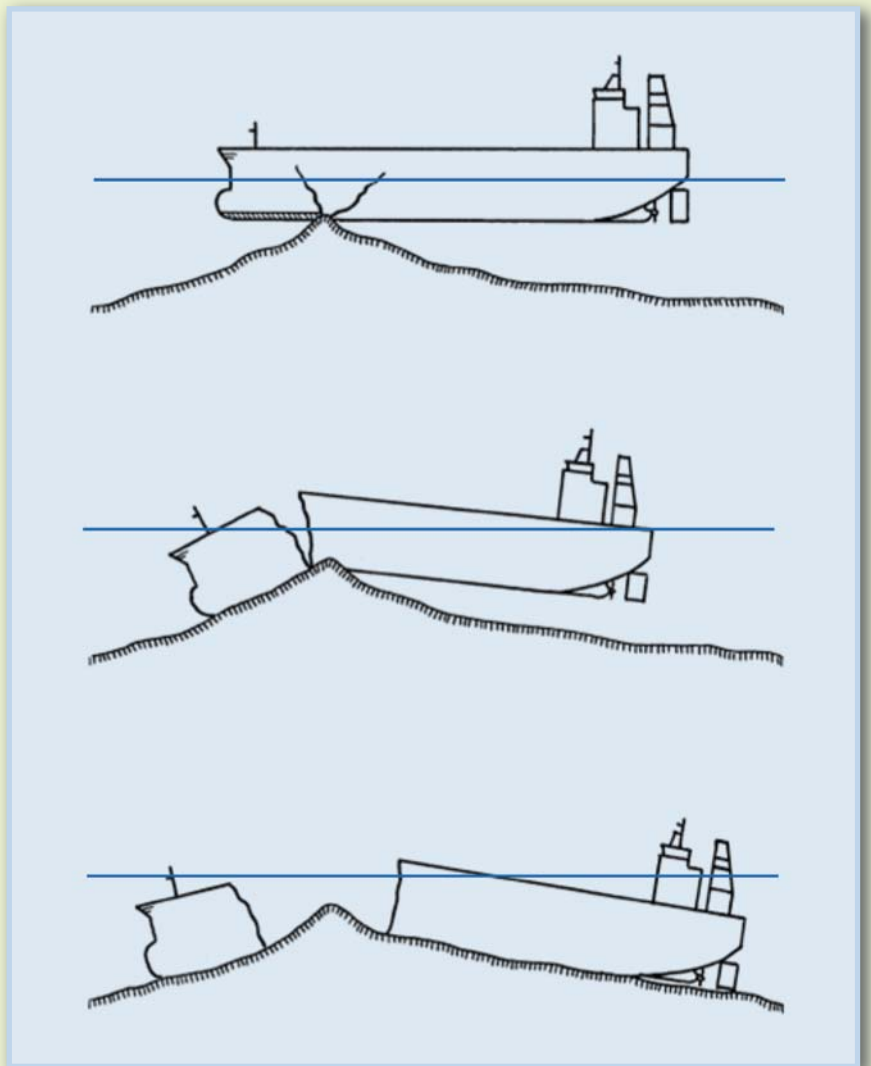


Fig. 2 - Varada y rotura del buque Kowloon Bridge 1986.-
Fuente: RINA, Vol. 133, pág.409

propiedades hidrostáticas variarán de acuerdo a esto. Sin embargo, cuando un buque queda varado sobre un fondo liso, existe una pequeña posibilidad de que zozobre, incluso con marea vaciante.

Para que un buque zozobre, la varada debe producirse sobre un fondo que no proporcione restricción a escorar, (p.e. sobre una aguja o bajo muy pronunciado donde el buque puede escorarse más allá de la amplitud de su curva de estabilidad posible). En la misma línea, resulta improbable la zozobra de un buque, cuando no actúen las fuerzas que intenten volcarlo transversalmente, a menos que la amplitud o alcance de su curva de estabilidad estática transversal sea mucho menor de lo normal. Para

C.S. Moore, a menos que el buque se atraviese, se deslizará desde el punto de contacto cuando la tangente del ángulo entre el plano de quilla (paralelo al de base) y la horizontal del fondo exceda del coeficiente de fricción estático entre el casco del buque y el fondo bajo el cual ha quedado varado, por lo general este ángulo es menor que la amplitud máxima de la curva de estabilidad estática positiva.

Al entrar en contacto el buque con el fondo, se arrastra por el mismo hasta quedar parado y apoyado sobre él, pudiendo sufrir daños considerables en la zona de carena que ha entrado en contacto con el fondo. Una vez alcanzada la varada, el buque pierde parte de su volumen sumergido equivalente a la

fuerza de empuje o a la fuerza de reacción del fondo. Dependiendo de la magnitud de la fuerza de reacción y de su punto de aplicación, la resultante de los pesos distribuidos a lo largo del casco y las fuerzas de flotabilidad sobrante que actúan sobre el buque, es posible crear un esfuerzo local suficiente para producir un daño adicional en el casco, si además añadimos una posterior bajada de la marea se podrá agravar la condición de los esfuerzos estructurales que afectan al casco ⁴.

En el caso de que un buque quede varado tocando ligeramente el fondo a pesar de la acción de las mareas y además, quede sujeto a la acción de las olas sobre una superficie importante del casco, los movimientos producidos por estas acciones, pueden originar esfuerzos dinámicos sobre el plano de la quilla del buque de tal forma que se pueda llegar a exceder el esfuerzo de ruptura del forro del casco, por lo que se producirían rápidamente fisuras en el acero; además, el efecto neto de la acción de las olas sobre el buque hará que se asiente aún más en el fondo donde se encuentra varado. El impacto de las crestas de las olas contra los costados y contra la popa tenderá a hacerlo rotar por lo que podría atravesarse a la mar quedando en una situación muy comprometida.

Si la varada se produce sobre dos punto localizados bajo sus apéndices, en tales circunstancias aumentan los esfuerzos de arrufo y, por el contrario, si la varada se origina sobre una elevación situada bajo el centro del buque, entonces aumentan los esfuerzos por quebranto. Normalmente, si se produce una varada sin incurrir en daños estructurales, la fuerza de reacción del fondo sobre él no creará una situación de esfuerzo suficiente capaz de causar fallos estructurales. Existe una excepción, cuando el buque está sometido a la acción de las olas y es golpeado violentamente contra el fondo o, es abordado por

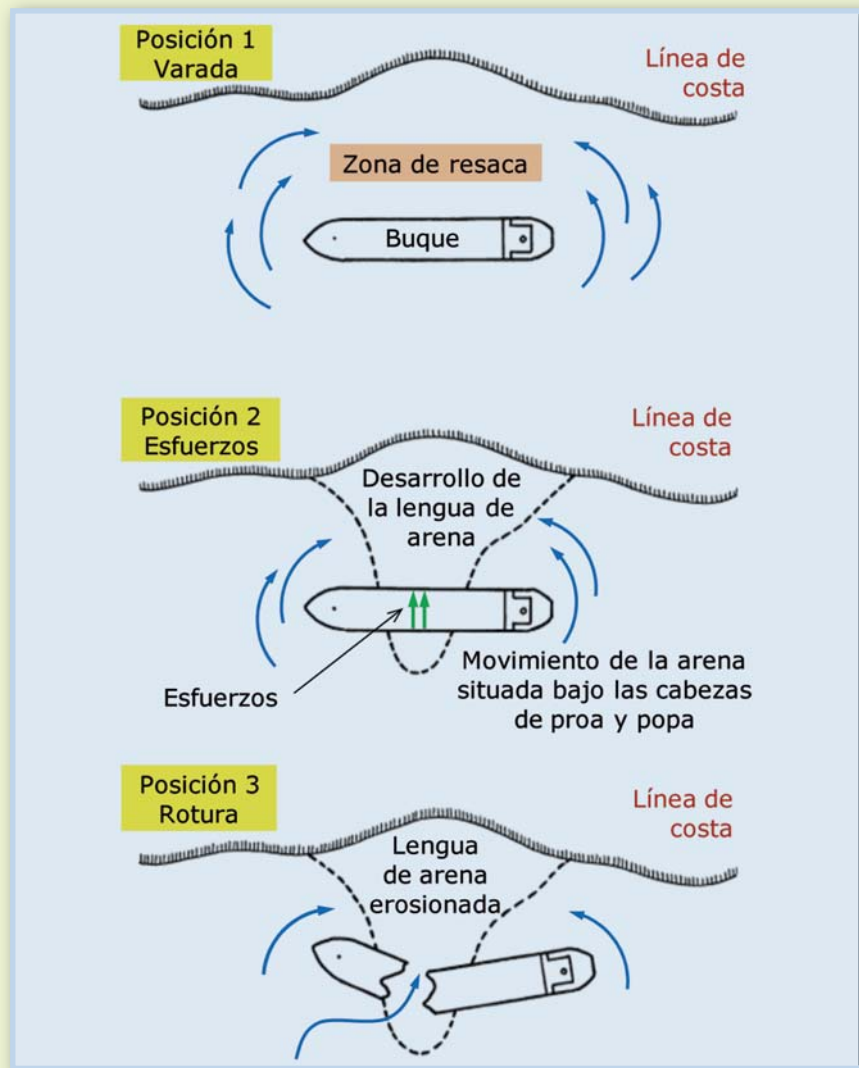


Fig. 3 - El efecto de Broaching se produce cuando la arena o grava sobre la que ha varado el buque es moldeada por la acción de la resaca. Fuente: U.S.Navy.

las mismas en un fondo de arena o grava. Debido al restregado que se produce, la arena es removida hacia fuera de los apéndices o finos del barco, dejándolo en una grave condición de quebranto. Igualmente, para el caso de una varada sobre un fondo más o menos horizontal, hay que evaluar la acción de las corrientes marinas reinantes en la zona, ya que pueden lijar el material de soporte del fondo bajo la proa y la popa mientras se acumula material en el centro del buque originando la presencia de los esfuerzos de quebranto que finalmente pueden producir daños estructurales. En tales circunstancias,

se deben tomar rápidamente medidas para estabilizar el buque. Al mismo tiempo, el impacto de esas acciones debe ser preevaluado para que sean compatibles con la estructura del barco (Fig. 3).

Resumiendo, cuando un buque queda varado, se nos plantean tres importantes situaciones:

- 1) La maniobra para sacar al buque de la varada.
- 2) Conocimiento de la estabilidad, asiento y escora del buque varado.
- 3) Estudio de los esfuerzos estructurales del barco en tal situación.

4 - Los rescatadores deben considerar estos factores cuando manipulen pesos y tomen otras acciones para reflotar el buque para evitar sobreesfuerzos en el casco que causen fallos estructurales. Esto no es diferente del trabajo de un primer oficial de cubierta cuando manipula carga y/o lastre en un bulkcarrier durante las operaciones de carga/descarga.

Para efectuar el salvamento de un buque en tales circunstancias, tenemos que restablecer la pérdida de flotabilidad mencionada anteriormente, mediante la utilización de uno o más de los siguientes procedimientos:

- 1) Con remolcadores apropiados, arrastrar al buque hacia aguas más profundas.
- 2) Eliminar el fondo bajo el cual el buque se encuentra varado.
- 3) Aligerar el desplazamiento del buque.
- 4) Restablecer la pérdida de flotabilidad.
- 5) Proporcionar elemento de flotabilidad adicional.

Resulta importante determinar el punto efectivo del centro de varada ya que con frecuencia se convertirá en el punto sobre el que el buque pivotará. Obviamente, el cálculo de la fuerza necesaria para sacar un buque fuera de la zona de varada, así como la cantidad de peso que debe ser aligerada, requiere estimar la mencionada pérdida de flotabilidad sufrida por el buque después de su varada. Una vez reflotado, con frecuencia pueden surgir problemas de estabilidad, siendo estos más habituales en los casos donde se ha producido una varada con inundación parcial que no ha sido corregida necesariamente para modificar la disposición de pesos requerida para la operación de reflote.

5. RECAPITULACIÓN DE DATOS.-

Inicialmente, las necesidades y procedimientos de cálculo a realizar para el salvamento, no son diferentes de los utilizados por los ingenieros navales en el diseño preliminar del buque, o los manejados por los marinos para calcular desplazamientos, peso muerto, calados, asientos, estabilidad y esfuerzos. En la práctica, los equipos de rescate no puede permitirse el lujo de perder tiempo por limitación de personal, recursos de cálculos limitados y un nivel de los datos insuficiente, en comparación con los que tienen a su disposición tanto los ingenieros navales como los marinos mercantes.

Sin embargo, hoy en día, un número importante de compañías navieras cumplen con los planes de contingen-

cia internacionales OPA-90 y SOPEP, disponiendo además de sus propios equipos de crisis que manejan prácticamente datos reales del buque en tiempo real⁵. Por ejemplo, cuando el equipo de rescate tiene a su disposición los datos hidrostáticos, plano de disposición general, curvas de Bonjean, valores de los desplazamientos en rosca, lastre y máxima carga, capacidades y centro de gravedad de bodegas y tanques (carga y consumos), información estructural, plano de planchas, información sobre compartimentado e inundación, etc., como ya hemos apuntado, pueden calcular teóricamente la magnitud del efecto de la reacción al producirse la varada, el punto efectivo de aplicación de la misma y valorar las condiciones de estabilidad y esfuerzos estructurales del buque varado,



Fig. 4 - Buque Pelikan 1 varado en las proximidades de las esclusas de Amberes.-
Fuente: Britannian news.

5.- Estos planes se preparan con la intención de ayudar al personal embarcado a tratar y luchar contra emergencias imprevistas relacionadas con derrames de hidrocarburos. Todos y cada uno de estos planes de contingencia deben ser desarrollados sobre la base de la OPA-90 (cuando se navega en aguas de los Estados Unidos de América) y el SOPEP (cuando se navega por cualquier zona del globo que no sean aguas estadounidenses). Como objetivo primordial de los planes de contingencias destaca el poder asegurar una respuesta eficaz y a tiempo a los daños causados por los derrames de hidrocarburos o hacia los mismos derrames en sí. Estos planes además deben facilitar una información tal que aseguren que no existirá falta de planificación con lo que se evitarán errores, confusiones, demoras y un empeoramiento de la situación por falta de control. Un punto de vital importancia en su elaboración es el elemento de información: en casos de problemas todo el personal de la compañía (tierra y buque) deben saber cómo actuar y a quién informar, cómo y cuándo. Las autoridades deben recibir una información detallada del incidente y su naturaleza para activar los diferentes sistemas de lucha y contención.

- El Oil Pollution Act of 1990, afecta no sólo a los petroleros, sino que parte de su contenido abarca a todo tipo de buques que entren en aguas de los Estados Unidos. El Vessel Response Plan, es un requerimiento del United States Federal Water Pollution Control Act siendo adaptado y modificado por el Oil Pollution Act of 1990. Este plan de contingencias es aplicable y controlable por los requerimientos establecidos en el 33 CFR 155 – Oil or Hazardous Material Pollution Prevention Regulation for Vessels, subpart D. El plan de contingencia es único para cada buque tanque y debe ser puesto al día anualmente por la autoridad competente. Todo Vessel Response Plan, cuenta con una estructura desarrollada en 10 capítulos que a su vez están divididos en tres apartados diferentes a saber: a) información general común para todos los buques, b) información específica para el barco y su armador, c) información geográfica específica relacionada con los puertos y zonas.

- El Shipboard Oil Pollution Emergency Plan, es un plan de contingencias válido para todo el mundo con la excepción de los Estados Unidos de América, está redactado conforme a las prescripciones de la Regla 26 del Anexo I del MARPOL 73/78 y tiene por objetivo ofrecer orientación al capitán y los oficiales del buque en cuanto a las medidas que es preciso adoptar al ocurrir, o si existe la posibilidad de que se produzca, un suceso de contaminación. El plan contiene toda la información y las instrucciones operativas que las directrices prevén. En los anexos figuran los nombres, teléfono, télex, fax, etc., de los diversos puntos de contacto citados en el plan, autoridades y centros de coordinación en la lucha contra la contaminación. Este plan debe estar bajo la custodia del capitán del buque, distribuyendo copias controladas a todos los oficiales que tengan funciones específicas en él, debe ser puesto al día de forma regular en el momento que se produzcan variaciones sustanciales en los métodos operativos de manipulación del cargamento por la introducción de nuevos sistemas y/o equipos.

siendo capaces de estudiar las diferentes acciones que pueden tomarse (referidas a la estabilidad y esfuerzos) durante el proceso de extracción y en el instante de volver a la condición de libre flotación.

De todo lo hablado hasta ahora, el mayor problema que se plantea sigue siendo la disponibilidad de la información con un grado de fiabilidad aceptable para la toma de decisiones y la valoración de consecuencias ante la posibilidad de un derrame de hidrocarburos que llevará la situación de cualquier varada al límite medioambiental. La triste y cruda realidad, con las consabidas excepciones, es la siguiente: las diferentes lecturas del calado después de la varada con frecuencia son escasas, especialmente con la acción de las olas, la información hidrostática disponible corresponde a un buque intacto en su configuración típica operacional, las famosas curvas de Bonjean no se encuentran normalmente disponibles (al menos en el escenario del accidente), los datos estructurales del buque intacto son prácticamente inexistentes, incluso de estar disponibles, son normalmente imposible de emplearse en la práctica, ya que el conocimiento de los esfuerzos estructurales está bastante agravado por la disponibilidad limitada y por la fiabilidad de la información que se disponga de la estructura dañada. Existe una variación considerable entre los datos disponibles a bordo (todos reales y en tiempo real) y los que se pueden obtener a través de los armadores, fletadores, agentes y otras fuentes diversas (datos semireales y en muchos casos solo informativos).

Durante muchos años y para muchos buques, los datos recogidos en el libro de estabilidad, asiento, condiciones de carga, lastre, esfuerzos longitudinales e instrucciones al capitán, solo el desplazamiento y las toneladas por centímetro contaban con factores de corrección por cambio de asiento y escora. Actualmente, los astilleros incluyen una información muy detallada sobre el buque presentando correcciones por

asiento y escora para el desplazamiento, toneladas por centímetro, coordenada longitudinal y vertical del centro de carena y la altura metacéntrica transversal. Con respecto a la información relativa a los esfuerzos estructurales, la distribución de diferentes tipos de carga (totales y parciales), pesos muertos, estabilidad, escora, calados, pesos deducibles, están disponibles para agua de mar, por el contrario, otros aspectos tales como la distribución de la flotabilidad no lo están.

El American Bureau of Shipping, ABS, y el Lloyd's Register of Shipping (Fairplay) proporcionan en sus publicaciones anuales al menos la siguiente información con respecto a las características de los buques: eslora máxima y entre perpendiculares; manga máxima y de trazado; puntal máximo y de trazado; calado máximo de verano; registro bruto y neto (internacional, Suez y Panamá); toneladas por centímetro de inmersión; velocidad de servicio para el calado de diseño; capacidad de combustible (FO, DO, MGO, LO); peso muerto, provisiones, pasajeros y tripulación para la condición de calado máximo; capacidad de carga en metros cúbicos y número de bodegas o tanques; capacidad de lastre; datos de máquina principal y auxiliares (bwp, kw, rpm). Sin embargo, no se incluyen los datos del desplazamiento de verano o máximo.

6.- FACTORES DE CONTROL EN CASO DE VARADA.-

Las circunstancias bajo las cuales un buque queda varado son variables, por consiguiente, su rescate puede realizarse de diferentes formas. Debido a esto, los factores de control que se aplican para cada situación, proporcionan a los rescatadores una inestimable aportación para realizar una evaluación efectiva de la situación y elaboración de toda la estrategia de salvamento. El desarrollo y cumplimiento de cualquier estrategia de rescate requiere un conocimiento apropiado, medidas cuidadosas y una valoración

técnica de todas las limitaciones, interacciones e impactos sobre la magnitud y distribución de las fuerzas que actúan sobre un buque. Veamos ahora cuales son los diferentes factores de control:

DIFERENTES FACTORES DE CONTROL

Naturaleza, calidad e inclinación del fondo donde el buque ha quedado varado.
Valor de la sonda alrededor del buque y bajo el plano de quilla.
Área del buque en contacto con el fondo.
Condición, característica y tipo de buque que se encuentra varado.
Calados y tipo de carga.
Estabilidad estática.
Esfuerzos estructurales.
Daños sufridos en la varada.
Daños que se prevean durante las operaciones de extracción y reflote.
Cambios de asiento y escora causados por la varada.
Situación del buque y disposición de este con respecto a la costa y a la resaca.
Amplitud de la marea.
Presencia o ausencia de mar de fondo o maretón.
Ola predominante, corriente y condiciones meteorológicas.
Visibilidad bajo el agua.
Tiempo previsto por la asistencia para llegar a la zona del accidente y su capacidad de recursos.

Como conocemos sobradamente, la estabilidad de un buque en estado intacto se mide por:

MEDIDA DE LA ESTABILIDAD EN BUQUE INTACTO

- 1) Estabilidad inicial o altura metacéntrica transversal.
- 2) Amplitud o alcance de la curva de estabilidad estática transversal.
- 3) Máximo par de adrizamiento y el ángulo de escora al cual ocurre el máximo par.
- 4) Estabilidad dinámica.



Después de la varada, puede producirse una disminución de la estabilidad del buque (en comparación con la que tenía justo antes de producirse la varada) debido a cualquiera de los factores siguientes:

FACTORES DE DISMINUCIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL BUQUE

Disminución de pesos en los puntos bajos del buque.

Aumento de pesos en la parte de cubierta principal o por encima de esta.

Pérdida de la reserva de flotabilidad debida a pesos adicionales y/o pérdida de límites estancos al agua.

Inundación.

Efectos de las superficies libres.

Libre comunicación con la mar.

Escora debida a la inundación asimétrica o a los cambios de los pesos.

Además de las consideraciones sobre estabilidad, debe tenerse presente el impacto de cualquier acción realizada sobre la distribución de los pesos del buque varado, de tal forma que el esfuerzo estructural residual del barco después de la varada no sea excesivo. Las consideraciones estructurales que deben plantearse, presentan dos problemas:

- a) Las modificaciones de los pesos del buque varado (cargas, descargas y traslados), deben realizarse de forma que cuando el buque sea re-flotado y consecuentemente sujeto a fuerzas dinámicas de la navegación, no esté sometido a excesivos momentos flectores y esfuerzos cortantes.
- b) Cuantificar de forma fiable el impacto de cualquier daño estructural sobre el casco. En otras palabras, el peso, la flotabilidad y las curvas de carga de un buque con el casco intacto son válidas para esta condición, pero después de la varada, hay otros factores que determinan si la resultante de los momentos flectores y esfuerzos cortantes están dentro de los límites estructurales.



Fig. 5 - Cargo Ferry Riverdance, varado en Lancashire (Irish Sea) el 31 de enero de 2008.-
Fuente: www.flickr.com

7. TÉCNICAS ANALÍTICAS.-

Considerando la presencia de variaciones en la fiabilidad y disponibilidad de los datos suficientes para los cálculos, fue necesario el desarrollo de técnicas analíticas lo suficientemente precisas como para cubrir las necesidades del rescate con un mínimo de información. Entonces surge la siguiente cuestión ¿qué nivel mínimo es el suficiente para realizar los cálculos con la exactitud apropiada? Resulta obvio, la técnica analítica y la disponibilidad de la información utilizada son cuestiones inseparables, una depende de la otra.

Hasta la aplicación de la informática a nivel de usuario, las empresas y equipos especializados en el rescate de buques varados en particular y siniestrados en general, han utilizado métodos aproximados o técnicas analíticas (limitados por tener que ejecutarlos de forma manual) para estimar la magnitud y distribución de las fuerzas que actúan sobre un buque varado y las implicaciones de estas fuerzas sobre la estabilidad y la estructura del mismo. La informática ha aportado una elevada capacidad y calidad de cálculo, de hecho, los métodos aproximados han adquirido una muy buena precisión en la solución con la que se pueden operar estos recursos quedando únicamente limitados por la disponibilidad de la información y por el tiempo necesario para su introducción.

7.1 CÁLCULO DE LOS FACTORES DE ESTABILIDAD.-

En ausencia de las tablas hidrostáticas y del desplazamiento, no queda más remedio que ingeniárselas para calcular la estabilidad. Como punto de partida, debemos realizar una estimación apropiada de los coeficientes de bloque, afinamiento de la flotación y prismático. A partir de estos resultados se obtienen los siguientes factores de estabilidad: coordenada vertical y longitudinal del centro de carena, radio metacéntrico transversal y longitudinal, toneladas por centímetro de inmersión y, momento unitario para variar el asiento un centímetro.

Durante años, se ha utilizado en la fase preliminar de diseño de cualquier tipo de buque el coeficiente de bloque como dato fundamental para representar sus formas. Este coeficiente cuenta con una incidencia importante sobre la resistencia a la marcha y sobre la capacidad de carga, y en menor medida, sobre la estabilidad, maniobrabilidad, etc. Lo normal es estimar un coeficiente de bloque adecuado a la velocidad del buque en relación a su eslora, expresado como V_m/\sqrt{L} o como número de Froude. Numerosos autores han publicado fórmulas que definen un valor adecuado de este coeficiente en función de la velocidad y la eslora:

$$C_B = 1,15 - 0,629 \cdot \left(\frac{V_m}{\sqrt{E}}\right) \rightarrow \text{Troost} \quad [1]$$

$$C_B = 1,05 - 0,50 \cdot \left(\frac{V_m}{\sqrt{E}}\right) \rightarrow \text{Alexander} \quad [2]$$

$$C_B = 1,137 - 0,60 \cdot \left(\frac{V_m}{\sqrt{E}}\right) \rightarrow \text{van Lammerman} \quad [3]$$

$$C_B = 1,22 - 0,709 \cdot \left(\frac{V_m}{\sqrt{E}}\right) \rightarrow \text{Minorsky} \quad [4]$$

$$C_B = 1,0 - \left(0,375 \left[\left(\frac{M}{E} + 1\right) \cdot \frac{V_m}{\sqrt{E}}\right]\right) \rightarrow \text{Telfer} \quad [5]$$

$$C_B = 0,65 + 0,95 \left(\frac{V_m}{\sqrt{E}}\right) - 1,2 \left(\frac{V_m}{\sqrt{E}}\right)^2 \rightarrow \text{Sabit} \quad [6]$$

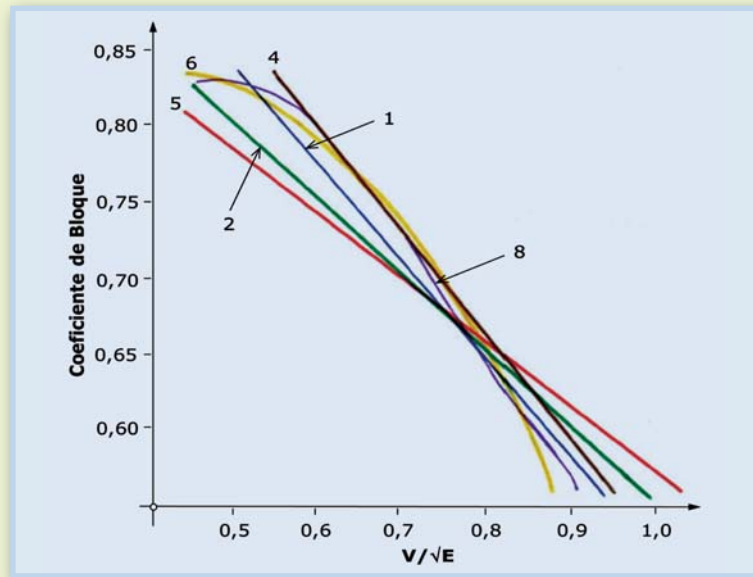


Fig. 6 - Comparación del CB calculado por diferentes métodos.-
Fuente: SNAME, Vol. 91, p.324.

Como se observa en las ecuaciones (1) a (6) la variable dependiente, C_B , es una función lineal de la variable independiente V_m/\sqrt{E} , excepto en el caso de la ecuación (5), que varía con la relación M/E , y en el caso de la ecuación (6) donde se utiliza una ecuación de segundo grado. Con el paso de los años, se han analizado un amplio espectro de buques en función de su clase y edad, llegándose a la siguiente expresión:

$$C_B = 1,10736 - 0,550401 \cdot \left(\frac{V_m}{\sqrt{E}}\right) \quad [7]$$

Después de aplicar la ecuación (7) sucesivamente a un importante número de barcos, se descubrió que la variación del resultado estaba en función del tipo de buque, por lo que dicha ecuación (7) se redefine como:

$$C_B = f \cdot \left[1,10736 - 0,550401 \cdot \left(\frac{V_m}{\sqrt{E}}\right)\right] \quad [8]$$

Factor f valores:

1,080: Bulkcarriers	1,025: Productos
1,060: LPG	1,010: Petroleros
1,040: LNG	0,980: Cargueros
1,030: OBOs	0,970: Containeros
1,030: Madereros	0,950: Rolones
1,025: Quimicos	0,890: Portagabarras

En opinión de Porricelli, Huntly Boyd & Schleiffer, la ecuación (8) ofrece mejores resultados por estar más actualizada en relación al tipo y tamaño del buque, además de contener una variable para cada tipo de barco con el cual está relacionado el coeficiente de bloque.

$$C_{LA} = 0,360 + 0,702 (C_B) \rightarrow \text{Portagabarras} \quad [9]$$

$$C_{LA} = 0,325 + 0,702 (C_B) \rightarrow \text{Containeros} \quad [10]$$

$$C_{LA} = 0,336 + 0,702 (C_B) \rightarrow \text{Rolones} \quad [11]$$

$$C_{LA} = 0,306 + 0,702 (C_B) \rightarrow \text{otros buques} \quad [12]$$

Tomando como punto de partida el coeficiente de bloque y desarrollando un ajuste lineal⁶, determinamos las fórmulas del coeficiente de afinamiento de la flotación (se hace referencia a tres tipos de buques debido a que sus planos de flotación relativos a su coeficiente de bloque son diferentes al resto),

Para toda clase de buques, el coeficiente prismático lo obtenemos aplicando:

$$C_p = 0,917 (C_B) + 0,073 \quad [13]$$

Una vez conocidas las fórmulas de estos coeficientes, ya es posible estimar la coordenada vertical del centro de carena a partir de la ecuación de Posdunine's:

$$KC = \left(\frac{C_{LA}}{C_B + C_{LA}}\right) C_m \quad [14]$$

La altura del metacentro transversal sobre la quilla, es:

$$KM = KC + CM \quad [15]$$

En la ecuación (15) desconocemos el valor del radio metacéntrico transversal, vamos a obtenerlo:

$$CM = \frac{I_x}{\nabla_0} \rightarrow \begin{cases} I_x = E \cdot M^3 \cdot C_T \\ C_T = 0,125 \cdot C_{LA} - 0,045 \\ \nabla_0 = E \cdot M \cdot C_m \cdot C_B \end{cases}$$

6. - En estadística el ajuste lineal o regresión lineal es un método matemático que modela la relación entre una variable dependiente, las variables independientes y un término aleatorio.

Donde I_x queda definido como se indica (para buques de formas generales) y, C_T está expresado en función del coeficiente del plano de flotación,	$CM = \frac{E \cdot M^3 \cdot C_T}{E \cdot M \cdot C_m \cdot C_B} = \frac{E \cdot M^3(0,125 \cdot C_{LA} - 0,045)}{E \cdot M \cdot C_m \cdot C_B}$	[16]
	$CM = \frac{M^2(0,125 \cdot C_{LA} - 0,045)}{C_m \cdot C_B}$	
Finalmente sustituyendo la ecuación (16) en la (15),	$KM = \left(\frac{C_{LA}}{C_B + C_{LA}} \right) C_m + \frac{M^2(0,125 \cdot C_{LA} - 0,045)}{C_m \cdot C_B}$	[17]
Las toneladas por centímetro representan el número de toneladas métricas que hay que cargar/descargar en el buque para que su calado aumente/disminuya un centímetro (0,01 mts). A partir de la ecuación del coeficiente de la flotación deducimos la expresión que determina las toneladas por centímetro:	$\left. \begin{aligned} \nabla_R &= A_{LA} \cdot 0,01 \\ \nabla_R &= \frac{Tpc}{\delta} \\ A_{LA} &= C_{LA} \cdot E \cdot M \end{aligned} \right\} \frac{Tpc}{\delta} = C_{LA} \cdot E \cdot M \cdot 0,01$ $Tpc = C_{LA} \cdot E \cdot M \cdot 0,01 \cdot \delta$	[18]
La ecuación (19) se utiliza como punto de partida para deducir el momento unitario para variar el asiento un centímetro,	$Mto.U = \frac{\Delta \cdot GM_L}{100 \cdot E}$	[19]
Debido al gran valor de la altura metacéntrica longitudinal y a la pequeña separación vertical entre el centro de gravedad y el de carena, sustituimos sin error apreciable, la altura metacéntrica longitudinal, por el radio metacéntrico longitudinal, entonces la ecuación (19) se reescribe así:	$Mto.U = \frac{\Delta \cdot CM_L}{100 \cdot E}$	[20]
En la ecuación (20) desconocemos el radio metacéntrico longitudinal,	$CM_L = \frac{I_F}{\nabla_0} \rightarrow \begin{cases} I_F = M \cdot E^3 \cdot C_L \\ C_L = 0,143 \cdot C_{LA} - 0,0659 \\ \nabla_0 = E \cdot M \cdot C_m \cdot C_B \end{cases}$	
Donde I_F queda definido como se indica (para buques de formas generales) y, C_L está expresado en función del coeficiente del plano de flotación,	$CM_L = \frac{M \cdot E^3 \cdot C_L}{E \cdot M \cdot C_m \cdot C_B} = \frac{M \cdot E^3(0,143 \cdot C_{LA} - 0,0659)}{E \cdot M \cdot C_m \cdot C_B}$ $CM_L = \frac{E^2(0,143 \cdot C_{LA} - 0,0659)}{C_m \cdot C_B}$	[21]
Al sustituir la ecuación (21) en la (20), llegamos a la expresión buscada:	$Mto.U = \frac{\Delta \cdot E^2(0,143 \cdot C_{LA} - 0,0659)}{100 \cdot E \cdot C_m \cdot C_B} \rightarrow \begin{cases} \Delta = \nabla \cdot \delta \\ \nabla = E \cdot M \cdot C_m \cdot C_B \end{cases}$	
operando,	$Mto.U = \frac{M \cdot \delta \cdot E^2(0,143 \cdot C_{LA} - 0,0659)}{100}$	[22]
La coordenada longitudinal del centro de carena respecto a la perpendicular de popa se determina tomando como referencia el trabajo de Troost "Simplified method for preliminary powering of single screw merchant ships", donde se establece que:	$P_{pp}C = E(0,50 - (0,175 \cdot C_p - 0,125))$	[23]
	$\otimes C = \frac{E_{pp}}{2} - P_{pp}C$	[24]
	$P_{pp}F = 0,5 \cdot E \left(\frac{V_m}{160} + 0,914 \right) \rightarrow \text{Petroleros}$	[25]
Alcanzado este punto, solo queda en el tintero otro importante factor hidrostático: la posición longitudinal del centro de flotación respecto de la perpendicular de popa. Trabajando en función de la eslora y de la velocidad de servicio para diferentes clases de buques, llegamos a:	$P_{pp}F = 0,485 \cdot E \left(\frac{V_m}{100} + 0,90 \right) \rightarrow \text{Bulkcarriers}$	[26]
	$P_{pp}F = 0,5 \cdot E \left(\frac{V_m}{135} + 0,924 \right) \rightarrow \text{Cargueros una hélice}$	[27]
	$P_{pp}F = 0,5 \cdot E \left(\frac{0,95}{V_m} + 1,03 \right) \rightarrow \text{Cargueros dos hélices}$	[28]
	$P_{pp}F = \left(0,5 \left(\frac{V_m}{135} + 0,924 \right) + 0,23 \right) E \rightarrow \text{Cargueros 2 hélices y popa de crucero}$	[29]



Fig. 7 - Varada del Sea Empress en Milford Haven (SW Wales) el 15 de febrero de 1996.-
Fuente:www.itopf.com

Los factores de estabilidad hasta aquí calculados, son válidos para la condición de máxima carga, siendo desarrollados a partir de datos limitados de eslora, manga, calado de verano, velocidad de servicio (con algunas variaciones para cada clase de buque) y, con la garantía de que los tres coeficientes de formas empleados C_B , C_{LA} , C_P son compatibles entre sí haciendo que C_{LA} y C_P dependan de C_B .

Para la condición de máxima carga en diferentes tipos de buques, se han recopilado informaciones sobre la altura metacéntrica corregida por superficies libres, siendo comparados con la relación manga-calado o únicamente manga, con el fin de comprobar cuál de ellos ofrece mejores estimaciones.

$G_v M = 2,816 \left(\frac{M}{P}\right) - 1,88 \rightarrow$ Cargueros y Containeros	[30]
$G_v M = 15,86 \left(\frac{M}{P}\right) - 19,62 \rightarrow$ Tanques	[31]
$G_v M = 0,714 \left(\frac{M}{P}\right) + 2,2 \rightarrow$ Carga general	[32]
$G_v M = 0,055 \cdot M \rightarrow$ Portagabarras y Rolones	[33]
$G_v M = 0,065 \cdot M \rightarrow$ Bulkcarriers	[34]
$G_v M = 0,075 \cdot M \rightarrow$ OBOs	[35]

La coordenada vertical del centro de gravedad corregida por superficies libres, KG_v , se obtiene hallando la diferencia entre el KM según la ecuación (17) y la altura metacéntrica transversal corregida por superficies libres, $G_v M$, de acuerdo con las ecuaciones (30) a (35).

Para estimar la coordenada longitudinal del centro de gravedad con respecto a la perpendicular de popa, para la condición de máxima carga, es necesario conocer el valor del asiento. En caso de no estar disponible, puede estimarse a partir de buques similares al siniestrado, es decir, como un porcentaje de la eslora; su brazo lo calculamos aplicando:

$$CG = \frac{a \cdot Mto.U}{\Delta} \quad [36]$$

Si a la coordenada longitudinal del centro de carena, le aplicamos el brazo del asiento con su signo⁷, se obtiene la coordenada longitudinal del centro de gravedad,

$$P_{pp}G = P_{pp}C \pm CG \quad [37]$$

Una vez desarrolladas las ecuaciones necesarias para obtener los diferentes factores de estabilidad, para la condición de máxima carga, el siguiente objetivo consiste en deducir las ecuaciones mencionadas para la condición justo anterior a la varada y los posteriores a la misma. Debe tenerse en cuenta que si ninguna de las dos condiciones buscadas genera un cambio importante en los calados, entonces el problema es sencillo y simplemente se tendrá que cargar, descargar y/o trasladar pesos con centros de gravedad conocidos y a continuación recalcular el centro de gravedad del buque, medir el asiento y determinar su estabilidad (en esta situación la variación en las propiedades hidrostáticas es bastante pequeña pero nunca debe ser ignorada). En el caso de una variación de los calados grande o que exista un asiento excesivo y/o escora, se producirá una variación de las propiedades hidrostáticas, y el problema se hace más complejo. Veamos como varían:

- El KM no varía significativamente con el calado hasta que este disminuya dramáticamente (del orden de una tercera parte del máximo o de verano), entonces el KM aumenta.
- Las Tpc disminuirán linealmente con la disminución del calado con un rango de 0,75% de su valor para la condición de máxima carga por cada centímetro de calado.
- El $Mto.U$, disminuye linealmente con la disminución del calado con un rango de 2,5% de su valor para

7 - La regla de signos es la siguiente: Si el asiento es positivo (apopante), CG es positivo, el centro de gravedad G está a popa del centro de carena C. Cuando el asiento es negativo (aproante), CG es negativo, entonces, el centro de gravedad G está a proa del centro de carena C.

la condición de máxima carga por centímetro de calado.

- La coordenada longitudinal del centro de carena, se moverá linealmente hacia proa con la disminución del calado con un rango del 0,2% de su valor para la condición de máxima carga por cada centímetro de calado.

- La coordenada longitudinal del centro de flotación, igualmente se trasladará linealmente hacia proa con la disminución del calado dentro de un rango del 0,4% de su valor para la condición de máxima carga por cada centímetro de calado.

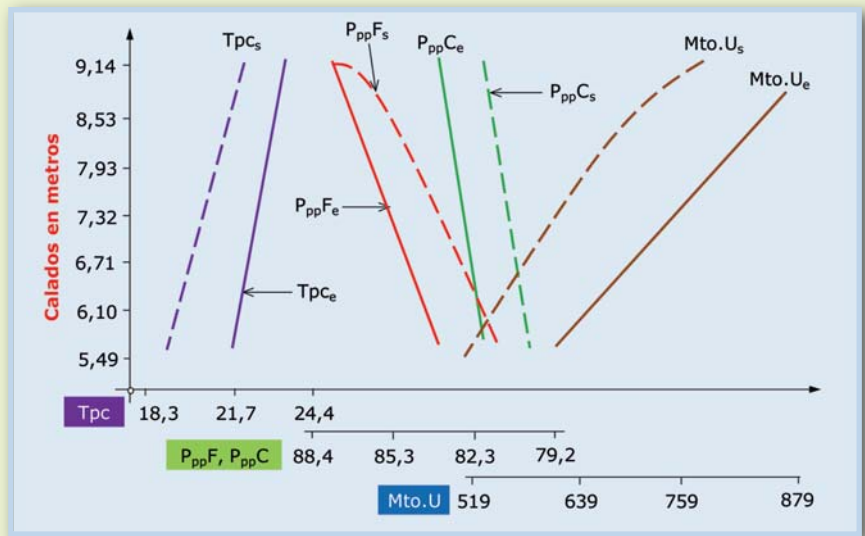


Fig. 8 - Comparación entre propiedades hidrostáticas estimadas (líneas discontinuas) y reales (líneas continuas).- Fuente: SNAME, Vol. 91, p.316

Por todo ello, asumimos que el valor del KM permanecerá constante aunque afectado de un pequeño error, mientras que el resto de factores serán nuevamente definidos de acuerdo a las ecuaciones:

$$Tpc_2 = Tpc_1 - ((Tpc_1 \cdot 0,0075) \cdot (C_{m1} - C_{m2})) \quad [38]$$

$$Mto.U_2 = Mto.U_1 - ((Mto.U_1 \cdot 0,025) \cdot (C_{m1} - C_{m2})) \quad [39]$$

$$PppC_2 = PppC_1 - ((PppC_1 \cdot 0,002) \cdot (C_{m1} - C_{m2})) \quad [40]$$

$$PppF_2 = PppF_1 - ((PppF_1 \cdot 0,004) \cdot (C_{m1} - C_{m2})) \quad [41]$$

Las constantes contenidas en las fórmulas (38) a (41) son valores promedios basados en las formas de los buques convencionales y, nunca se deben considerar como sustitutas de los cálculos exactos reales. Las fórmulas son aplicables a una situación de salvamento de un buque varado en ausencia de información rigurosa o hasta que la misma esté disponible.

Como observamos en la (Fig. 8) las diferencias no varían significativamente con el calado. Con referencia a los cambios del asiento y la escora, debe considerarse que la mayoría de los datos hidrostáticos que se encuentran tabulados en las tablas hidrostáticas corresponden a condiciones normales de asiento, por lo que, cuando se presentan grandes alteraciones del asiento y/o escora (probables en una situación de varada), su aplicación queda muy limitada.

7.2 REACCIÓN EFECTIVA DEL FONDO.-

La energía cinética del buque se disipa cuando por la acción de la varada este se detiene, existiendo muchos parámetros que influyen en

este proceso de disipación. Se han desarrollado algunas relaciones entre la reacción del fondo, el desplazamiento, el cuadrado de la velocidad y, otras características del buque con el objetivo mencionado; sin embargo, no existen datos estadísticos cualificados que la avalen.

Con frecuencia sucede que ante la falta de datos precisos, se pueden estimar los calados del buque antes de la varada realizando estimaciones apropiadas a partir de los calados de salida del último puerto de escala. Cuando se facilitan los calados después de la varada es difícil que estén relacionados con el estado de la marea, siendo normalmente imprecisos debido a la dificultad que presentan las lecturas por la acción

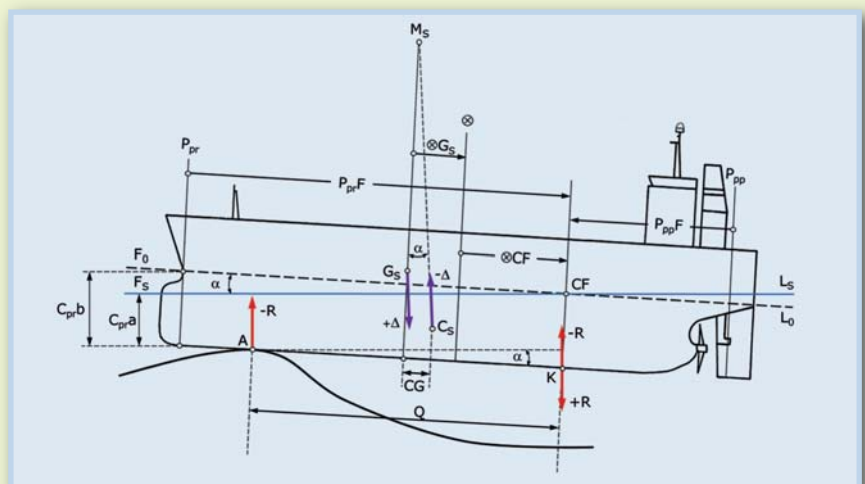


Fig. 9 - Reacción del fondo por el método del cambio del calado de proa.- Fuente: US Navy - S0300-A8-HBK-010

de las olas o por la poca visibilidad. Con frecuencia, el reajuste de los calados anteriores y posteriores a la varada, es un proceso que dura varias horas o incluso días, no resolviéndose hasta después de que los rescatadores suban a bordo, su experiencia en tales casos hará que se obtengan las mejores estimaciones.

Conociendo los calados anteriores y posteriores a la varada y dentro del margen de estimación más exacto posible, obtenemos el denominado cambio neto en los calados. Si este cambio lo multiplicamos por las toneladas por centímetro, hallamos el valor de la pérdida de flotabilidad o reacción efectiva del fondo,

$$R = (C_m b - C_m a) \cdot Tpc \quad [42]$$

Trabajando conjuntamente con esta reacción efectiva del fondo, el cambio de calados a proa, las toneladas por centímetro y el momento unitario, es posible estimar la distancia longitudinal entre el punto efectivo de aplicación de la reacción sobre el fondo y la posición del centro de flotación del buque varado (Fig.9).

$$R = \frac{2 \cdot Mto.U \cdot Tpc \cdot \lambda C_{pr}}{2 \cdot Mto.U + Q \cdot Tpc} \rightarrow (2 \cdot Mto.U + Q \cdot Tpc)R = 2 \cdot Mto.U \cdot Tpc \cdot \lambda C_{pr}$$

$$Q = \frac{2 \cdot Mto.U \cdot \lambda C_{pr}}{R} - \frac{2 \cdot Mto.U}{Tpc} \quad [43]$$

$$Q = 2 \cdot Mto.U \left(\frac{\lambda C_{pr}}{R} - \frac{1}{Tpc} \right)$$

Para obtener la posición transversal del punto efectivo de aplicación de la reacción (Fig. 10), operamos con los momentos de los pares escorantes y adrizante,

$$Mto.E = p \cdot d \left\{ \begin{array}{l} p = R \\ d = S \cos \theta \end{array} \right\} \quad Mto.Esc = R \cdot S \cos \theta$$

$$Mto.A = \Delta \cdot GM \sin \theta$$

En la situación de equilibrio, ambos momentos se igualan,

$$Mto.E = Mto.A \rightarrow R \cdot S \cos \theta = \Delta \cdot GM \sin \theta$$

$$S = \frac{\Delta_s \cdot G_s M_s \cdot \tan \theta}{R} \quad [44]$$

La altura metacéntrica la hallamos calculando el aumento virtual del centro de gravedad del buque debido a la reacción de la varada,

$$GG_s = \frac{p \cdot dv}{\Delta - p} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} p = R \\ dv = KG \end{array} \right.$$

$$GG_s = \frac{R \cdot KG}{\Delta - R} \quad [45]$$

Si la variación del KM es significativa con respecto al cambio del calado, la altura metacéntrica se obtiene aplicando la ecuación (46), en caso contrario se ignora la variación y aplicamos la ecuación (47),

$$G_s M_s = GM \pm \lambda KM - GG_s \quad [46]$$

$$G_s M_s = GM - GG_s \quad [47]$$

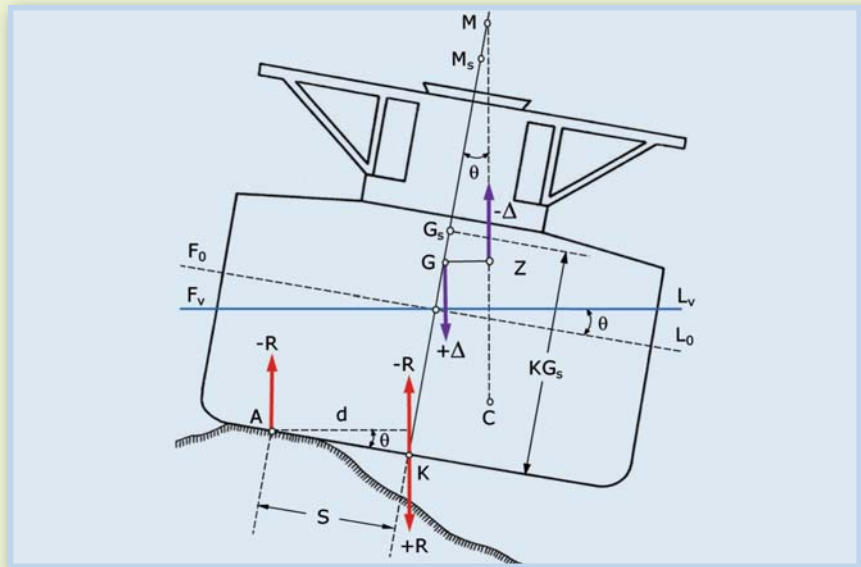


Fig. 10 - Varada fuera del plano diametral - Fuente: US Navy - S0300-A8-HBK-010

Para tener una representación estimada de la estabilidad de un buque que se encuentra varado, hay que sumar o restar de forma adecuada diferentes pesos a partir de la condición de máxima carga, hasta alcanzar justo la condición anterior a la varada del buque, a continuación debemos incorporar la reacción del fondo y su punto efectivo de aplicación.

Como hemos indicado, la estabilidad del buque durante su varada no suele verse afectada de problemas que la modifiquen. Sin embargo, las acciones tomadas para extraerlo pueden generar una situación de estabilidad precaria. En resumen, hay que calcular la estabilidad del buque varado (incluyendo el impacto de cualquier inundación, cambio en la marea, superficie libre, y libre comunicación), y proceder de esta forma cada vez que se apliquen las diferentes acciones para su rescate.

7.3 ESFUERZOS ESTRUCTURALES.

Además de considerar la estabilidad, también hay que tener presente los esfuerzos del buque en tal situación. Cualquier estudio sobre los esfuerzos de un buque que se encuentra varado debe abordarse considerando los casos donde no hay o hay poco daño estructural y, donde el daño estructural sea significativo.

1) Buque sin daños estructurales o poco significativos: En este caso, es posible realizar cálculos más o menos exactos relacionados con la distribución de las cargas a lo largo de la eslora, con el momento flector y con el esfuerzo cortante, incluyendo la reacción del fondo y cualquier inundación que pudiera ocurrir. Las distribuciones de la carga a que se hace referencia, pueden aproximarse a partir de la distribución del desplazamiento del buque en rosca.

2) Buque con daños significativos: Para esta situación, la técnica analítica empleada es algo limitada ya que no se pueden medir los esfuerzos residuales del buque. Esta incapacidad es una combinación de la falta de datos exactos de la estructura del casco intacto y la incertidumbre que presenta la extensión del daño estructural. En cualquier caso, el impacto de la reacción del fondo no causa generalmente daño estructural por sí mismo, sino que este se produce durante el proceso de la varada.

Si conociéramos el desplazamiento del buque y su distribución de flotabilidad justo antes de la varada, se pueden realizar los ajustes necesarios para calcular la reacción del fondo y cualquier pérdida de pesos y/o inundación (siempre el problema es la disponibilidad de los datos). Asumiendo que en la actualidad la información puede estar disponible, estamos en disposición de poder desarrollar una técnica sencilla que nos facilite una buena información sobre la distribución de carga del buque varado, con el objetivo de poder integrar los momentos flectores y esfuerzos cortantes que estamos buscando. Excepto por la reacción del fondo, este cálculo no es diferente de los cálculos de carga/descarga que realizamos a bordo de los buques.

Para superar las dificultades que acabamos de mencionar, debemos aplicar la siguiente técnica de cálculo (asumiendo que la distribución de pesos de la carga y combustibles pueden estimarse con la fiabilidad

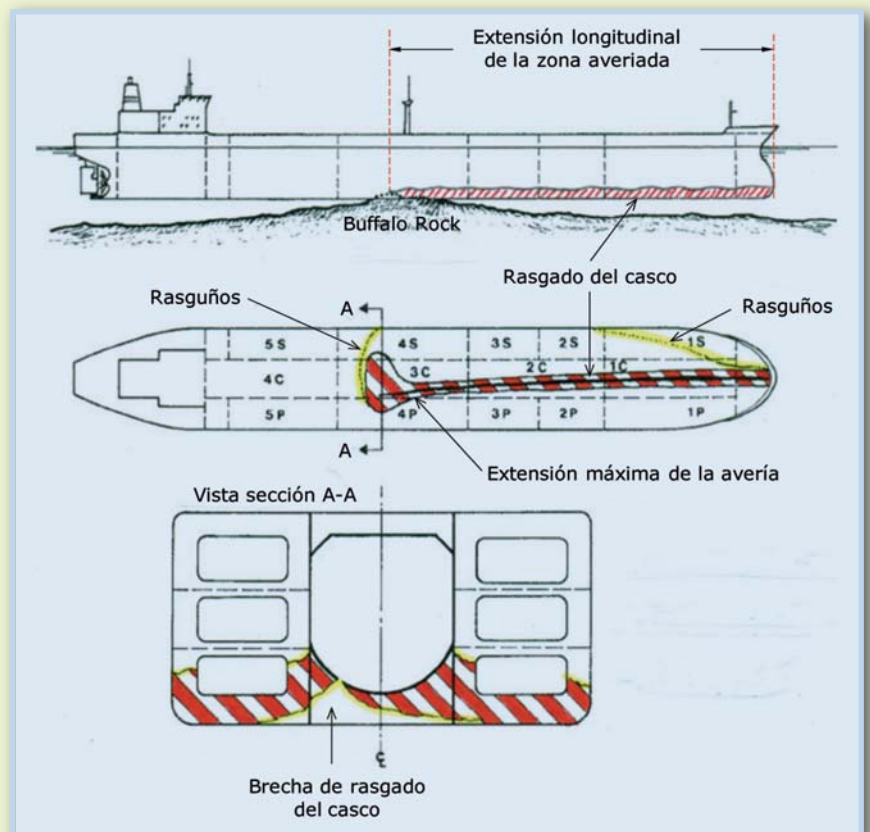


Fig. 11 - Daños ocasionados a un VLCC de casco sencillo en Buffalo Reef el día 6 de enero de 1975.- Fuente: Kuroiwa, ref.4.

suficiente para proporcionar una idea aceptable de la situación de los esfuerzos del buque varado):

1) Primero, método para estimar la distribución de pesos del buque en rosca. Se desarrolla un conjunto de pesos normales no dimensionales a lo largo de la eslora del buque para un número limitado de ellos.

2) Segundo, método para estimar la distribución de flotabilidad para el buque cargado. Para obtener este proceso hay que dividir la eslora del buque en tres partes: cuerpo paralelo, cuerpos de proa y de popa.

3) Tercero, método para tener en cuenta la fuerza del fondo.



Fig. 12 - Daños sufridos en el fondo y pantoque de estribor tras la varada del buque Sea Empress cerca de Milford Haven.-- Fuente: BBC Online Network

En todos estos métodos hay que realizar promedios para obtener una aproximación precisa de las distribuciones del peso de la carga y otros elementos del peso muerto para cada condición y tipo de buque. Sin embargo, el número de combinaciones es tan grande y los resultados tan sensibles que el esfuerzo resulta excesivo. Además, resulta que estas distribuciones de pesos requieren ser introducidas de forma manual considerando cada caso para que el ordenador pueda representar el total. Como sucede con la estabilidad estática del buque, el cálculo de esfuerzos estructurales de un buque varado alcanza su momento más crítico cuando el buque es reflotado nuevamente.

8. VARADA SOBRE FANGO: EFECTO DE LA VISCOSIDAD.-

En el caso de quedar un buque varado en un fondo de fango, como la densidad del fango es mayor que la del agua de mar, será también mayor el empuje de la obra viva o carena en el fango que su correspondiente en agua salada. Por lo tanto, el centro de carena total quedará más bajo que el de una carena en agua salada para la flotación existente. Es decir, si F_0L_0 es la flotación recta isocarena de F_1L_1 , cuyo centro de carena es C_1 , entonces el centro de carena para la misma flotación F_0L_0 pero con parte de la obra viva introducida en el fango (zona AE_1BDK) estará en el punto C_2 por debajo de C_1 por el mayor aumento de empuje del fango.

Supongamos que el nivel que separa el fango del agua en la (Fig. 13) es AE_1B , y la recta CE_1D es considerada como una flotación recta isocarena con la AE_1B . La diferencia que existe entre la flotación F_1L_1 y la recta AE_1B , consiste en que la primera determina respecto a la inicial F_0L_0 , dos cuñas de agua salada, una de inmersión y otra de emersión, mientras que la línea AE_1B respecto a CE_1D , origina una

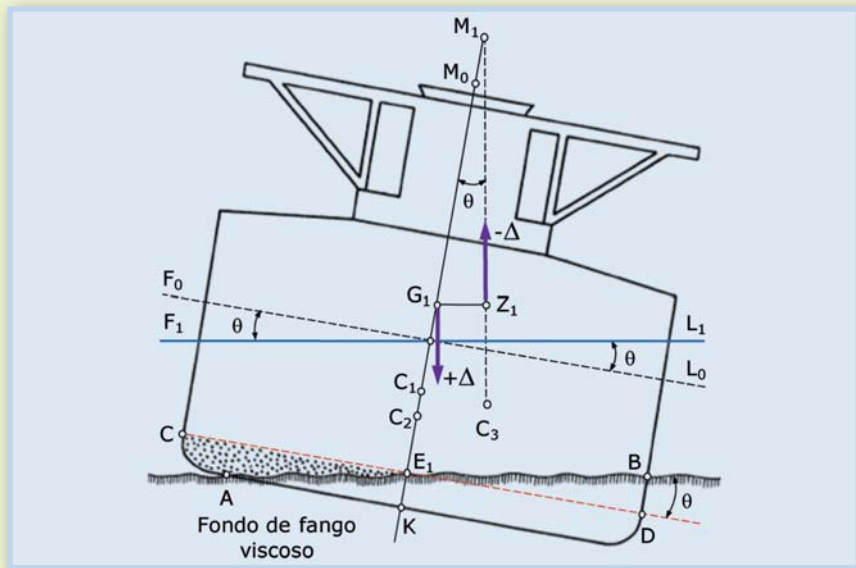


Fig. 13 - Buque varado sobre fango. - Fuente: C.Godino Gil

cuña de inmersión de fango y otra de emersión de agua salada, es decir cuñas de líquidos de diferentes densidades.

Como la varada se ha producido sobre un fondo de fango muy viscoso, al peso del buque habrá que añadirle el efecto de la adherencia del fondo. El valor de esta adherencia o succión, como normalmente se denomina, depende de la parte sumergida en el fango y del coeficiente de viscosidad del mismo y puede llegar a adquirir valores de gran importancia, ya que se debe a la falta de presión hidrostática sobre el fondo del buque varado en fango.

Cuando se intenta poner a flote un buque varado en estas condiciones, es preciso contar con una fuerza ascensional suplementaria capaz de vencer esta adherencia. Ahora bien, tan pronto como el buque se ha separado del fango, el agua ejercerá su presión sobre el fondo del barco y el empuje generado, casi instantáneamente, provoca un salto del buque, que tiene importancia por las averías que puede llegar a originar, ya sea en el propio buque, en otros buques inmediatos, o en los medios auxiliares de salvamento que lo atienden.

9. CONCLUSIONES.-

- 1) Técnicamente hay que planificar muy bien todas las acciones que se tomen para reflotar el buque con éxito, ya que sus influencias sobre la estabilidad estática, asiento, y escora pueden llegar a ser fatales.
- 2) Se ha demostrado que los datos hidrostáticos básicos (Δ , KM , Tpc , $Mto.U$, P_{ppC} , P_{ppF}) se obtienen a partir de información mínima del buque para la condición de máxima carga, y los procesos de estimación desarrollados para calcular el KG y P_{ppG} igualmente están dentro de las necesidades requeridas para garantizar el salvamento.
- 3) Cualquier cálculo de estabilidad, sin considerar su grado de precisión, es únicamente estimado para guiar las operaciones de salvamento, los métodos analíticos descritos deben tratarse de acuerdo con todas las partes participantes en las operaciones de salvamento, en ningún caso los cálculos deben ser utilizados en contra de la experiencia de los técnicos encargados del rescate.
- 4) A parte del problema que plantean las escoras y los asientos importantes, la técnica discutida aquí, junto con la necesaria estrategia de cálculo, proporcionan a los rescatadores una muy buena imagen de la magnitud y localización efectiva de la reacción del fondo y la

situación de la estabilidad del buque varado. Esta técnica ayuda a crear la estrategia total del salvamento, manteniendo informado de las implicaciones que generan acciones tales como: aligeramiento y traslado de pesos a bordo, así como de las fuerzas físicas necesarias para sacar fuera de la varada al buque.

5) Las técnicas analíticas descritas proporcionan la capacidad necesaria para poder realizar un juicio inicial antes de llegar a la escena de la varada, permitiendo con frecuencia una primera estimación de las necesidades de salvamento y alcanzar una valoración aproximada de los esfuerzos de movilización y los equipos de salvamento necesarios, reduciendo el tiempo para la toma de decisiones.

6) Los estudios estadísticos realizados por Porricelli, Huntly y Schleiffer, descubrieron que la mayoría de los informes completos de salvamento que estaban disponibles no contaban con los datos suficientes como para permitir una estimación apropiada de la reacción inicial del fondo, de hecho, menos de una docena de casos cumplían con los requisitos.

7) Los cálculos para realizar el salvamento de buques varados, tienden a

ser aproximaciones, por lo menos en las valoraciones iniciales para el desarrollo de una estrategia completa pudiendo basarse en información con solamente un 20% de valores reales. Por tanto, los resultados obtenidos son buenos dentro de los límites en cada caso, excepto para algunos tipos de buques muy especializados o de formas de casco no convencionales.

8) Debido a que los equipos de rescate, autoridades, aseguradoras, etc., solicitan información del buque accidentado, es muy conveniente conocer a bordo donde se localizan los siguientes documentos: *Damage stability book; Stability, trim and longitudinal strength instruction to the*

master book; Cargo and ballast conditions, stability, trim and longitudinal strength book; Segregation stability, trim and longitudinal strength book; Damage stability ICLL 1996 book. Resulta curioso que muchos buques no tienen o no pueden localizar esta información, debido a la edad, el número de veces que han cambiado de armador, la clase, y otros muchos factores. La posibilidad, en algunos buques, de encontrar esos datos o de recuperarlos por otras fuentes es bastante improbable, de forma que debe asumirse que los mismos no van a estar disponibles, al menos de forma rápida. ■



BIBLIOGRAFIA.-

1. J.D.PORRICELLI, J.HUNTLY BOYD, Jr., and KEITH E. SCHLEIFFER, "Modern analytical techniques in salvage engineering using portable computers", *SNAME Transactions*, Vol. 91, 1983, pp.. 307-327.
2. RODRÍGUEZ CARRIÓN, José Luís. "Cuestiones de Seguro Marítimo. Algunas Cláusulas Inglesas de Seguro de Buques". España, Consejo General del Poder Judicial, 1992, p. 2.
3. BONILLA DE LA CORTE, Antonio, "Teoría del Buque", Cádiz, 1979, págs. 521-527.
4. BO CERUP SIMONSEN, "Mechanics of Ship Grounding", Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, 1997, pp. 55-67 y 208-220.
5. OLIVELLA PUIG, Joan, "Teoría del Buque, Estabilidad, Varada e Inundación", Barcelona, 1996, pp. 225-240.
6. GE WANG, H.OHTSUBO & D.LIU, "A simple method for predicting the grounding strength of ships", *Journal of Ship Research*, Vol. 41, num. 3, Sept. 1997, pp. 241-247.
7. PICOLO & VASCONCELLOS, "Technical aspects of refloating operations for grounded vessels", *Copinaval-2009*, pp. 8-12.
8. U. S.NAVY, *Salvage Manual*, Vol. 1, "Stranding and Harbor Clearance" (S0300-A6-MAN-010) (0910-LP-103-2562 Rev. 1), 1990.
9. U.S.NAVY, *Salvor's handbook*, (S0300-A7-HBK-010), 1990, chap. 4.
10. SIMBULAN, BROWN, McQUILLAN, & GUTIERREZ, "Modeling motion and loads on stranded ships in waves", 2003, pp. 3-9.
11. ARSHAM MAZAHARI, "Probabilistic modeling of ship grounding", Helsinki University of Technology, 2009, pp. 48-56.
12. GALOR WIESLAW, "The ships impact in ground of port water area", *R&RATA #2*, Vol. 1, 2008, pp. 3-4.
13. MONTES COTO, CUETOS MEGIDO, SANCHEZ OCAMPOS, MEYARO FERNANDEZ, "Técnicas graficas aplicadas al estudio del comportamiento de buques en estado intacto y después de averías. Uso de paquetes de simulación por ordenador" U. de Oviedo.
14. THOMAS C. GILLMER, "Modern ship design", United States Naval Institute, Maryland, pp. 133 - 153.