

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 El accidente del submarino Kursk e intentos de rescate de los supervivientes:

El submarino nuclear K-141 *Kursk* zarpó a las 10:00 de la mañana del 10 de Agosto del 2000 de la base naval de Vidiayevo, en la península de Kola, para realizar unos ejercicios militares con la Flota del Norte en el mar de Barents. Iba comandado por el Capitán Gennadiy P. Liachin con 118 hombres a bordo. Además de la dotación normal de 111 hombres, había que incluir a 5 oficiales de Estado Mayor de la división y 2 ingenieros de la fábrica de torpedos. Poco antes la tripulación había recibido la distinción como la mejor de la Flota del Norte.

Durante los 2 días siguientes se desarrolló el ejercicio entre las diferentes armas de superficie, aeronaves y submarinos.

A las 08:51 del día 12 de Agosto se recibe la última comunicación del submarino, cuando solicita permiso para lanzar un ataque de torpedos de instrucción contra el grupo comandado por el crucero *Petr Velikiy*, que se encuentra navegando a 30 millas de distancia.

Sobre las 11:30 del mismo día, el sistema de detección Noruego (NORSAR) detectó dos explosiones en el punto aproximado 69°-38'N 37°-19'E. La primera (a las 11:29:34 tiempo de Moscú) con una magnitud de 1.5 en la escala Richter, correspondiente a una carga de 100Kg de TNT. La segunda (a las 11:31:48) fue de una magnitud de 3.5, el equivalente a 2 toneladas de TNT. Todas las explosiones fueron registradas por las naves de superficie y submarinos Rusos, 2 submarinos de EE.UU. y 1 Británico, junto con 2 barcos de inteligencia de EE.UU. y Noruega que espían las maniobras, así como en estaciones sísmicas de Noruega, Canadá y Alaska.

Las explosiones no alarmaron en un principio a las fuerzas rusas, que tomaron como parte del ejercicio, pero a las 17:30 se pidió al submarino que informara de su posición y no hubo respuesta.

A las 23:30 y de acuerdo con las regulaciones de la armada para esas circunstancias, el *Kursk* fue declarado en emergencia y se inician las operaciones de búsqueda.

Ya había arribado a la zona el buque de rescate *Mikhail Rudnitskiy* transportando 2 vehículos de rescate submarinos *Priz*. A las 04:36 del día siguiente el sonar del *Petr Velikiy* detectó una anomalía en el fondo. Su posición era 69°-37'N 37°-34'E.

Durante esa mañana, un avión de patrulla Noruego informa que se observa un cambio en el desarrollo de los ejercicios, llevándose a cabo maniobras de búsqueda y rescate. A las 19:30 el crucero puede confirmar su detección: es el *Kursk*. Yace en un fondo de limo y arena a una profundidad de 108m. La temperatura del agua era de 3°-4°C en el fondo y 7°-8° C en la superficie.

La tarde del día 13, un vehículo de rescate subacuático (DSRV) del *Mikhail Rudnitskiy* intenta acoplarse a la escotilla de popa no afectada por el siniestro. Lo mismo intenta una campana de rescate del *Altay* con capacidad para 10-15 personas. Se oyen débiles llamadas de S.O.S. en los sonares de los barcos y en los sumergibles, pero se atribuyen a “ruidos de algún mecanismo”, y solo a partir del día 18 se reconoce que son llamadas de auxilio diciendo “Auxilio-Agua”.

El 14 por la mañana se une el buque-grúa PK7500 con el vehículo de rescate *Bester* con capacidad para rescatar a 16-18 personas. Todos los intentos son en vano debido a las corrientes, poca visibilidad y los daños sufridos por la nave.

La noche del 15 de Agosto se obtienen las primeras imágenes en TV que muestran enormes daños en la proa y amura de babor. La vela, la cápsula de escape instalada en ella y los periscopios estaban dañados. Se informa de que el submarino está 20°-25° escorado y 5°-7° aporado sobre el fondo.

La mañana del 16 las operaciones tienen que suspenderse por un temporal y no se reanudan hasta las 20:00. Toda la noche hasta primeras horas del 17 se intenta acoplar 2 DSRV tipo *Pritz* pero sin éxito. A partir de la mañana lo intenta el *Bester* con el mismo resultado, debido a fuertes corrientes de 2.5 nudos, la escora y la falta de ayuda desde el interior del submarino.

Este día los supervivientes del interior del submarino dejan de lanzar mensajes.

El comandante en jefe Vladimir N. Kuroyedov hace una aparición pública e informa que las reservas de oxígeno del interior del submarino aguantarán solo hasta mediodía del 18.

Los días 18 y 19 los sumergibles rusos pudieron por fin acoplarse repetidas veces a la escotilla del *Kursk*, pero no pueden bombear el agua de la esclusa y abrirla, debido a que esta puede haber sido dañada durante el accidente o que alguien la ha dejado atascada intentando escapar.

Durante todo este tiempo una comisión del gobierno ruso ha estado discutiendo las distintas causas que pueden haber originado el accidente. Tras mucho debate la versión oficial dada el 20 de Agosto la limita a 3 posibles causas:

- Choque con un submarino occidental de no menos de 10,000 toneladas moviéndose a 10 nudos (esta es la versión que cuenta con más apoyos) o con un buque de superficie de gran porte, quizá un rompehielos o un carguero con capacitación para hielo (de no menos de 150,000 toneladas).
- Choque con una mina de la segunda guerra mundial.
- Un evento extraordinario en el compartimento I, esto es, explosión de un torpedo.

Expertos occidentales, se adhieren casi unánimemente al tercer supuesto. Los torpedos que estaba usando el *Kursk*, aunque no poseían cabeza de combate por ser de prácticas, iban propulsados por Peróxido de Hidrógeno, una combinación siempre peligrosa, que ya había causado desgracias en la armada británica en el pasado.

Mientras tanto, buena parte de la comunidad internacional había ofrecido ayuda, que fruto del secretismo tradicional, había sido rechazada por el gobierno ruso. Solo 4 días después de la tragedia, después de haber realizado consultas directas con la OTAN, el gobierno ruso pide oficialmente ayuda a las armadas británica y noruega. Inmediatamente despegan desde Escocia hasta Trondheim, Noruega, un avión Antonov cargado con un vehículo de rescate *LR-5* y un ROV (Remotely Operated Vehicle) *Scorpio 45* y 3 transportes C-130 con equipo adicional. Noruega manda a Tromsø un equipo de buzos de gran profundidad de la empresa *Stolt Comex Seaway* que estaba trabajando en Haltenbanken, al SW de Noruega, que se unirá a otro inglés. El día 17 zarpa de Trondheim el buque *Normand Pioneer* llevando ingenieros, sumergibles y equipo de apoyo, y el 18 de Tromsø el *Seaway Eagle* con el equipo de buzos.

Coordinaba la ayuda británicas el Comodoro David Russel y la noruega el Vice-Almirante Einar Korgen.

Se recibe en Kirkeness, Noruega, la orden para construir un dispositivo adaptador de las escotillas entre el *LR-5* y el *Kursk*. El Ministerio de defensa británico está convencido que vehículo británico podrá acoplarse al submarino a pesar de la gran escora de este.

En una reunión entre delegaciones noruega, británica y rusa a bordo del *Seaway Eagle* día 19 por la mañana, el representante de la delegación rusa, Vice-Almirante Gennadij Verich, resume la situación y la ayuda requerida a sus colegas occidentales. Su conclusión es que nadie a bordo está ya con vida y por tanto la asistencia del LR-5 no es necesaria. Se permitiría la inspección con el ROV, pero el área de operaciones queda restringida a la popa del submarino, desde las hélices al compartimento de reactores. La tarea principal de los buzos era la inspección visual de la escotilla de popa y la válvula de llenado/vacío de la esclusa.

Los buques noruegos llegaron al área el día 19 por la tarde. El día siguiente, las 09:00 del 20, por medio de las cámaras del ROV, pudieron ver por vez primera al submarino. Los daños coincidían con la descripción dada por los rusos, pero la escotilla de escape de popa no tenía daños, aunque sí su brazola. La escora era menor de lo anunciado, 1.5° a babor, y el asiento 2° aporado. No había ni rastro de corriente. Técnicos a bordo del *Seaway Eagle* toman muestras de agua y sedimentos para medir los niveles de radioactividad en la zona. Los niveles son normales. Los reactores del submarino estaban diseñados para pararse automáticamente en caso de catástrofe. A las 13:15, 3 buzos descienden para realizar una inspección. Fruto de ella llegan a la conclusión de que todo el casco estaba inundado, incluida la esclusa de escape de popa. Solo podría haber supervivientes merced a bolsas de aire en los compartimentos VII y VIII.

La tensión en este momento entre los equipos occidentales y ruso llega a lo más alto. Noruegos y británicos acusaron a los rusos de impedir deliberadamente sus intentos de entrar en el submarino tan pronto como fuera posible, y de suministrar información en general tan equivocada o incompleta que amenazaba la seguridad de los buzos. La amenaza por dar finalizada la participación del equipo de la OTAN en las tareas, movió al Almirante Viacheslav A. Popov a intermediar y dar por finalizada la crisis. Como consecuencia de ello, 2 buzos noruegos, con sendos interpretes, fueron trasladados de inmediato en helicóptero a otro submarino *Oscar* para estudiar de urgencia los mecanismos de la escotilla y esclusa.

Esa misma tarde y noche del día 20, los buzos, divididos en 4 grupos de 3 cada uno, dirigen todos sus esfuerzos en abrir la escotilla del compartimento IX. A las 07:45 del día 21 abren la escotilla externa para encontrarla inundada y sin ningún tripulante dentro. A las 13:00 abrieron la escotilla interna, venteando al exterior el aire remanente del interior del submarino. Introduciendo una cámara submarina de TV, confirmaron que el compartimento se encontraba inundado. Con ayuda de un robot se intentó rescatar el cuerpo de un tripulante atascado en el interior, pero fue imposible. No había supervivientes en el interior, lo cual hacía innecesario el empleo del LR-5. Esa misma tarde el gobierno ruso anunció oficialmente la pérdida de los 118 tripulantes, y volvió a insistir en la absurda teoría de la pérdida del *Kursk* por el choque con un submarino británico, a pesar de que no había ninguna prueba.

El día 22, después de honrar a los muertos con una ceremonia en el lugar de la tragedia, los buques noruegos zarparon de regreso. Solo quedaron vigilantes en el lugar 2 buques de guerra y uno hidrográfico para controlar los niveles de radiación. Vehículos de investigación submarina rusos Mir-1 y Mir-2 llevaron a cabo inmersiones entre el 25 y 30 de septiembre. En ese tiempo recogieron del fondo gran cantidad de fragmentos, pero ninguno perteneciente a un submarino extranjero (como esperaban las autoridades como confirmación de sus teorías).

En una reunión del 21 de Agosto entre delegaciones noruega y rusa, el Almirante Popov solicitó oficialmente ayuda a la Armada noruega para asistir en la recuperación de una parte de los cuerpos en el interior del submarino. Tras

negociaciones con varias empresas, se eligió a *Halliburton Norge AS* para realizarlo por un monto de 5,800,000 \$. Era evidente que la Armada rusa no tenía el equipo necesario para realizar el buceo de saturación que requiere trabajar durante días a 100 metros de profundidad.

El trabajo requería la apertura de 8 aberturas de alrededor de 1m en el doble casco por un equipo de 18 buzos noruegos, ingleses y rusos que trabajarían en turnos de 4 horas, pero solo estos últimos tendrían permitido trabajar dentro del submarino. La tarea tendría una duración de entre 10-18 días y se preveía recuperar entre 25-35 cuerpos. Los buzos vivirían durante ese tiempo a 10 bares de presión en cámaras de saturación a bordo del buque-plataforma *MSV Regalia*, a razón de 6 personas por cámara, y descenderían hasta el submarino en grupos de 3 en una de las 2 campanas de descenso con que cuenta el barco.

El 20 de Octubre el *MSV Regalia* llega a la zona, y en la madrugada del 21 se comienza a practicar las 2 primeras aberturas en el compartimento VIII por considerarlo el menos dañado. Como primera medida se despresurizaron las tuberías en el doble casco del sistema de lastre de alta presión de hasta 400bar. En el cote se utilizó chorro de agua a alta presión (14.700psi, unos 1.000bares) mezclado con un abrasivo (en su mayor parte FE 55% y SiO₂ 35%) capaz de cortar 150mm de acero. El corte debía atravesar los entre 8 y 18mm de acero del casco exterior y 50mm del casco interior. Previamente debía cortar una capa de un material anecoico a base de goma sintética de entre 40-80mm que recubre al casco externo y que sirve para amortiguar los ruidos interiores y ayudar a reflejar las señales exteriores, haciendo así al submarino más difícil de detectar. Resultó complicado atravesar este material porque difuminaba la fuerza del chorro, así que se varió el ángulo de corte a uno de sección en V. Después de que esta sección fue retirada, se reajustó de nuevo el ángulo del dispositivo para cortar verticalmente.

El día 22 se retiró la primera sección del casco exterior y se comenzó a cortar todas las tuberías entre los dos cascos. Una vez en el casco interior, cortaron primero una abertura de 19cm de diámetro para tomar muestras y tener un asidero para retirar la sección de 1 metro de diámetro que se abriría en el casco interior. El interior del submarino mostraba ausencia de isótopos radioactivos, combustible o aceites. El 25 a las 05:00 horas la primera gran pieza del casco interior fue izada sobre el *Regalia*. En los siguientes días los buzos se abrieron paso por los compartimentos VII, VIII y IX recuperando varios cuerpos. El 31 la Armada rusa dio por finalizada la búsqueda de más cuerpos porque ello implicaba la entrada en estrechos pasajes y ponía en peligro la vida de los buzos. Los buzos se dedicaron entonces a examinar la sección de proa y el fondo alrededor del casco, recogiendo información para la futura operación de recuperación. El 7 de Noviembre tras una ceremonia en homenaje a la tripulación del *Kursk*, el *Regalia* regresó a Noruega.

1.2 Descripción de la nave siniestrada:

El *Kursk* era un submarino de la clase Oscar II. Fue botado el 1994 y puesto en servicio en 1995. Diseñado para el ataque a portaaviones a larga distancia, su construcción era de doble casco con 10 compartimentos estancos:

I-Torpedos II-Comando y Control III-Tableros eléctricos IV-Alojamientos V y Vbis- Estaciones varias VI-Reactores VII y VIII-Turbinas IX-Motores eléctricos.

Como medios de rescate contaba con una cámara de salvamento de emersión para toda la tripulación situada en la vela, trajes especiales presurizados para tripulante individual, boya de emergencia y señales, y escotilla de escape de emergencia en los compartimentos I y IX.

Características:

Desplazamiento: 14.700t en superficie/24.000t en inmersión
Eslora: 154m
Manga: 18,2m
Guinda incluyendo vela: 18,3m
Calado: 9,2m
Velocidad máxima: 33 nudos
Profundidad máxima: 500m (estimada)
Reserva de flotabilidad. 30%
Propulsión: 2 reactores nucleares OK-6506 (2×160MW)
2 turbinas OK-9 (2×49.000hp)
4 turbogeneradores (4×3200KW)
2 generadores diesel (2×190KW)
2 hélices de siete palas

Armamento:

24 misiles SS-N-19 P-700(Granit) con cabeza nuclear o convencional alojados en pozos entre el doble casco a lo largo de los costados.
6 tubos lanzatorpedos: 4 de 650mm y 2 de 533mm con una dotación total de 28 armas entre torpedos, misiles anti-submarino, anti-buque y minas, lanzados todos ellos desde los tubos.

CAPITULO 2: FASE PREPARATORIA DE UNA OPERACIÓN DE SALVAMENTO

2.1 Planificación de una operación de salvamento

No hay un procedimiento estándar en un plan de salvamento. Y sin embargo, un salvamento es una operación concienzudamente planificada. Un buen plan no garantiza el éxito en una operación, pero una operación mal planificada tendrá pocas posibilidades de éxito. El salvador debe enfrentarse al caso armado con el conocimiento de los principios generales y la mejor información disponible. Para desarrollar un plan efectivo, el salvador debe evaluar la posición y condición del buque siniestrado, entender sus dificultades y visionar el trabajo y los métodos para conseguir las metas de la operación.

No hay una diferenciación precisa entre lo que son tareas propiamente de salvamento y lo que son los trabajos asociados. Sin embargo pueden clasificarse las siguientes categorías de operaciones de salvamento:

- Salvamento en aguas abiertas. Es el más difícil de los salvamentos porque el buque se encuentra sometido a la fuerza de los elementos y la ventana de oportunidad con buen tiempo o mareas apropiadas puede cerrarse durante semanas o meses. El rescate requiere prontitud para evitar su deterioro.
- Salvamento en puertos o aguas cerradas. Hay generalmente tiempo para una inspección y planificación concienzuda ya que el tiempo no es un factor tan importante salvo que el buque obstruya un canal o instalación.
- Salvamento solo de la carga. En ocasiones es más valiosa la carga que el propio buque, o comporta un peligro para el medioambiente.
- Retirada de un pecio. Tiene poco o nulo valor y se recuperan por el método más sencillo.
- Salvamento a flote. Cuando un buque está dañado pero flota.

Inspección del buque accidentado:

Recopila información del buque y área circundante para elaborar el plan de salvamento. Presenta solo observaciones, y es labor del rescatador interpretarlas para determinar la condición del buque siniestrado. Esta inspección variará dependiendo de si el buque está embarrancado, hundido o zozobrado. Se subdivide en varias:

- Inspección Preliminar: Un equipo avanzado de personal especialista verifica la información suministrada por el buque, compañía o autoridad marítima ya que la situación puede haber cambiado. También puede encargarse de estabilizar el buque si su situación se está deteriorando. Durante esta fase se recopila información acerca del buque de los armadores, sociedades clasificadoras, aseguradoras, astilleros, etc. Se hace una estimación inicial del esfuerzo, tiempo, y materiales necesarios para el salvamento.
- Inspección Detallada: desarrolla la anterior y recopila información más detallada subdividiéndose en varias partes: cubierta, casco interior incluyendo máquina, casco exterior sobre y bajo el agua, estudio hidrográfico, carga a bordo, potencial de contaminación y seguridad del lugar.

El Plan de salvamento:

La información recopilada se utiliza para desarrollar un plan de salvamento. Este enumera los trabajos que se han de realizar y los coordina con los recursos disponibles, los organiza en el tiempo, establece las responsabilidades de los

individuos y organizaciones, y sirve de vehículo para coordinar todos los esfuerzos de salvamento para conseguir el objetivo de fechas y tiempos. El desarrollo del plan de salvamento comienza cuando se recibe la primera información del accidentado y continúa a lo largo de la operación. El plan de salvamento se caracteriza por ser:

- Ser esencialmente dependiente del tiempo y la marea.
- Ser un documento dinámico que puede ser corregido o abandonado si las circunstancias cambian.
- Es aprobado y es la responsabilidad de la persona que dirige el salvamento.
- Varía en complejidad con las circunstancias del buque accidentado y la dificultad de la operación de salvamento.

Un buen plan de salvamento debe ser:

- Concienzudo y completo, pero solo tan detallado como sea posible.
- Técnicamente posible y realista.
- Flexible.
- Debe mantener en sintonía los trabajos y técnicas con el equipo disponible.
- Incluir alternativas primaria y secundaria.
- Organizar y coordinar las tareas requeridas para lograr objetivos globales.
- Identificar todos los puntos débiles.

Habrà en un principio un plan de salvamento preliminar desarrollado durante la fase de estabilización y evoluciona hasta un plan de salvamento definitivo. Después de la estabilización, el plan evoluciona según los siguientes factores:

- Recogida de información de acuerdo con las limitaciones del tiempo, y estimando los parámetros desconocidos o no verificados.
- Selección de métodos para lograr los objetivos.
- Determinación de la posibilidad de llevar a la práctica de los objetivos.
- Determinar si se modifican los objetivos de la operación, conseguir más medios o abandonar la operación, si la idea original no puede lograrse.
- Reexaminar la información y recopilar más datos en vista del cambio de objetivo.
- Repetir lo anterior cuanto sea necesario hasta desarrollar un plan definitivo.

Cuando se piensa en la selección de un método, el rescatador debe recordar que ninguna técnica es la correcta en todas las circunstancias. El hecho de que un método no se haya intentado no lo hace inapropiado para una situación particular. El rescatador está limitado solo por su conocimiento e imaginación.

Terminada la operación de salvamento, se preparan informes finales y se dirigen siguiendo la cadena de mando hasta la máxima autoridad marítima.

Informe final de las operaciones de salvamento:

Realizado al concluir las operaciones por el organismo o empresa que lo realiza con el propósito de:

- Proveen la base sobre la que el propietario reembolsará los gastos de la operación.
- Proveen la base sobre la que el propietario reembolsará por la pérdida de equipo o gastos sobrevenidos.
- Documenta los esfuerzos realizados por salvar el buque y que pueda ser utilizado en litigios.
- Documenta los costos para justificaciones fiscales.
- Documenta la operación para motivos históricos y de entrenamiento.

Informe técnico de salvamento:

Es un informe opcional preparado de acuerdo con la máxima autoridad marítima con el objetivo de:

- Proveer información sobre la eficacia de los equipos de salvamento al supervisor de esta clase de operaciones.
- Proveer información de las técnicas efectivas en los salvamentos y las que no lo son.
- Proporcionar información sobre problemas de seguridad y su solución.
- Proporcionar recomendaciones basadas en el trabajo de campo que mejoren la efectividad de los equipos y técnicas de salvamento.

2.2 Planificación de la recuperación de Kursk

El 18 de mayo del 2001 se firmó el contrato de recuperación con 2 empresas holandesa especializadas que realizarían la operación asociadas: *Mammoet* (especializadas en el transporte de grandes estructuras) y *Smit Internacional* (especializada en salvamentos marítimos no convencionales). A partir de esa fecha estas dos empresas comenzaron a trabajar estrechamente con los diseñadores del submarino para la realización de la compleja operación. Todas las pruebas técnicas se realizarían en laboratorios rusos. La estructura del casco sería estudiada en el *Orel*, gemelo del *Kursk*. El costo de la operación rondaría los 70 millones de dólares. El plan a desarrollar preveía 5 etapas:

A-Se adaptaría en Ámsterdam una plataforma semi-sumergible especial existente de 24.000 toneladas, la *Giant 4*, agregándole 26 cabrestantes hidráulicos, cada uno con una capacidad de 900 toneladas. Se practicarían 26 aberturas a través del casco de 1m de diámetro para que los cables de arriado e izado atravesaran su casco. Además de una abertura suficiente para alojar en ella la vela del submarino cuando estuviera izado, con una “cama” de madera alrededor de la abertura igual que la curvatura del casco del submarino. Las operaciones deberían ser realizadas en 7 semanas. Cuando estuviera lista, sería remolcada hasta el mar de Barents a no más de 5 nudos, previéndose su llegada a la posición entre el 12 y 15 de septiembre. Una vez allí, sería aseguradas mediante un campo de 8 anclas.

Mientras tanto, se construirían en astilleros rusos 2 grandes pontones para adaptarse a la *Giant 4* y darle suficiente flotabilidad antes de entrar en el dique flotante de Murmansk.

B-Buzos cortarían aberturas a lo largo del doble casco del submarino por medio de chorro de agua a presión, en el casco interior de 70cm de diámetro, en el exterior más grandes, para permitir la limpieza de equipos y conducciones en el espacio del doble casco y facilitar en enganche de los dispositivos de izado. También deberían cortarse la parte superior del timón de popa y los mástiles de la vela para permitir su acople a la barcaza.

La proa, dañada en un 50%, representaba un peligro durante la fase de ascenso por el peligro de desprendimiento y desestabilización, así que sería cortada en el lugar con un cable dotado de secciones cilíndricas abrasivas, movidas por unas cortadoras hidráulicas ancladas a 20 metros a cada lado de la sección de proa. Estarían fijadas en el fondo mediante succión y ejerciendo una fuerza de entre 300 y 500 toneladas cortarían la proa con un movimiento de vaivén de arriba a abajo.

C-Cuando todo esto estuviese realizado, se conectarían desde los pozos de la gabarra 4 cables guía por abertura, que servirán como guías para una buena orientación de los cabezales de los cables de izado que sujetarán al submarino.

Los cables de izado, de 23cm de diámetro y formado por un conjunto de 54 cables menores se arriarán, los cabezales penetrarán hasta dentro del casco interior, y entonces se abrirán hidráulicamente unas pestañas que sujetarán el casco por dentro, un sistema parecido al utilizado para descargar los contenedores en los puertos. Se estima empezar la colocación de estos cables el 10 de Septiembre y finalizarla 10 días después.

D-Cuando el tiempo lo permitiera, el submarino sería izado hasta la gabarra. El momento más peligroso será el despegue del fondo por el efecto succión. Todo el proceso de izado sería controlado por un sistema informático desarrollado al efecto, que controlaría constantemente las fuerzas aplicadas por cada cable y los esfuerzos. Los compensadores hidráulicos de los que está dotada la gabarra, amortiguarán el movimiento ascendente y descendente en la mar, manteniendo constante la tensión de los cables con olas de hasta 2.5m durante la 12-15 horas que se supone durará la ascensión.

E-Una vez acoplado el submarino, se le trasladará a Murmansk, un viaje de unos 2 días de duración. Una vez en el lugar, se acoplará al conjunto los pontones flotantes para obtener el calado requerido para introducirlo en el dique seco flotante. Se arriará al submarino hasta depositarlo en la cama del dique y una vez liberado de la plataforma madre, esta saldrá del dique, iniciándose la maniobra para dejar al submarino en seco y cubrirlo con un hangar especial para su inspección e investigación. Después de la recuperación de los cuerpos de su interior, será trasladado a un astillero para su desguace.

Toda la operación será probada mediante simulación previa, llevada a cabo en el laboratorio especializado de la construcción naval del instituto Krilov. Los modelos a escala de la *Giant* y *Kursk* determinarán si en cada etapa de la recuperación, la práctica coincide con la teoría.

CAPITULO 3: CORTE Y PARCHEADO DE UN BUQUE HUNDIDO

3.1 Corte y parcheado para recuperar un buque hundido

Corte manual:

El corte manual se utiliza casi invariablemente en toda operación de salvamento de un buque de forma complementaria a las demás. Los mayores peligros asociados a estas operaciones son:

- Tanques de combustible, residuos de combustible o gases combustibles.
- Tuberías que contengan los mismos elementos.
- Restos de la parte superior del naufragio que puedan caer o atrapar a los buzos.
- Áreas que pueden acumular los gases liberados durante las operaciones de corte y crear atmósferas explosivas.

Los métodos más comúnmente utilizados para el corte son los siguientes:

- Corte con oxi-combustibles. Se suele utilizar oxígeno e hidrógeno porque los gases de este último son menos peligrosos y además puede suministrarse a mayor profundidad que el acetileno. El oxígeno, además de quemar el hidrógeno, actúa como aislador del agua circundante. El gas se prende con una chispa producida eléctricamente. Los espesores que se pueden cortar con este sistema varían entre 10-40mm de chapa, aunque espesores de hasta 230mm se han llegado a cortar bajo el agua.
- Corte por oxi-arco. Utiliza un electrodo hueco por el que se inyecta oxígeno. Un arco eléctrico entre el electrodo y la chapa precalienta el metal.
- Corte exotérmico utiliza una reacción del acero dulce con la chapa una vez que una temperatura previa se ha establecido con un arco eléctrico. Para ello un electrodo de acero está empaquetado con varios de acero dulce, circulando oxígeno por su interior.
- Corte de plasma utiliza un chorro muy caliente de plasma haciendo pasar un arco por un flujo de gas, generalmente argón, hidrógeno, nitrógeno o una mezcla de todos estos.
- Las cortadoras de hilo utilizan un cable de acero o material sintético con un abrasivo y suelen moverse desde la superficie por medio de 2 bombas neumáticas.

- Maquinaria portátil como cortadoras de discos, de guillotina, etc. Básicamente equipos terrestres con sellos y el uso de zinc y aluminio para prevenir la corrosión. Algunos modelos son piro-mecánicos, en los que en vez de líquido hidráulico utilizan la mezcla de un comburente y un combustible para producir el golpe de la cuchilla.
- El corte por chorro de agua se basa en un sistema de agua a alta presión mezclado con un abrasivo. Los hay de inyección indirecta en la que agua y abrasivo viajan por distintas mangueras y se juntan en la boquilla. Pueden subdividirse entre inyección en seco y como fango. La presión varían entre 2380-3750 bares para el primero y 600-700 bares para el segundo. Los de inyección directa corrigen muchas de las ineficiencias y problemas derivados de trabajar con tan altas presiones al usar una presión de solo 350 bares. Ambos productos se mezclan en superficie y viajan por la misma manguera, permitiendo equipos más pequeños y manejables.

Es un equipo ideal para trabajar en lugares con atmósferas explosivas, ya que no produce chispas ni llamas.

Corte con explosivos:

El corte con explosivos se suele utilizar generalmente el tipo de carga hueca, que utilizan el *efecto Munroe*. La carga tiene una cavidad cónica recubierta de un metal que al explotar converge sobre la superficie de la chapa a cortar en forma de un chorro de metal líquido con una energía enorme. Para trabajar a profundidad esta cavidad va rellena de una espuma o gas a presión, pues de otra manera colapsaría. Se utilizan cargas en forma lineal para trabajos de precisión, pero si no es posible obtenerlas, se puede improvisar un trozo de manguera relleno de explosivos y sellado por los extremos con cinta. Se acoplan al casco mediante grapas, cabos a través de orificios practicados, imanes, ventosas o apoyados en superficies horizontales. Para cortar chapa el explosivo debe estar en contacto con la superficie, junto a una cuaderna, pero ligeramente separado de ella. Conviene calcular adecuadamente la cantidad de explosivos para evitar daños adyacentes que creen superficies cortantes y retorcimientos que dificulten la labor posterior de los buzos. Se suelen llevar a cabo pruebas en la superficie con trozos recuperados del accidente para evaluar los resultados.

Corte mecánico:

· Maquinaria pesada de gran porte que trabaja mediante grúas flotantes o buques especializados: cizallas, cinceles, grúas tipo pulpo, etc. Suelen ser movidas hidráulicamente mediante una manguera de alimentación y otra de retorno a la superficie.

· Corte con cadenas o cables:

El corte con cadenas o cables tiene más de 100 años. Posee sus ventajas y desventajas:

- El sistema es básicamente independiente de los buzos una vez que ha sido enganchada.
- Generalmente es un sistema más rápido que un corte manual.
- No están limitadas por fango, mala visibilidad o tiempo de permanencia en el fondo.
- La flotabilidad ejercida por el sistema generalmente tiene efectos positivos en la velocidad de corte por el efecto de erosión y rotura que genera.

Por el contrario:

- Es difícil y peligroso monitorizar el progreso del corte por buzos o vehículos submarinos debido a los retorcimientos y bordes cortantes que se general en la chapa.
- Pueden producirse retrasos cuando la línea de corte se desplaza y afecta a cuadernas y refuerzos.
- Cuando en ocasiones se rompe la cadena dentro del naufragio, puede ser difícil y lento recuperarla y enganchar de nuevo.

La cadena a utilizar debe ser de alta resistencia, libre de defectos, concretos sueltos o curvaturas. Se utilizan diámetros $2\frac{3}{4}$ a $3\frac{1}{2}$ pulgadas. En general, cadena de menos de $2\frac{1}{2}$ pulgadas no debe ser usada para esta tarea. El corte puede ser vertical u horizontal. El más común suele ser el primero de ellos, de abajo a arriba. Como primer paso se hace pasar un mensajero por debajo del casco. Mediante eslingas se hace pasar la cadena y se engancha a la grúa que va a realizar el corte. La cadena se

tensiona y se marcan los puntos de contacto con el casco del buque. Más tarde se afloja y los buzos hacen con soldadura o explosivos unos rebajes para que penetren 3 o 4 eslabones de la cadena y no resbale cuando comience el corte. Mediante movimientos alternos de la cadena se lleva a la estructura al punto de rotura y se avanza a través del casco. Los espacios de maquinaria se evitan siempre que sea posible porque presentan mayor dificultad de corte. El rescatador debe adaptar el método a utilizar a cada caso.

Parcheado de un buque:

La flotabilidad se puede recuperar:

- Sellando el daño en el casco con parches y luego achicando el espacio.
- Aumentando la altura del casco o las cubiertas en cubierta y achicando el espacio.

Parcheado de un buque embarrancado o hundido:

Los parches se colocan generalmente externos cuando se va a achicar el espacio con bomba e internos cuando se achica soplando aire, para que la presión externa o interna ayuden al sellado. En aberturas debajo de la línea de flotación en espacios contiguos en el que uno de ellos se va a soplar con aire y el otro a bombear necesitan ser parcheados interna y externamente.

Se clasifican por el tamaño:

- Pequeños: Grietas, sellos o tuberías rotas o agujeros de hasta 30cm. Como regla general, es un trabajo menor que puede llevar a cabo un solo hombre fácilmente. No requiere realizar un análisis de resistencia. Se puede sellar con cuñas de maderas, parches de resinas, madera, metal o cemento con una junta de goma.
- Medios: Grietas y agujeros mayores de 30cm y hasta alrededor de 1 metro, que no pueden sellarse con los materiales previos ya que suele necesitarse material de corte y soldadura para cortar y soldar chapas, metal retorcido, tuberías, etc. Requieren más de 1 persona para llevarlo a cabo. No suele ser necesario un examen exhaustivo de resistencia.
- Grandes: Daños extensivos estructurales. Como aproximación, el tamaño es mayor que una puerta. Requieren un análisis riguroso de la resistencia por un ingeniero del parcheado, su unión al casco y su interacción con la estructura del buque. Requieren igualmente un trabajo extenso de planificación, ingeniería, fabricación y colocación en una secuencia ordenada.

El acero es el material por excelencia para los salvamentos. Es inherentemente resistente, puede ser soldado, atornillado y soportar refuerzos internos. En cambio, la soldadura de un parche de aluminio a un casco de aluminio, aunque factible técnicamente, no es práctico en operaciones de salvamento por el tiempo y la preparación técnica necesaria para realizarla.

La soldadura de grietas requiere taladrar sus extremos para prevenir su extensión, pulir a los lados unos 5 centímetros hasta llegar al metal, y soldar una placa dejando 15 centímetros alrededor de la grieta. Si se rellena la grieta simplemente con cordón de soldadura, volverá a romperse por el mismo lugar.

La madera fue históricamente el principal material para efectuar reparaciones, aunque hoy día es poco utilizado. Es fácil tener a mano el material para construir un parche de la medida adecuada. Se fija en su posición con pasadores y tornillos. Su capacidad de deformarse e hincharse cuando está mojada ayuda a realizar un buen

sellado. El parchado mediante cuñas de madera es efectivo en grietas demasiado grandes para ser soldadas o demasiado pequeñas para utilizar un parche de acero. El cemento es un muy útil material en operaciones de salvamento porque:

- Se adhiere bien al acero. Es un material fuerte pesado y estanco. Refuerza con su peso al sellado final de las caras internas de parches moderados o grandes.
- Como fluye como una lechada, puede ser inyectado en áreas inaccesibles de otro modo
- Se adquiere en cualquier lugar del mundo
- Requiere una preparación de la superficie mínima
- No requiere un trabajo de preparación preciso y puede ser mezclado en pequeñas o grandes cantidades sin pérdida de material
- Puede colocarse en seco o bajo el agua
- Puede utilizarse en lugares donde no se pueden hacer trabajos en caliente

El cemento sin refuerzo interno no tiene resistencia a la tensión, por lo que ha de añadirse alambre, varillas o pequeñas estructuras de acero. El cemento se adhiere bien al acero aunque esté oxidado, pero no lo hace si está manchado de sustancias aceitosas.

Las proporciones que se usan para operaciones de salvamento son las siguientes:

- 1 parte de cemento Pórtland
- 1½ partes de arena
- 1½ a 2 partes de grava
- 18 a 27 litros de agua por cada saco de cemento

El tiempo de fraguado es 45 minutos, pero se puede acelerar agregando agua caliente y una taza de soda si no se tiene agente endurecedor. La arena de playa o el agua salada producen un cemento de inferior calidad.

Encofrado de un buque embarrancado o hundido:

Cuando toda o parte de la cubierta principal de un buque está debajo del agua, el agua de su interior no puede bombearse hasta que todas las aberturas se han taponado o se aumenta el francobordo por encima de la altura de la pleamar. Para ello se construye una estructura rodeando la parte inundada. Se distinguen 3 tipos:

- Encofrado completo:

Se realiza alrededor de un buque que está más o menos en aguas iguales. Cuando hay una escora o asiento, se realiza solo en el área sujeta a inundación. Es apropiado cuando:

- El siniestrado está en aguas abrigadas como puertos, ríos o muelles.
- El siniestrado es tan antiguo que el llevar a cabo reparaciones temporales y sellado es impracticable.
- La cubierta principal tiene tantas aberturas que la combinación de sellado parcial y encofrados más los trabajos de apuntalamiento, requiere más trabajo que el encofrado completo.

Los encofrados se construyen mediante secciones prefabricadas en tierra, lo cual requiere personal y equipos de elevación. Esos mismos equipos se necesitan durante la fase de reflotado para reducir los problemas de estabilidad, o para su traslado a aguas menos profundas.

- Encofrados parciales:

Rodean escotillas o grandes aberturas en cubierta. Su uso requiere un estudio de ingeniería al igual que con el uso de encofrado completo porque se crean una serie de problemas de estabilidad:

- El plano de flotación, y por tanto el radio metacéntrico, se desarrollan lentamente.

- Hay superficies libres en los espacios achicados.

- El agua sobre la cubierta del barco fuera del encofrado actúa como una superficie libre.

Cuando un buque con encofrado parcial comienza a ascender, será casi con seguridad inestable. Cuando el nivel del agua en el interior del encofrado baje del nivel del mar exterior, la cubierta comenzará a soportar esa diferencia de presión. Si la cubierta está sumergida más de 1,2m-1,6m, se requiere apuntalarla. Con cubiertas por debajo de 4,8m, no merece la pena el tiempo y esfuerzo necesarios para tener que apuntalarla.

- Encofrados pequeños:

Se usan en lugares tales como escotillas de acceso, troncos de ventilación, etc. Se construyen para el propósito con placas de metal, madera o improvisando con cualquier material como un bidón con la base cortada y soldada alrededor de una abertura.

3.2 Corte de aberturas y la sección de proa en el submarino Kursk

El 20 de Julio del 2001 llegó el buque de apoyo *Mayo* con un equipo multinacional de 12 buzos noruegos, escoceses y rusos.

Como fase preparatoria se estudió el estado del submarino y sus alrededores. No se encontraron restos de explosivos en el lecho marino o el compartimento I. Esto se estableció por exploración con ROV y especialistas submarinos rusos. Se midieron los niveles de radiación a varios niveles de energía. Estos niveles no sobrepasaron los usuales en el área.

Con agua a baja presión se limpió el área de corte alrededor del compartimento I.

El corte de los 26 orificios a través del doble casco comenzó el 22 de Julio. Se utilizó de nuevo el corte con agua a presión, con presiones que variaban entre 600 a 1500 bares. El tamaño de las aberturas era de 700mm en el casco interior y mayor en el exterior para facilitar la retirada de obstáculos en el doble casco y el anclaje de los cabezales. Su sección habría de ser diferente dependiendo de la localización debido a la curvatura del casco. Se realizó para cada abertura una placa base que servía como plantilla.

Para el corte de los aproximadamente 20 metros de proa del *Kursk* que significaba un peligro durante su izado y por la posibilidad de quedar algún explosivo, se utilizó un sistema de corte por cable que comprendía 4 elementos:

- Dos Anclas de succión. Consisten en 2 cilindros abiertos por su parte inferior, unidos por una estructura. En lo alto de la estructura hay una bomba de succión conectada por un manifold a cada cilindro. Creando un vacío se consigue que se ancle en el fondo y penetre en el fondo a voluntad. En lo alto del ancla hay un cilindro que mueve la cadena.

- Elemento cortante. Son cilindros con superficie abrasiva por el centro de los cuales pasa un cable guía.

- Un sistema hidráulico. Suministran desde una gabarra en superficie 240 bares de presión a los cilindros de las anclas para efectuar el corte.

-Un sistema de control. Una computadora controla desde la misma gabarra el sistema. Dos umbilicales la conectan con cada una de las anclas.

El corte de la sección de proa avanzó al principio rápidamente, pero se demoró hasta 10 días debido al alto contenido en roca del lecho que originaba mucha fricción y la rotura del cable de guía. Hubo que disponer unas planchas de soporte para proteger el cable del roce con el fondo y sustituirlo.

CAPITULO 4: ESTABILIDAD Y LIBERACIÓN DE UN BUQUE EMBARRANCADO O HUNDIDO

4.1 Factores en consideración

El salvamento de un buque embarrancado generalmente requiere más urgencia que uno hundido. El primero suele constituir un peligro para la navegación y su exposición a corrientes y tormentas lo deteriora rápidamente. El segundo, si está hundido en aguas resguardadas o lo suficientemente profundas para resguardarlo de las condiciones atmosféricas, permite más tiempo para planificar y reunir materiales para su salvamento. Como norma general, solo se recuperan buques hundidos en aguas poco profundas. Si el buque tiene 30 metros de agua sobre cubierta suele resultar antieconómico, salvo que tenga un alto valor. Los submarinos, por su construcción, se pueden recuperar de profundidades mucho mayores, pero aquí influyen otro tipo de razones además de las económicas.

Todo trabajo de reflotamiento de una nave hundida requiere una combinación de buenas prácticas marineras y de ingeniería. En un embarrancamiento la primera es proporcionalmente más importante, mientras que si el buque está hundido la segunda prima más. El rescatador debe tener en cuenta 4 factores:

- Predecir el comportamiento de la nave hundida cuando se aplican las leyes de la flotabilidad y estabilidad.
- Determinan la fuerza de flotabilidad o adrizado necesaria.
- Tener en cuenta las fuerzas de la naturaleza sobre la nave siniestrada y el equipo rescatador.
- Elegir el método para reflotar o adrizar la nave hundida de forma controlada.

La posición relativa de un buque hundido con el fondo y la superficie da una idea del grado de dificultad que presenta su salvamento. El grado de hundimiento y la distribución de su peso entre la reacción del fondo y la flotabilidad condicionan grandemente su comportamiento. Los factores más importantes en un hundimiento son:

- Si el buque está zozobrado o no.
- Cuanto se ha asentado el buque en el fondo.
- Altura de agua encima y alrededor del buque.
- Daños sufridos antes, durante y después del hundimiento.
- Posición del buque: escora, asiento, contacto con el fondo, etc.
- Distancia a aguas resguardadas poco profundas.
- Grado de hundimiento.

Una inspección visual puede dar una primera impresión del grado de daños sufridos. Si una parte se hunde rápidamente mientras otra lo hace lentamente, diferencias entre el nivel de agua el interior y exterior o entre compartimentos adyacentes, nos da una valoración de donde están los mayores daños.

Otro tipo de factores son:

- El barco: tipo y condición.
- Tipo de fondo.
- El mar: profundidad, marea, oleaje, corrientes, etc.
- Condición del barco: posición relativa al fondo y tierra, área en contacto, zozobrado, cubierta sumergida o no, contaminación, tiempo disponible para salvarlo y trabajo necesario.
- Localización: necesidad de retirarlo rápidamente, facilidades industriales o fabriles cercanas, diques secos, sensibilidad ambiental, etc.

- Clima
- Salvadores: tipo y disponibilidad de salvadores, etc.

El fondo produce diversos efectos se han de tener en cuenta:

· Fricción. En buques embarrancados la reacción del fondo, composición, pendiente y uniformidad, forma de la obra viva y efectos dinámicos son elementos a tener en cuenta.

La fuerza requerida para liberar un buque se calcula al multiplicar la reacción del fondo por el coeficiente de fricción estático. Estos son variables y aproximados, sirva como ejemplo:

<u>Tipo de fondo</u>	<u>Coefficiente de fricción μ (estático)</u>
Fango o barro	0.2 a 0.3
Arena	0.3 a 0.4
Coral	0.5 a 0.8
Roca	0.8 a 1.5

Fuerza necesaria para liberar un buque embarrancado es:

$$F=1.12 \times \mu \times R \quad \text{donde:}$$

F=fuerza en toneladas cortas.

μ =coeficiente estático de fricción.

R=reacción del fondo. Porción del peso del buque soportado por el fondo. Es igual a la pérdida de flotación soportada por el buque embarrancado. Se calcula por diversos métodos: diferencia de desplazamiento antes de embarrancar y embarrancado, toneladas por centímetro de inmersión, etc. Se mide en tonelada larga o inglesa y se multiplica por 1.12 para pasarlo a toneladas cortas (1 tonelada corta es 907,185Kg) Se distribuye a lo largo de la superficie de contacto del buque con el fondo. Esta superficie suele ser difícil de observar, pero por ejemplo, para un barco asentado sobre un solo punto de subsuelo compacto, pivota en un punto entre el de reacción del fondo y donde se acaba su apoyo con el. Observando los cambios de calado del barco con los cambios de marea cuidadosamente, se puede ver que el punto donde pivota es en el que el cambio de calados es el mismo que la altura de la marea.

· Succión. Dependiendo del tipo de fondo y el tiempo que el buque haya estado en el, aumentará la fuerza de succión. La fuerza a aplicar debe tener en cuenta el peso del objeto más el del fondo que esté siendo izado. Tiempo y fuerza son dos factores íntimamente ligados. Un pecio puede ser liberado del fondo aplicando una pequeña fuerza aplicada durante un gran periodo de tiempo o mediante una gran fuerza aplicada en uno pequeño.

Las fuerzas teóricas y empíricas para vencer la succión del fondo son difíciles de calcular por la cantidad de variables desconocidas, y generalmente se peca por exageración. Si se aplica suficiente fuerza para izar un buque y vencer la fuerza de succión de una forma rápida, cuando esto ocurra el buque ascenderá de forma brusca e incontrolada. Es mejor aplicar una fuerza constante, ligeramente mayor que la calculada para izar el barco, durante un periodo de tiempo, generalmente permite mejores resultados y permite ascender al barco bajo control.

Para vencer la succión se puede pasar un cable por debajo del casco, soplar aire, aplicar fuerza de izado en un extremo a la vez, alternar fuerza de izado y descenso, o

aplicar fuerza lateralmente. La succión es una fuerza importante cuando se liberan buques hundidos más que embarrancados, y la fuerza liberadora actúa verticalmente.

- Daños en el buque. Las superficies irregulares de un buque siniestrado ofrecen una resistencia a la hora de liberarlo. Como norma a seguir, 0.5 o la mitad del coeficiente de fricción (lo que sea mayor) se ha de aplicar a la fórmula a aplicar. Todo ello que la superficie dentada de un buque no actúe como un ancla sobre el coral, roca o similar sobre la que esté apoyado, en cuyo caso la chapa o la estructura de tierra debe ser cortada o el buque difícilmente se liberará.

- Movimiento del fondo. Algunos tipos de fondo, particularmente la arena, se mueven con el estado del mar. El movimiento y altura de las dunas formadas debe registrarse mediante estacas marcadas, y registrada todos los días junto con la marea.

- Hundimiento en el fondo. Muchas veces el barco siniestrado se hunde lentamente en el lecho hasta que este se compacta lo suficiente para soportarlo. Se debe medir este hundimiento a la misma altura de la marea mediante marcas en el francobordo. Se deberán tomar muestras del fondo del lecho para su estudio en el laboratorio. Se pueden construir un cofferdam para contrarrestar este hundimiento si es necesario.

- Sedimentación. Varía con el tipo de fondo, pero como aproximación, se puede calcular un peso aproximado de 100 libras por pie cúbico si no se tienen muestras del barco para medir. Si se puede obtener un cubo de sedimento del fondo, el peso del fango sólido seco para un volumen determinado da una medida más exacta.

- Pendiente del fondo. En muchas ocasiones, el reflotamiento no se hace en una sola etapa por el riesgo de zozobrar. Lo que se busca es aligerar el buque lo suficiente para llevarlo a aguas menos profundas, manteniendo el contacto con el fondo. Se ha de realizar un perfil o batimetría de la ruta proyectada, en especial de las zonas donde va a descansar el buque para una siguiente etapa.

4.2 Estabilidad de una nave intacta

La estabilidad es la capacidad de un buque de volver a su posición original cuando ha sido perturbado por una fuerza y esta ha sido retirada. Puede tener estabilidad positiva si tiende a volver a la posición original. El metacentro se localiza por encima del centro de gravedad y a medida que se inclina, se crean brazos adrizantes que tienden a poner vertical el buque. Puede tener estabilidad negativa si por el contrario el buque tiende a continuar en la dirección de la fuerza perturbadora. El metacentro en este caso se localiza por debajo del centro de gravedad y se crean brazos escorantes que lo desestabilizan. O puede tener estabilidad neutra cuando se queda fijo en la posición que una fuerza perturbadora lo ha movido. El metacentro y centro de gravedad coinciden y no se produce ningún par de fuerzas. La flotabilidad neutra casi nunca ocurre en un barco a flote, pero se debe tener en cuenta en buques hundidos porque es un paso por el que pasa un buque reflotado al sobresalir de la superficie, y una fuerza desproporcionadamente pequeña podría desestabilizarlo y hacerlo zozobrar.

A pequeños ángulos de escora el metacentro M está fijo y solo empieza a moverse después que el buque se inclina 7 a 10 grados.

Diversos parámetros que determinan la estabilidad:

-Altura del centro de gravedad sobre la quilla o KG es de vital importancia. Se ha de inventariar todos los pesos a bordo y su altura sobre la quilla. Su multiplicación determina el momento de esos pesos. La división de la suma total de esos pesos entre el peso total del buque determina el KG:

$$KG = \frac{\text{Suma de momento de pesos}}{\text{Peso total}}$$

Si se añade un peso a bordo, el nuevo KG₁ se calcula:

$$KG_1 = \frac{(KG \times W) + (kg \times w)}{(W + w)} \quad \text{donde:}$$

KG=Antigua posición del centro de gravedad

W=Peso del buque (desplazamiento) antes del añadido del peso.

w=Peso añadido.

kg=Altura del peso añadido sobre la quilla.

Suele ser conveniente poder calcular la nueva altura del centro de gravedad tras añadir un peso a bordo para aplicarlo al GM y establecer como quedará la estabilidad:

$$GG_1 = \frac{Gg \times w}{W \pm w} \quad \text{donde:}$$

Gg=Distancia entre el centro de gravedad y el peso añadido o quitado.

-Altura del centro de carena o KB está contenido en la curva de formas del buque. El centro de carena es el centro geométrico de la obra viva. Para una gabarra rectangular el KB está a la mitad de su calado, mientras que para un buque tipo se haya entre 0.53 y 0.58 de su calado. A efectos de salvamento y si no se tienen las curvas de formas del buque, se puede aplicar un KB de 0.55 veces el calado medio.

-Radio metacéntrico transversal o BM es la distancia entre el centro de flotación y el metacentro. Se calcula mediante la formula:

$$BM = \frac{I}{V} \quad \text{donde:} \quad I = C_{IT} \times L \times B^3 \quad C_{IT} = C_{Bloque}^2 / 11.7$$

I=Momento de inercia del plano de flotación del buque en el eje longitudinal.

V=Volumen desplazado

C_{IT}=Coeficiente de inercia transversal

L=Eslora

B=Manga

$$(L \times B)^3$$

Para una gabarra rectangular, el momento de inercia se simplifica: $I = \frac{\quad}{12}$

-Altura del metacentro KM sobre la quilla se obtiene de la curva de formas. Es la suma de la altura del centro de carena más el radio metacéntrico: $KM = KB + KM$

-Altura metacéntrica o GM es el principal indicativo de la estabilidad de un buque. Es la resta de distancias entre quilla con metacentro y quilla con centro de gravedad: $GM = KM - KG$

-Brazo adrizante GZ. Es la distancia entre las líneas de acción del peso actuando sobre el centro de gravedad y la flotación haciéndolo sobre el centro de flotación a un ángulo de inclinación θ . $GZ = GM \times \text{sen}\theta$

Esta ecuación es valida para pequeños ángulos de inclinación. Con ángulos mayores de 10 o 15 grados el metacentro se desplaza fuera de la línea central y la relación entre GM y brazo adrizante deja de ser exacta.

-Momento adrizante RM. El tamaño del momento adrizante a cualquier desplazamiento es directamente proporcional al brazo adrizante, este ultimo puede utilizarse como un indicador de la estabilidad: $RM = W \times GZ$

-Curvas de estabilidad estática. Muestra los cambios del brazo adrizante a medida que el buque se inclina para un determinado desplazamiento y altura del centro de gravedad.

Provee la siguiente información:

- Rango de inclinación a lo largo del cual el buque es estable
- Brazo y Momento adrizante a cualquier ángulo
- Angulo al que estos últimos toman el valor máximo
- Altura metacéntrica

Cuando el centro de gravedad tiene una altura distinta de la supuesta se ha de corregir mediante la formula: $\text{corrección} = GG_1 \times \text{sen}\theta$ donde GG_1 es la separación vertical entre los dos centros de gravedad. Se dibuja la nueva curva encima del eje horizontal.

Si el centro de gravedad está por encima del supuesto, la altura metacéntrica decrece y el buque es menos estable. La diferencia de ambas curvas origina la nueva curva de estabilidad.

Si el centro de gravedad está por debajo del supuesto, la altura metacéntrica aumenta y hace al buque más estable. La curva se dibuja debajo del eje horizontal y de nuevo la diferencia entre las curvas es la nueva estabilidad estática.

Igualmente si el centro de gravedad no está en la línea de crujía, se produce una escora con la consiguiente reducción del brazo adrizante en el costado de esa escora. La corrección se calcula: $\text{corrección} = GG_1 \times \text{cos}\theta$ donde GG_1 es la diferencia entre la línea central y la nueva posición transversal del centro de gravedad.

Y se dibuja en la gráfica igual que en el caso de las correcciones por altura.

La altura metacéntrica puede obtenerse de la gráfica de estabilidad estática del siguiente modo:

- Dibujando una perpendicular al eje horizontal a los 57.3° (1 radian)
- Trazando la tangente a la curva de estabilidad estática desde el origen

La intersección de las dos líneas indica la altura metacéntrica.

Añadido o retirada de pesos en un buque:

Cuando se añade o retira un peso ocurren 3 cosas:

- El desplazamiento cambia.
- El centro de gravedad se mueve.
- Se producen momentos que ocasionan un asiento o escora.

El cálculo de los efectos de un peso se estudia dividiéndolo en dos partes:

a-El peso es tratado como si se añadiera sobre el centro de gravedad y su efecto sobre el desplazamiento es calculado mediante la formula:

$$\text{Hundimiento paralelo} = \frac{w}{\text{TPI}}$$

w=peso añadido

TPI=toneladas por pulgada/centímetro de inmersión. Se obtiene de la curva de formas.

b-El peso es movido a su posición actual y sus efectos sobre la altura metacéntrica, asiento y escora son calculados.

Para ello se calcula el Momento del asiento que la multiplicación del peso que causa el momento por la distancia al centro de flotación.

$$M_T = w \times d$$

Luego se calcula el cambio total de asiento dividiendo el momento total entre el momento para hundir 1 pulgada/centímetro el buque. MT1 se calcula con la curva de formas o mediante formula:

$$MT1 = \frac{(GM_L \times W)}{(12 \times L)}$$

GM_L =altura metacéntrica longitudinal

W=desplazamiento

L=eslora entre perpendiculares

$$\Delta a = \frac{\text{Momento del asiento}}{MT1}$$

Por ultimo, se calculan los nuevos calados a proa y popa:

$$\Delta C_{\text{proa}} = \Delta a \times \frac{\text{LCF a Perpendicular Proa}}{L}$$

$$C_{\text{proa}} = C_{\text{inicial}} \pm \Delta C$$

$$\Delta C_{\text{popa}} = \Delta a \times \frac{\text{LCF a Perpendicular Popa}}{L}$$

$$C_{\text{popa}} = C_{\text{inicial}} \pm \Delta C$$

4.3 Estabilidad de la nave embarrancada

Un buque embarrancado con una gran marea, puede variar enormemente la altura metacéntrica y volverse negativa. Tenderá entonces a escorar. Si una porción importante de su casco está en contacto con el fondo no zozobrará. Los fondos poco firmes adoptarán los contornos del casco, y los duros le impedirán girar sobre su eje. Solo los buques asentados en un montículo o de casco muy fino asentados solo con su proa pueden zozobrar. Conviene en estos buques mantener su centro de gravedad lo más bajo posible y eliminar las superficies libres. Pero en general, la estabilidad cuando el barco está embarrancado no es un problema.

Lo son en cambio, los momentos flectores que debe soportar el buque embarrancado. En general, arrufos o quebrantos mayores de 0,001LBP (eslora entre perpendiculares) es potencialmente peligroso y justifica un análisis detallado de resistencia. Buques tanques de gran porte pueden soportar más carga, del orden de 0,003LBP, pero en cualquier caso se debe mantener un control continuo de los calados en 3 o más puntos con la hora y marea reinantes.

Determinación de la fuerza de reacción del fondo

La reacción del fondo es necesaria para determinar la cantidad de trabajo y método de reflotamiento, y para evaluar la estabilidad y fortaleza del buque siniestrado. Se debe calcular por más de un método, y sus resultados comparados.

Métodos para calcular a reacción del fondo R:

- Distribución de la flotación residual. El área entre la curva de pesos y la de flotación para la línea de flotación del buque embarrancado, es la reacción R. Es un método más exacto, ya que con los demás se obtiene resultados aproximados. Es adecuado para trabajar con la ayuda de computadoras. Se utiliza la integración numérica usando áreas de sección de las líneas de curvas *Bonjean* según la fórmula:

$$A = h/3 (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + 4y_5 + 2y_6 + \dots + y_n)$$

donde h es la separación entre secciones, siendo estas siempre de numero impar.

- Cambio de desplazamiento. La resta del desplazamiento antes y después del accidente, usados los calados respectivos, y corregidos si hay asiento. Es el método más simple para usar, salvo que haya deformaciones del casco significativas o gran asiento.

$$R = \nabla_a - \nabla_b$$

- Cambio de calado a proa. Considera la R equivalente al movimiento de un peso que cause ascenso vertical y cambio de asiento.

$$R = \frac{\Delta T_f (TPI)(MT1)(L)}{(L)(MT1) + (d_f) (d_f) (TPI)} \quad \text{donde:}$$

ΔT_f = cambio de calado a proa

d_f = distancia del centro de flotación a la perpendicular de proa

d_r = distancia del centro de flotación al centro de reacción del fondo

MT1 = momento para asentar una pulgada (se obtiene de las curvas de formas)

TPI = toneladas por pulgada de inmersión (se obtiene de las curvas de formas)

L=eslora entre perpendiculares

Igualmente se puede determinar d_r :

$$d_r = \frac{1}{TPI(d_r)} \left(\frac{\Delta T_f(TPI)(MT1)(L)}{R} - (MT1)(L) \right)$$

·Toneladas por pulgada/centímetro de inmersión. Otro método sencillo. Tiene en cuenta solo el ascenso vertical, y es adecuado para una primera estimación del R, máxime si no se tiene más información detallada.

$$R = (T_{mbs} - T_{mas})TPI \quad \text{donde:}$$

T_{mbs} =calado medio antes de embarrancar

T_{mas} =calado medio después de embarrancar

TPI=toneladas por pulgada de inmersión

·Cambio de asiento. Es el más adecuado cuando el cambio de trimado supera el 1% de la eslora, el centro de presión de la reacción del fondo es conocido con relativa exactitud, y el cambio de trimado es el efecto dominante en el embarrancamiento. La reacción del fondo es tratada solo como una fuerza que causa solo cambio de asiento.

$$R = \frac{MT1(A_t)}{d_r} \quad \text{donde:}$$

A_t =cambio de asiento en pulgadas

Determinación del punto de reacción del fondo

Las fuerzas actuando en un buque embarrancado se representan en el diagrama inferior:

W es el peso del buque que actúa sobre G, el centro de gravedad.

B es la flotación que actúa sobre B, el centro de carena o del volumen sumergido.

R es la fuerza de la reacción del fondo.

Si el buque está embarrancado sobre una sección de su eslora, el centro de la reacción del fondo se puede calcular con la suma de momentos en relación con el punto LCG (posición longitudinal del centro de gravedad):

$$Bd_1 = Rd_2$$

$$d_2 = \frac{Bd_1}{R}$$

d_1 =distancia de LCG a LCB

d_2 =distancia LCG al centro de la reacción del fondo

LCG se saca a partir de LCB. LCB (posición longitudinal del centro de carena) se saca de las tablas o curvas hidrostáticas si se conocen los calados previos al embarrancamiento. Si el barco tenía asiento antes de embarrancar, hay que aplicar una corrección al LCB de las tablas:

$$BB_1 = \frac{BM_L(t)}{L} \quad \text{donde:}$$

BB₁=movimiento de LCB debido al asiento

BM_L=radio del metacentro longitudinal

t=asiento

L=eslora entre perpendiculares

Con el LCG antes de embarrancar establecido, los cambios de posición del mismo se pueden determinar igualmente.

El LCB embarrancado se saca de las curvas hidrostáticas con los nuevos calados del buque embarrancado, y se corrigen por asiento.

Si no se dispone de datos hidrostáticos del buque pero se puede estimar el LCF (posición longitudinal del centro de flotación) y MTI (momento para asentar 1 pulgada), entonces se puede asumir que el buque rotar respecto a LCF (LCF sustituye a LCG).

La distribución de esa reacción del fondo depende de muchas variables, y solo puede calcularse aproximadamente. Suponiendo el buque apoyado en un solo punto, la unidad de la reacción del fondo en cualquier punto (r) es la reacción total R entre la eslora en contacto con el fondo:

$$r = \frac{R}{l_g}$$

En una orilla inclinada, el buque recibirá más presión donde tiene menos agua, o sea, en el punto de contacto más a proa (P_{max}), y esta irá descendiendo hasta 0 en el punto donde la eslora deja de tener contacto con el fondo. Se forma así un triángulo recto con altura la P_{max}.

$$P_{max} = \frac{2R}{l_g b_{avg}} \quad \text{donde:}$$

P_{max}=presión del suelo máxima (ton. largas/pies²)

R=reacción del fondo en ton. larga

l_g=longitud de eslora embarrancada en pies

b_{avg}=manga media del área de contacto

La unidad de reacción del fondo en un punto cualquiera es entonces la presión del fondo en ese punto (P_r) a lo largo del lado del triángulo, por la manga del área de contacto (b) en pies:

$$r = P_r \times b$$

Cuando el buque tiene el centro de la fuerza de reacción desplazada de la línea central, experimenta una disminución de la flotación y un momento escorante que si está libre de moverse, ocasionará una escora. Esta se puede calcular sumando los momentos en el punto efectivo del embarrancamiento:

$$R_s = B \times t = W \times GZ = W \times GM_{\text{eff}} \times \text{sen} \theta \quad \text{donde:}$$

R=reacción del fondo

s=distancia desde línea central al punto efectivo de fuerza reacción

B=flotabilidad (W-R)

t=distancia lateral del centro de reacción al centro de flotación

W=peso bruto del buque (despl. antes de embarrancar+cambios de pesos después)

GZ= brazo adrizante, sacado de curvas de estabilidad

GM_{eff} =altura metacéntrica embarrancado, corregido por superficies libres e incremento en altura de G

θ =ángulo de escora

Determinación del punto neutro

Cuando se pone un peso en un punto distinto del LCF en un buque embarrancado, hay otro punto en la parte opuesta del LCF, donde los cambios de calado por trimado y hundimiento son iguales. Aplicando este principio, donde un peso puede añadirse o retirarse sin cambiar la reacción del fondo, se puede definir el punto neutro (NP).

$$d_n = \frac{(MT1)(L)}{(PTI)(d_R)}$$

Así, lo mismo que un peso añadido a popa del punto de rotación P incrementará el calado a popa y reducirá la reacción del fondo a proa, lo mismo ocurre con un peso añadido a popa del punto neutro, y a la inversa si lo que se hace es retirarlo.

Calculo de calados a Proa-Popa y de la reacción del fondo al cambiar un peso de posición

Todo se resume en la formula:

$W = B + R$ esto es, peso es igual a la flotación mas la reacción del fondo.

En el buque embarrancado en toda su eslora, no puede ganar flotabilidad con más calado o trimado, ya que el fondo se lo impide. Debe haber un aligeramiento de peso que se iguale con la reacción, para ganar flotabilidad (suponiendo que fondo y buque son rígidos, lo que no es verdad).

Para un buque que se asienta sobre una parte del casco, no puede aumentar el calado en ese punto P donde se produce la reacción del fondo, solo puede rotar alrededor de él dependiendo de cómo y donde se distribuya el peso:

Añadiendo peso a proa se aumenta calado a popa y reduce a proa donde rota el buque. Si la disminución de calados proa-popa es mayor que el aumento de calado paralelo, se gana flotación y la reacción a proa disminuye. Más a proa puede ocurrir lo inverso, o puede pasar que el peso no produzca resultado alguno, el cambio de peso es igual al cambio en la reacción.

Los cambios de los calados a proa o popa se pueden calcular relacionando el cambio de flotación con el correspondiente en el calado medio:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta B}{TPI}$$

$$\Delta T_a = \Delta T_m \frac{d_a + d_r}{d_r}$$

$$\Delta T_r = \Delta T_m \frac{d_f}{d_r} \quad \text{donde:}$$

ΔB =cambio de flotabilidad ($w - \Delta R$)

ΔT_r =cambio calado proa

ΔT_a =cambio calado popa

ΔT_m =cambio calado medio

d_f =distancia centro de reacción del fondo a perpendicular de proa

d_r =distancia LCF a punto de rotación P (reacción del fondo)

d_a =distancia LCF a la perpendicular de popa

Y los cambios en la reacción del fondo:

$$\Delta R = w \frac{d}{d_m} \quad \text{donde:}$$

w =peso añadido o retirado

d =distancia del peso añadido o retirado al punto neutro

d_m =distancia del punto neutro al centro de la reacción del fondo ($d_r + d_n$)

En resumen:

-Los pesos añadidos o retirados en el punto de pivote (centro de la reacción del fondo) causan un cambio en la propia fuerza de reacción sin alterar la flotabilidad.

-Los pesos añadidos o retirados en el punto neutro producen un cambio en la flotabilidad igual al peso añadido o retirado, sin cambio en la fuerza de reacción.

-El cambio en la fuerza de reacción varía linealmente desde 0% en el punto neutro hasta 100% en el punto de reacción.

Aparejos de salvamento:

Son una combinación de dispositivos mecánicos que trabajando coordinadamente aplican una fuerza controlada, esencialmente una horizontal, para mantener al buque en su posición contra la acción del mar o vencer las fuerzas que lo mantienen encallado.

Pueden utilizarse aparejos montados en tierra, en una embarcación de salvamento o preferiblemente en la nave siniestrada. Constan de una o varias anclas, cadena, cable, pastecas y una maquinilla para virar.

La longitud mínima que ha de tener la línea de fondeo para tener una fuerza de retención máxima está determinada por:

- Profundidad a la que se disponen las anclas.
- Profundidad esperada de enterramiento del ancla.
- Altura de la cubierta del barco por encima del agua.
- Fuerza necesaria para establecer el ancla.
- Distancia que el buque debe moverse para flotar libre.
- Longitud de cable necesario en cubierta.

Esta longitud mínima se calcula sumando:

- (1) La altura de la cubierta sobre la que la maquinilla está montada. Si hay dispuesta una boya en el extremo del barco embarrancado esta altura se omite. Estas boyas se disponen para ejercer una fuerza casi horizontal sobre el buque en lugares con mucho fondo. Además reduce la fuerza dinámica ejercida por el mar sobre la línea.
- (2) Profundidad del ancla
- (3) Enterramiento del ancla. Se puede tabular dependiendo del fondo:
 - a. 0 pies para fondos de arena firme, arcilla, coral o roca.
 - b. 5 pies para fondos de arena o arcilla de densidad media.
 - c. 10 pies para fondos de fango suave.

Con ello se determina la profundidad del ancla. Entrando en la tabla de debajo con esta profundidad e interpolando con el número de eslabones de cadena enganchados al ancla, se obtiene la longitud básica de la línea.

A esta longitud básica hay que sumar la distancia que el buque debe desplazarse para flotar libre y la longitud de cable necesario en cubierta para obtener la longitud mínima. La longitud total de la línea de fondeo que se disponga debe tener igual o mayor longitud que esta longitud mínima. En el esquema inferior se hace un resumen de las distancias para determinar la longitud total.

El Ancla:

Para que el ancla, que es el elemento clave de este sistema, ejerza su poder de retención máximo, su caña debe trabajar paralela al fondo cuando se aplica la fuerza máxima. Un ligero desvío reduce esta capacidad de manera notable: un ángulo de 6° reducirá esta capacidad en un 15%, 12° lo hará en un 38%, y 20° en un 50%.

Un ancla se resiste el movimiento horizontal en parte por la resistencia creada por la superficie de las uñas, y en parte también por la tendencia a hundirse cuando se la aplica tensión debido al ángulo que presentan estas uñas. La mayoría de anclas se construyen con brazos abatibles con un ángulo de 50°, que es el más adecuado para fondos suaves. Para fondos más duros el ángulo óptimo varía entre 25°-35°. Se pueden soldar cuñas o placas y reducir este ángulo (ángulo de presa) de un ancla estándar.

Diferentes tipos de anclas usadas en salvamento y comparación de sus capacidades: Las anclas tipo NAVMOOR y STATO son sin duda las de más alto rendimiento, y pueden ser de menor peso para realizar el mismo trabajo. La única prevención que se puede tener para no utilizarlas en un salvamento radica en el hecho de que pueden ser dañadas más fácilmente por el maltrato o explosiones submarinas que anclas más simples como las Eells y Stockless.

La longitud de cable y el peso del grillete de cadena enganchado al ancla, proporcionan el peso necesario para que esta trabaje paralela al fondo.

Cuando la pendiente del fondo aumenta a medida que se aleja del buque embarrancado, se puede añadir más longitud de cadena o un peso para mantener al ancla trabajando paralela al fondo. En fondos suaves de fango y arcilla ligera y utilizando un ancla que quizá no se la más adecuada, como aquellas con una cruz

muy pesada, posición del eje brazo-caña muy retrasado o pestañas de inclinación de pequeño tamaño, esta puede deslizarse por el fondo sin hacerse firme, en especial si ha caído con las uñas hacia arriba. Una forma de remediarlo es arriarla en “posición abierta” virando desde el buque que la fondea, y manteniéndola firme con una línea desde otro bote de apoyo.

Esto mismo puede pasar a estas anclas en fondos duros, donde las uñas son incapaces de hundirse en el terreno. Su eficacia puede incrementarse afilando las puntas de las uñas, soldando barbas a las pestañas de inclinación y reduciendo el ángulo de presa. La capacidad de un ancla puede incrementarse:

- Adosando o alargado los cepos. Proveen estabilidad rotacional al impedir a un ancla ponerse de lado.
- Prestableciendo y asegurando cepos abatibles en posición.
- Afilando las uñas y puliendo la superficie de los brazos.
- Añadiendo barbas a las pestañas de inclinación. Ayudan a las uñas a abrirse y enterrarse en el fondo.
- Fijando las uñas en el ángulo adecuado al fondo.
- Posicionándola con la orientación correcta, en vez de simplemente largándola.
- Añadiendo más cadena a la línea de fondeo o conjuntando dos anclas.

El poder de retención de las anclas también puede incrementarse disponiéndolas en paralelo o en tandem.

Las anclas en paralelo se unen con un largo de cadena a una placa base. Una de ellas debe ser más larga que la otra por lo menos 4 veces el largo de las uñas para evitar que se entorpezcan. Cada ancla actúa independientemente y la capacidad del conjunto se incrementa un 15-20% respecto a la suma de las anclas trabajando separadamente.

Dos anclas en serie o tandem son capaces de desarrollar más del doble de capacidad de retención que una sola ancla. El ancla secundaria es empujada por en camino abierto por el ancla primaria y es capaz de penetrar más profundamente en el fondo roto. Además, el peso de la primera ancla mantiene la fuerza de las anclas en tandem paralela y por debajo del fondo.

La disposición cruz-caña es la más convencional, pero el ancla primaria debe ser de suficiente resistencia pues todas las fuerzas pasar por su caña y enganche a la cadena. Anclas sin la suficiente resistencia o estabilidad para enterrarse, pueden disponerse mediante la unión caña-caña. La estabilidad del ancla primaria no se ve afectada y la capacidad de retención del conjunto es igual a la suma de capacidades de las anclas individualmente.

4.4 Reflotado de una nave embarrancada

Siempre hay urgencia en salvar un buque embarrancado. No importa lo segura que parezca su posición, siempre se encuentra en una situación precaria. Pero la presión por liberarlo no debe subordinar al buen juicio. El objetivo final es el salvamento de las vidas, el barco, la carga y evitar la contaminación. Es una operación conjunta entre la tripulación que es experta en el barco y los salvadores, que son expertos en la operación de salvamento.

La operación de reflotamiento de un buque embarrancado tiene 3 fases:

- Estabilización. Donde se toman medidas dirigidas a prevenir posteriores daños y que el barco encalle aún más o se atraviese. Durante esta fase la información para el desarrollo del plan de salvamento se recopila y plan de salvamento se prepara.

- Reflotado. Donde el plan de salvamento se ejecuta y el barco es liberado.
- Post-Reflotado. Donde el barco es asegurado y preparado para su entrega.

Fase de estabilización. Una vez pasado el peligro inmediato de accidente, se debe solicitar ayuda inmediatamente y hacer un reconocimiento exhaustivo del barco, en especial de las zonas inundables de la parte siniestrada.

El Capitán no debe:

- Largar por la borda carga en un intento de aligerar el barco para liberarse dando maquina atrás. Esto generalmente resulta en el empuje del barco aligerado más tierra adentro. Si se desplazan pesos en la parte baja podría ascender el centro de gravedad.
- Intentar dar atrás si el casco está abierto. El barco podría hundirse si no está en condiciones de navegar o la entrada de agua lo inestabiliza.
- No tomar acciones para estabilizar el barco o determinar su condición.

La maquinaria debe ser preservada en fondos donde puedan obstruir las tomas de mar. Se debe cambiar a las tomas más altas o parar la maquinaria.

Cuando un buque embarranca queda una lamina de agua atrapada entre el casco y el fondo, que se va disipando conforme pasa el tiempo, dependiendo del tipo de fondo, en fondos duros como roca más rápido que en otros más cohesivos como fango. En cualquier caso, el coeficiente de fricción permanece constante durante un día o dos. Como la fricción aumenta lentamente con el tiempo, hay alguna justificación en intentar un rescate inmediato si no hay daños en el buque, hay suficiente agua hacia el lado de la mar, y hay a disposición suficientes medios para liberarlo y mantenerlo bajo control una vez liberado, evitando su nuevo embarrancamiento quizá en peores condiciones.

Si se ha embarrancado en fondo de arena o similar, se debe hacer un breve intento dando máquina atrás toda en la siguiente marea alta. Pero si no resulta o se tienen dudas de su control una vez libre del embarrancamiento, es mejor que lastre todos sus tanques y largue sus anclas mientras espera ayuda. Remolcadores llegados al lugar de la escena pueden ayudar a mantener el buque en la orientación original, impidiendo que se atravesie, pero la mejor forma es estableciendo una línea de tiro desde el barco.

El barco deberá suministrar cuanta información le sea solicitada por las distintas autoridades. Además, una avanzada de técnicos experimentados suele ser enviada al lugar del siniestro para realizar una primera evaluación, apoyar y supervisar las operaciones de asegurado y preparación del salvamento.

En esta primera evaluación, los técnicos de salvamento deben preparar una recomendación en cuanto a si se debe o no realizar el salvamento pero teniendo en cuenta que la decisión final la hará una autoridad superior que puede estar influenciada por consideraciones políticas o económicas.

Se elabora una evaluación posterior con los datos reunidos que incluye:

- Confirma las estimaciones originales en cuanto a reacción del fondo y fuerza necesaria para liberarlo.
- Evaluación de los daños para determinar la estabilidad a flote y resistencia residual.
- Evaluación de la condición de la máquina del buque y la asistencia en el lugar para determinar la fuerza necesaria para liberarlo.
- Evaluación de la capacidad del barco para llegar a un puerto seguro una vez liberado.

Cuando se ha reunido todo el equipo y llega al lugar del accidente, realizan un estudio del salvamento y una serie de acciones que se pueden dividir entre control de daños y estabilización.

Fase de reflotado. Mantener bajo control al barco accidentado es la clave para el salvamento. Tres maneras en las que el buque se puede mantener bajo control durante la operación de reflotado son las siguientes:

-Impidiendo que zozobre manteniendo en contacto uno de sus extremos con el fondo mientras el otro es reflotado

-Incrementando la manga efectiva de la línea de flotación adosando pontones, gabarras o embarcaciones ligeras a los costados

-Aplicando fuerza con sistemas de tiro para contrarrestar las fuerzas escorantes

Métodos a utilizar para liberarlo:

-Moviéndolo a aguas más profundas

-Aumentado el calado alrededor del buque

-Aligerándolo para reducir el calado en la parte afectada. Descargándolo, mediante corrimiento de pesos, izado con grúas flotantes, etc.

En la práctica, se suele realizar una combinación de métodos. Para vencer la fricción del fondo, se puede reducir el área de contacto, hacer palanca del buque embarrancado lateralmente, mover pesos de un costado a otro para permitir la entrada de una película que venza la cohesión, producir vibración con la máquina propio o con aparatos especiales, inyectar agua a presión, pasar una tubería perforada por debajo del casco conectada a un compresor de aire fluidificando así el fondo, en buques muy finos encallados de proa suele dar resultados el incrementar la reacción a proa, introducir tubos de drenaje en el fondo en contacto con el casco que permita el flujo de agua entre casco-fondo, o elevar la porción de casco atrapada y poner debajo deslizaderos que permitan una menor fricción.

La fricción dinámica, que es siempre menor que la estática, se puede reducir produciendo oleaje mediante embarcaciones alrededor del buque, o con soportes hidráulicos que reducen el área de fricción y pivotan cuando el barco se mueve.

Remolcadores o aparejos en tierra, gabarras, o el propio buque suelen ejercer la fuerza para liberar el buque, mantenerlo en posición o girarlo.

El propio remolcador puede limpiar la zona debajo del buque siniestrado apoyado lo suficiente y con la popa hacia el área de sedimentos.

Este material también puede ser limpiado con chorro de agua. Es útil en zonas de corrientes donde es complicado depositar el material retirado.

O mediante dragado manual o mecánico. Se puede dragar directamente a popa para hacer un canal hasta aguas profundas, o directamente debajo del casco mediante la succión creada por dragas mecánicas. En ocasiones se pueden dragar canales debajo del buque. Los sedimentos se depositarán bajo el casco en estas aberturas incrementando el calado. Cuando el sedimento es muy denso para que fluya de esta manera, se puede construir un canal paralelo al buque de forma que escore hacia ese canal. Si está en seco, se puede hacer una camada con sedimentos de forma parecida a como estaría en dique. Después se hace un canal hacia el mar y el agua entrante se encarga de destruir esos soportes y liberarlo.

Uno de los factores principales a la hora de liberar un barco embarrancado es la dirección de su reflotado. En un barco embarrancado más o menos perpendicularmente a la costa y que no ha cambiado significativamente su demora, lo mejor es tirar de él con rumbo contrario con el que embarrancó, y cuando existen ambas opciones, mejor de popa para resguardar su timón y hélice. Si está atravesado habrá que girarlo hasta la dirección en la que embarrancó. Hay que tener presente que para revirarlo se necesita 1/3 de la fuerza necesaria para liberarlo.

Remolcadores y aparejos para virar anclas son los principales elementos en una operación de este tipo. Los remolcadores son sin duda lo más efectivo.

Sus líneas de remolque deben hacerse firmes a bordo del buque siniestrado en algún lugar disponible, generalmente las bitas, mediante ochos, y si es posible, afirmada a una segunda bita con alambre o cadena. Puede soldarse una placa de acero entre las bitas para evitar que el alambre salte durante la operación.

En caso de haber varios remolcadores trabajando al unísono, las tiras de remolque deben ser todas de la misma longitud para evitar que se enganchen con las de otro remolcador en el caso de que lleguen a juntarse.

Por el mismo motivo la tira de un remolcador debe ser mayor que la del ancla fondeada en el caso de que se planee virarla con un aparejo montado en el barco.

En zonas restringidas se puede trabajar con dos remolcadores en tandem siempre que no se sobrepase la carga de trabajo del cable de remolque.

Uno de los trabajos principales de los remolcadores es en el revirado. Esto ayuda a romper la fricción del fondo y a orientar al buque para su liberación. Uno o varios remolcadores realizan un arco mientras tiran. Si las circunstancias lo permiten, este arco debe ser de por lo menos 60°. Cuando el buque comience a moverse, deberán dejar de revirar y tirarán de él en la dirección planeada. Remolcadores y aparejos con anclas pueden trabajar en coordinación para producir un par que revire el barco.

Los aparejos de fondeo para salvamento son engorrosos de preparar, ya que requieren el establecimiento del conjunto ancla-cadena-alambre-boyas por parte del remolcador y hacerlo firme a bordo del buque siniestrado.

Es un procedimiento complementario a utilizar para mantener al buque perpendicular a tierra o ayudar a revirarlo. Deben mantenerse tensos cuando se aplica la máxima fuerza de liberación y aflojados cuando el buque comienza a moverse.

La fuerza efectiva de la línea depende del ángulo que presente con respecto a la dirección planeada de reflotamiento:

$$\text{Fuerza efectiva} = \text{Fuerza media del aparejo} \times \cos \theta$$

Así para un aparejo con una fuerza de tiro estándar de 50 toneladas y desviado 20° con respecto a la dirección de reflotamiento, esta fuerza se reduce a 47 toneladas.

Cuando llega el momento de intentar liberar el buque, la fuerza debe ir incrementándose lentamente y debe ser mantenida hasta que se lo libere o sea obvio que no lo hará. La potencia máxima se alcanzará 2 horas antes de la marea alta, y debe ser mantenida hasta que el nivel de la misma baje. Tensiometros instalados en las líneas del remolcador y a bordo del buque permiten controlar que se ejerce la máxima tensión. Una caída brusca de la tensión en la línea de un aparejo a un ancla indica claramente que ha garreado, y debe ser establecida de nuevo.

Fase Post-reflotado. Una vez liberado y a flote, el buque puede liberarse de su cable de virado al ancla y su remolque y mantenerse bajo control si su propulsión y timón no están afectados. En caso contrario será remolcado. Mientras tanto, su estado es evaluado y se toma una decisión respecto a él. Se deberá investigar posibles daños ocurridos durante la operación de salvamento o que estaban escondidos por la posición del buque. Las distintas opciones son:

- Navegar hasta puerto por sus medios, acompañado o no por un remolcador.
- Ser remolcado hasta puerto.
- Ser fondeado para realizar reparaciones o preparativos para el remolque.
- Varado si existe riesgo de hundimiento.
- Barrenado o hundido en otro lugar.

Si el buque ha de vararse, se habrá elegido con antelación un lugar y unos alrededores libres de rocas y obstrucciones, con una suave pendiente y corrientes y oleaje débiles. En preparación al varado, se debe trimar el buque convenientemente para que su asiento sea mayor que la pendiente del terreno. De esta manera la parte en dirección al mar tocará el fondo primero, y el resto del casco se asentará dócilmente. De esta manera se evitará perder la perpendicularidad con la orilla. La hora debe establecerse con la marea bajante justo antes de la marea baja, así con marea alta será más fácil su reflotado. Salvo que se quiera exponer los costados del buque para reparaciones, en cuyo caso se puede varar con la marea alta. Se varará de pro o popa, dependiendo de la situación, y se largarán las anclas en dirección al mar lascando cadena mientras se aproxima a la playa. Líneas con aparejos a anclas o muertos a tierra ayudarán a mantener el buque en posición y un reflotado controlado.

4.5 Estabilidad de la Nave hundida

Un buque hundido reflota antes de haber recuperado toda la flotabilidad perdida antes de su hundimiento. El agua retenida a bordo genera superficies libres y problemas de estabilidad, escora y esfuerzos local o totalmente. Salvar un buque requiere no solamente generar suficiente empuje para reflotarlo, sino distribuir esa flotabilidad para mantener una estabilidad, trimado y resistencia estructural.

La estabilidad de un buque total o parcialmente hundido depende grandemente de cómo se asiente sobre el fondo. La reacción del fondo R tiene dos efectos sobre el buque siniestrado:

- Asciende el centro de gravedad G
- Cambia la altura metacéntrica GM

-Ascenso del centro de Gravedad. Es un cambio virtual porque la distribución de pesos es la misma, pero el buque actúa como si el centro de gravedad tuviera una nueva localización. Se calcula aplicando la fórmula:

$$KG_1 = \frac{(KG \times W)}{(W - R)} \quad \text{donde:}$$

KG=altura del centro de gravedad sobre la quilla original

KG₁=altura del centro de gravedad sobre la quilla nueva

W=peso del buque

R=reacción del fondo

Igualmente puede calcular mediante la fórmula:

$$GG_1 = \frac{(KG \times R)}{(W - R)} \quad \text{donde:}$$

GG₁=ascenso de la altura del centro de gravedad.

-Cambio de la altura metacéntrica. Debido a que el volumen sumergido ha variado, hay una nueva posición del metacentro. La nueva altura del metacentro sobre la quilla (KM) se puede obtener de la curva de formas entrando con el nuevo calado medio del buque embarrancado. La nueva altura metacéntrica del buque sumergido es:

$$GM=KM-KG$$

Un buque con una altura metacéntrica negativa adoptará una escora, que estará solo aminorada por la acción del fondo o el adoptar una nueva posición en que sea de nuevo estable. Pero si ha embarrancado en una cresta o si sus formas son muy afiladas y está atrapado solo por la proa, entonces existe en riesgo de zozobra. Con riesgo de zozobra se debe tener especial cuidado en bajar el centro de gravedad lo máximo posible moviendo pesos y no crear superficies libres.

Un buque sumergido se divide en 4 categorías atendiendo a la estabilidad:

- Completamente sumergido
- Parcialmente sumergido con una parte considerable de su estructura estanca por encima de la superficie
- Parcialmente soportado por su flotabilidad
- Achicado con coferdam o encofrado

Buque completamente sumergido:

Cuando un buque está totalmente hundido no tiene radio Metacéntrico porque no hay plano de flotación. La estabilidad longitudinal y transversal depende únicamente de las posiciones relativas de los centros de gravedad y flotación. Un buque libre de influencias externas asume el asiento y escora de manera que el centro de gravedad (G) y flotación o carena (B) están en línea recta. La distancia vertical entre G y B (después de tomados en cuenta los efectos de las superficies libres) es la estabilidad de un barco hundido.

- Si G está por debajo de B el buque es estable
- Si G está por encima de B el buque no es estable
- Si G coincide con B el buque tiene estabilidad neutra

Mientras esté en un fondo más o menos plano no hay peligro de zozobra, pero se ha estudiar su estabilidad cuando empieza a adquirir flotabilidad.

Si el buque hundido tiene una superficie libre y escora, una cuña de flotabilidad H_0H_1 se transfiere de un costado a otro F_0F_1 , y se produce un cambio en el centro de flotación de B_0 a B_1 . Un metacentro M_0 sumergido se origina, que se puede definir en relación con el plano y centro de flotación inicial FH y B_0 :

$$B_0M_0 = \frac{I_0}{\nabla} \quad \begin{array}{l} I_0 = \text{momento de inercia de la flotación interna }_{FH} \\ \nabla = \text{volumen desplazado o flotabilidad} \end{array}$$

Esto puede crear un par adrizante o escorante.

Si el buque tiene un mamparo estanco NN como en la figura de abajo, se previene la formación de la cuñas HOH_1 y FOF_1 y se origina unas nuevas (DED_1 a FEF_2 y $SO'H$ a $DO'R$). El radio metacéntrico ya no se basa en el momento de inercia del plano de flotación FH sino en la suma de los momentos de inercia FD y DH. Si la

superficie FD es pequeña en comparación con FH, O y O' se pueden tomar como equivalentes, y el momento de inercia combinado resulta:

$$I = I_0 - Ad^2 \quad \text{donde:}$$

A = área de la superficie FD

d = distancia del centro de la superficie FD al plano EO

Cuando el buque con una importante superficie libre empieza a aparecer en la superficie del agua, se crean dos líneas de flotación, una interna LL₁ y otra externa FF₁. El volumen de FF₁LL₁ es igual al volumen desplazado. Si el buque se escora, se crea una nueva línea de flotación externa HH₁ e interna SS₁. Se puede definir entonces un metacentro sumergido M₀ y uno emergido M₁.

En la figura de arriba se ve como el centro de flotación con respecto a la línea externa de flotación (WL) pasa de B₀ a B₁, mientras que con respecto a la línea interna de flotación (SS₁) pasa de B₀ a B₂. El efecto compensatorio lo deja en la posición B₃. Lo mismo ocurre con el metacentro, quedando en la posición final M₂.

El radio metacéntrico final es:

$$B_0M_2 = B_0M_0 - B_0M_1 \quad \text{donde:}$$

$$B_0M_0 = \frac{I_{LL1}}{\nabla} \quad \begin{array}{l} I_{LL1} = \text{momento de inercia de la flotación interna } LL_1 \\ \nabla = \text{volumen desplazado o flotabilidad} \end{array}$$

$$B_0M_1 = \frac{I_{FF1}}{\nabla} \quad \begin{array}{l} I_{FF1} = \text{momento de inercia de la flotación externa } FF_1 \\ \nabla = \text{volumen desplazado o flotabilidad} \end{array}$$

Para que un buque sea estable, el centro de gravedad del buque debe quedar por debajo de M₂. Los buques reflatados quilla arriba no deben sobresalir del agua demasiado, especialmente cuando existen superficies libres (como suele ser el caso usando el achique con aire a presión), ya que incrementando el francobordo solo se consigue descender el centro de flotación y que el barco se vuelva inestable.

El objetivo del rescatador es hacer coincidir en centro de flotación y gravedad en línea vertical con el primero por encima del segundo, cosa que casi nunca ocurre en un buque hundido. Suele haber una separación longitudinal. La flotación de un buque hundido depende de la suma de pequeñas flotaciones repartidas a lo largo del buque, y no simplemente el centro de su volumen sumergido. El centro de flotación, como el de gravedad, se calcula dividiendo la suma de los momentos de flotación individuales entre la flotación total. Las fuerzas externas de cables o eslingas cuando se iza un barco se tratan como fuerzas verticales en esos puntos. Una vez calculados los centros de flotación y gravedad, la posición del buque cuando se libera del fondo se calcula por trigonometría.

$$\text{Angulo de trimado } \alpha = \tan^{-1} \frac{BG_L}{BG_V}$$

BG_L BG_L =separación longitudinal centro flotación-gravedad
 BG_V BG_V =separación vertical centro flotación-gravedad

$$\text{Angulo de escora } \theta = \tan^{-1} \frac{BG_T}{BG_V}$$

BG_T BG_T =separación transversal centro flotación-gravedad
 BG_V BG_V =separación vertical centro flotación-gravedad

Para determinar la respuesta del buque a las fuerzas externas, se puede construir la curva del brazo adrizante o GZ. $GZ = BG_V \times \tan\theta$

La misma relación se usa para construir las curvas de estabilidad transversal y longitudinal. Si existen superficies libres, el BG efectivo o virtual se utiliza.

En buques sumergidos, la separación BG y su momento de inercia suele ser mayor en el plano transversal que el longitudinal, porque la mayoría de los tanques y bodegas son más largas que anchas. Las superficies libres, por tanto, son más perjudiciales en la estabilidad longitudinal que la transversal.

La máxima inclinación que un buque puede alcanzar está en relación entre su eslora y profundidad. Viene dada por la fórmula:

$$\text{Sen}\alpha = \frac{D}{L}$$

D D =profundidad
 L L =eslora

En la práctica, y como la mayoría de los buque reflatados lo son desde profundidades menores que su eslora, la inclinación se limita cuando uno de sus extremos toca el fondo, y se mantiene con una parte por flotación y la otra por contacto con el fondo. El máximo trimado se debe mantener por debajo de los 15°.

Buque con parte considerable de su estructura estanca por encima del agua:

Si el buque tiene una pequeña parte de su estructura fuera del agua, un radio metacéntrico (BM) se puede calcular del momento de inercia del plano de flotación parcial. Este será pequeño debido al gran área sumergida, y será positivo, negativo o neutro dependiendo de la localización del centro de gravedad. A medida que la flotación se recupera, aumenta el área de flotación y por tanto su momento de inercia. Su volumen sumergido disminuye. El resultado es que el radio metacéntrico aumenta y el buque se vuelve más estable. La estabilidad final dependerá no obstante de la posición del centro de gravedad y las superficies libres en los espacios parcialmente inundados.

Si el buque tiene gran parte de su cubierta fuera del agua, el radio metacéntrico (BM) crece igualmente a medida que el buque es reflatado, porque el momento de inercia del plano de flotación permanece constante a medida que el calado disminuye, mientras el desplazamiento disminuye. Si su centro de flotación B estaba por encima del de gravedad G, este primero va moviéndose por el casco, sobrepasa G hasta llegar a B₁. Hasta que B no está debajo de G, la estabilidad depende solamente de la distancia BG, el metacentro no tiene relevancia. Si una altura metacéntrica (GM) positiva considerable se ha creado en el momento que B

sobrepasa a G, el buque permanece en una posición estable durante el reflotamiento. Sin embargo, si esta es 0 o tiene valor negativo, se pierde la estabilidad y se genera una escora.

Las superficies libres pueden contrarrestar el GM aunque este sea positivo, haciendo necesario el corrimiento de cargas o aplicar fuerzas externas para estabilizarlo.

Buque parcialmente soportado por su flotabilidad:

Con un extremo apoyado sobre el fondo y el otro se mantiene a flote. Su flotabilidad total es el volumen sumergido más el volumen de sus facilidades fuera del agua, multiplicado por la densidad del agua. Su peso total es su desplazamiento antes de embarrancar más el peso de agua embarcada. Por el método de pérdida de flotabilidad, el peso permanece igual al desplazamiento antes de embarrancar, mientras que la flotabilidad es proporcional al volumen de la estructura sumergida, carga, provisiones, etc. El total de la flotabilidad perdida es igual al peso del volumen de agua embarcado.

Sumando los momentos sobre su centro de gravedad, la reacción de fondo se obtiene según la formula:

$$R = \frac{B(BG_H)}{RG_H} \quad \text{donde:}$$

R=reacción del fondo

B=total flotación

BG_H=separación horizontal entre B y G (LCG-LCB)×senα

RG_H=separación horizontal entre R y G (L-LCG)×senα

α=ángulo de inclinación

Un buque en esta posición está siempre en una situación precaria. Puede ser afectado por corrientes, viento u olas. Las fuerzas laterales pueden hacerlo moverse lateralmente o pivotar sobre su parte sumergida. La parte emergida debe ser asegurada con pontones, embarcaciones ligeras o grúas flotantes, y si es necesario, se debe ventear parte del aire atrapado para asentararlo en una posición más estable, aún a riesgo de general más esfuerzo a la hora de levantarlo.

Buque achicado con coferdam o encofrado:

Un buque con la cubierta debajo del agua que es reflotado por este método, con un coferdam a lo largo de su eslora, muestra en principio unas características en cuanto a estabilidad similares a los de un barco con la cubierta inicialmente fuera del agua. El área del plano de agua y el momento de inercia del coferdam son aproximadamente tan grandes como los del barco, aunque el volumen varia mucho desde el momento que está sumergido al que flota. El coferdam es un objeto grande, pesado, que sube el centro de gravedad y reduce la altura metacéntrica.

Un buque rescatado con un coferdam parcial se puede considerar igual que uno con una flotación parcial. A medida que el buque reflota, su radio metacéntrico está definido por el pequeño plano de flotación del coferdam. El área de un coferdam parcial es generalmente menor que el lugar en que se ha emplazado. Cuando el agua en su interior se ha bombeado por debajo de la cubierta superior, el área de la superficie libre es mayor que el área de flotación (delimitado por el área del

coferdam). El momento de inercia de la superficie libre (i) es mayor que el de la flotación (I) y su altura metacéntrica resultante será negativa:

$$BM = \frac{I-i}{\nabla} \quad \text{donde:}$$

I=momento de inercia del plano de flotación

i=momento de inercia de la superficie libre

∇ =desplazamiento

Y a menos que KG sea mayor que KB, el GM será también negativo. Si hay comunicación a lo largo del casco con otros compartimentos, el efecto de las superficies libres se acumula.

Cuando la cubierta principal sale a la superficie el plano de flotación aumenta, y dependiendo de los tamaños relativos de el plano de flotación y los momentos de inercia de las superficies libres, GM puede resultar positiva o permanecer negativa hasta que se suprima bombeando todo el agua.

La flotabilidad aplicada a un buque se puede agrupar en 4 tipos:

- Flotabilidad fija sin superficies libres
- Flotabilidad fija con superficies libres
- Flotabilidad variable con superficies libres
- Flotabilidad variable sin superficies libres

Flotabilidad fija sin superficies libres:

Ocurre cuando se utilizan las siguientes técnicas:

- Compartimentos achicados completamente en el fondo con aire a presión.
- Espacios o tanques completamente secos capaces de soportar la presión ambiental (por ejemplo submarinos).
- Bloques sólido de material con poder de flotación (por ejemplo espumas).
- Globos o bolsas de aire, pontones, etc.

La flotabilidad permanece constante y estacionaria relativa al barco. Pontones atados por el buque a salvar proporciona flotabilidad constante hasta llegar a la superficie, cuando el volumen de la porción que emerge no proporciona flotación. Se utilizan pontones de esta manera para constreñir su ascenso o mantenerlo a una profundidad específica.

Flotabilidad fija con superficies libres:

Existe en espacios parcialmente achicados no expuestos a la presión ambiente. La flotabilidad suministrada por objetos considerados como incompresibles (boyas, flotadores, determinado tipo de carga, etc) permanece constante mientras el buque asciende. A menos que estos objetos llenen completamente el espacio, existe una superficie libre, y el centro de flotación se moverá al mismo que estos objetos lo hagan.

Flotabilidad variable con superficies libres:

El aire comprimido en el interior del barco se expande a medida que asciende a la superficie. Causa ascenso rápido y probablemente incontrolado. Si estaba en aguas poco profundas no desarrollará una inclinación extrema. Pero si parte de aguas profundas puede ocurrir, y entonces el aire puede escapar por venteos en la parte baja del tanque, perdiendo flotabilidad y volviendo a hundirse.

Flotabilidad variable sin superficies libres:

Como cuando se hacen firmes pontones o embarcaciones en superficie al buque hundido mediante eslingas. Mantienen así el equilibrio respondiendo a los cambios de tensión hundiéndose y generando la flotabilidad correspondiente.

4.6 Reflotado de una Nave hundida

La recuperación de la flotabilidad es la operación más importante en toda operación de salvamento. Se pueden diferenciar el izado por métodos internos o externos. Entre los del primer método:

Achique con Bombas:

El bombeado del agua del interior suele ser el método más sencillo y efectivo, y el lento tiempo de reflotado da la posibilidad de tener un mayor control de la operación. Sin embargo se ha de estudiar cuidadosamente el o los espacios a achicar para mantener un Metacentro alto durante toda la secuencia y que no se produzcan corrimientos de cargas. Un buque que era estable antes del accidente lo será igualmente cuando se saque toda el agua (suponiendo que no se han movido cargas), pero puede no serlo a lo largo de la operación.

Se requiere parchear la aberturas. Para ello hay gran variedad de materiales, desde madera, fibra de vidrio, gomas y cemento hasta planchar soldadas o con pernos.

El soplado de aire en el interior es otra opción, para ello se requiere que el tanque o bodega sea estanca en su parte alta y costados, pero tener una abertura en su parte baja. De no ser así, habría que instalar una tubería de desagüe hasta el fondo atravesando la parte superior por donde escape en agua. Esto es especialmente atractivo cuando el acceso hasta el fondo para su parcheado es muy difícil o imposible, o cuando se quiere generar suficiente flotabilidad en un buque zozobrado o de costado para reflotarlo. Pero presenta algunas desventajas con respecto a achique con bombas:

-En general requiere un trabajo de parcheado y con buzos mucho mayor. El aire a presión escapa de 4 a 6 veces más rápido que el agua por un abertura. Cubiertas y escotillas deben reforzarse. El aire a presión ejerce su fuerza hacia arriba desde el interior, mientras que el barco está diseñado para soportar la presión desde debajo y fuera.

-Los compartimentos se pueden presurizar en exceso si no se controlan adecuadamente.

-Los buques rescatados por este método se liberan del fondo repentinamente y durante su ascenso, como el aire se expande, es muy difícil su control. Se organiza la distribución del aire al lugar correcto y en el orden establecido mediante manifolds.

-Debido a la incompresibilidad de los líquidos, a igual volumen, la capacidad de achique con un compresor es menor que el de una bomba.

En bodegas adyacentes, si una se achica y la otra permanece inundada, se crea una diferencia de presiones, mayor en la parte baja. Así, se ha de reforzar el

mamparo divisorio o limitar la altura de la bodega que se achica, para que pueda soportarlo.

En la práctica, se suelen utilizar ambos métodos conjuntamente. Es una técnica difícil, porque las dificultades de ambos métodos se suman:

- El compartimento debe estar estanco, teniendo cuidado con las tomas de descarga, líneas de corriente, hidráulicas, etc.
- La presión en cada compartimento debe controlarse para no presurizarlo en exceso.
- El flujo de aire debe acompasarse con el de descarga de agua por igual razón.
- Las aberturas deben parchearse doblemente, por dentro y por fuera, para soportar ambas presiones.

Se utiliza este método conjunto cuando se calcula que el tiempo y trabajo necesario en sellar el compartimento es menor que el empleado en vararlo y reforzar su estructura.

Achique por flotabilidad inducida:

Esto es, por medio de inyección de espumas, gránulos de poliuretano expandibles o esferas de goma presurizadas que desplazan su volumen de agua del interior de un espacio y están dotadas de una válvula de seguridad para su ascenso a la superficie. Actúan igual que un volumen de aire a presión y pueden cambiar desplazarse y cambiar el centro de flotación durante el ascenso.

La espuma está formada por pequeñas celdas llenas de gas. Tiene diversas ventajas:

- El equipo y la química es fácilmente transportable.
- Al expandirse tapona pequeños agujeros y aberturas.
- Crea flotabilidad sin producir superficies libres
- Las espumas rígidas aportan fortaleza al buque y se adhiere a las estructuras. Se requiere menos refuerzos que achicando con aire o agua.
- Aporta fuerza contra la fuerza compresiva.
- El centro de gravedad del sistema, es fijo y predecible. Lo mismo el centro de flotación mientras la espuma esté sumergida.
- El volumen y forma de la espuma no cambia con la presión cuando el buque asciende.
- Puede distribuirse selectivamente en grandes espacios, optimizando el trimado y la estabilidad.

Pero tiene también desventajas.

-Los químicos utilizados son tóxicos, inflamables y producen gases. Puede producir gases irritantes y tóxicos mientras se cura después de haberse achicado el agua del espacio. Y cuando se arranca se liberan de las celdas que lo forman gases fluorocarbonados que desplazan el oxígeno en espacios cerrados y además es perjudicial para la atmósfera.

-Es muy inflamable.

-Es caro.

-Se requiere personal entrenado junto a equipos de bombeo y control especiales.

-La reacción química que lo produce genera calor que puede llegar a la auto-ignición si se extiende en presencia de aire en capas gruesas que no pueden disipar el calor rápidamente. El calor puede prender otras sustancias inflamables e inducir reacciones químicas no deseadas.

-La espuma endurecida es difícil de retirar, especialmente de espacios abarrotados como las salas de máquinas.

-Los componentes de la espuma deben mantenerse a la temperatura adecuada para adecuarse a la temperatura de agua y aire ambientales, especialmente en ambientes fríos.

-Una masa de espuma en la parte alta de un espacio puede crear inestabilidad cuando el barco es reflotado.

Entre los métodos externos se encuentran:

Izado por flotación:

El acople de bolsas o depósitos de acero que se llenan de aire en el exterior o interior de la nave, requiere menos tiempo y material que los métodos de bombeado e inyección de aire, permite más control porque las distintas unidades acopladas se pueden sincronizar durante las fases de recuperación, y permiten mayor estabilidad transversal y longitudinal.

Los barcos hundidos a poca profundidad de tal forma que una parte asciende y se mantiene bajo control mientras la otra se estabiliza en contacto con el fondo, pueden izarse en un proceso de dos fases mediante bolsas o globos.

Cuando están a más profundidad y se intenta rescatarlos en un solo paso, suelen ascender a la superficie incontrolablemente a pesar de los esfuerzos del rescatador, con daño para el barco o las bolsas de aire. Un método más apropiado realizarlo por etapas. El barco es reflotado parcialmente hasta la superficie, y varado en un lugar con menos fondo y acondicionado de nuevo. El proceso es repetido hasta llegar a aguas poco profundas. Para ello las bolsas se atan en dos niveles, las centrales aportan la mayor parte de la flotación, mientras que la de los extremos, a menor profundidad, son las de control. La flotación total de las bolsas es ligeramente mayor que el peso de la nave, pero la de las bolsas centrales es ligeramente menor. Así pues, cuando las bolsas de los extremos rompen la superficie, se iguala la flotación total con el peso de la nave, y puede ser remolcada entre dos aguas hasta un lugar adecuado para vararla y reflotarla.

Izado mediante el uso de la marea:

Dos embarcaciones se fondean paralelamente a la nave a rescatar y se amarran con una separación igual a la manga del buque hundido. Se lastran en marea baja hasta su calado máximo y se pasan dos cables por debajo del naufragio a proa y popa, uno desde el lado interior de la primera embarcación al exterior de la segunda, y el otro cable de forma inversa. Cuando sube la marea y se deslastran las embarcaciones, la flotabilidad de estas empujan hacia arriba el barco sumergido. Se debe tener en cuenta un resguardo por la elongación de los cables, hora exacta de la bajamar, etc. El conjunto es remolcado y se posiciona preferiblemente en el mismo sentido en que fluye la marea.

Izado mecánico:

Mediante la recuperación de cables hechos firmes en o alrededor del buque hundido. No hacen uso de las mareas o la flotabilidad del buque hundido.

El peso de la sección a izar se calcula ajustando la curva de planos de un buque con la de distribución de pesos.

Como el peso de un buque que se va a izar es siempre una estimación, debe haber siempre un margen entre la capacidad de la grúa y la carga. La carga máxima de la

carga, más el fango y otro material atrapado, no debe sobrepasar el 50% de la capacidad de la grúa.

En la práctica, se suele realizar una combinación de métodos a la hora de salvar un barco. Cuando el izado mecánico representa una parte pequeña de la fuerza aplicada en un salvamento (20%-25% del total), proporciona estabilidad y control, al aportar el último porcentaje de fuerza para comenzar o mantener el ascenso. Por el contrario, cuando representa una parte importante de la fuerza (75%-80%), el izado por flotación aporta su simplicidad y permite un mayor margen de seguridad a la fuerza que debe ser izada.

Buques zozobrados:

Presentan un problema adicional a uno hundido. Hay 3 tipos de formas de reflotarlo:

- Reflotarlo de lado y trasladarlo así a otro lugar.
- Girarlo hasta que esté con la quilla al cielo completamente y reflotarlo así.
- Girarlo debajo del agua y reflotarlo quilla abajo.

El reflotar un buque con la quilla arriba es adecuado en barcos que mantiene el casco relativamente intacto y puede hacerse estanco. Se recupera su flotabilidad con aire a presión y si no está completamente zozobrado se aplica un par de fuerza soplando unos compartimentos e inundando otros y aplicando fuerzas externas con grúas si se puede. La estabilidad transversal y longitudinal de un buque zozobrado se calcula aplicando las mismas leyes que la de uno adrizado, pero el buque en esta posición presenta algunas características:

- Mayor estabilidad transversal
- Algo menos de estabilidad transversal
- Mayor estabilidad inicial
- Considerablemente mayor resistencia a las fuerzas escorantes exteriores

El tercer caso es el más caro y complejo, y no garantiza la vuelta al servicio de la nave rescatada, mas bien al contrario, en la mayoría de ocasiones estos buques quedan inservibles para el servicio debido a la cantidad de estructuras que hay que retirar para salvarlo. Se ha realizar un estudio complejo para determinar:

- Momentos adrizantes necesarios para adrizarlo
- Localizar el punto sobre el que el buque pivotará
- Determinar los esfuerzos a que estarán sometidas ciertas partes del casco
- Un análisis de la estabilidad transversal y longitudinal en distintas fases del adrizado

El punto sobre el que pivotará el buque R está en el pantoque de la quilla. Dragando el fondo alrededor de la zona donde está asentado el buque se consigue elevar el punto de pivote sobre el casco, por lo tanto acortando el brazo del momento del peso del buque ($W \times DW$) que actúa en sentido contrario al giro de adrizamiento. La fuerza adrizante debe aplicarse sin embargo lo más lejos posible del punto R.

4.7 El rescate del submarino Kursk del fondo y su traslado a dique:

El 28 de Agosto zarpó la barcaza *Giant 4* convenientemente adaptada para la operación desde Ámsterdam, y previa escala en Kirkeness, Noruega, para recoger equipo adicional, fue posicionada sobre el *Kursk* el 27 de Septiembre mediante 8 anclas, y el 1 de Octubre comenzaron los trabajos de conexión de los cables de elevación en las aberturas del doble casco.

En cada una de las 26 aberturas se conectaron 4 cables guía desde la barcaza que sirvieron de guía para la buena orientación de los cabezales hidráulicos de los cables elevadores. Estos, una vez han penetrado hasta el casco interior, abren unas pestañas hidráulicamente, quedando firmemente sujetos al submarino.

El 7 de Octubre terminó el trabajo de fijado de los cables. El día 8 a las 04:00 horas comenzó la operación de izado. Como no se conocía con exactitud la fuerza de succión del fondo, se comenzó aplicando más fuerza en la sección de popa del submarino, y la pequeña inclinación sirvió para liberarlo del fondo con más facilidad de la esperada. Se requirió una fuerza de 9,000 toneladas para levantarlo. La operación se realizó lentamente, parando cada hora para inspeccionar con buzos el progreso. Un software desarrollado con antelación permitió monitorizar toda la operación y controlar la fuerza aplicada por cada cable.

A las 09:00 el izado estaba a medio camino. Se liberó a la barcaza de sus anclas para posicionarla libremente a la mar reinante. A las 17:30 el submarino se acopló debajo de la gabarra y dos horas más tarde estaba firmemente asegurado. La maniobra había durado unas 15 horas, a un promedio de ascensión de 10 metros/hora.

La barcaza comenzó entonces el viaje hasta Murmansk remolcada por 2 remolcadores a 3-4 nudos de velocidad, llegando de día 10.

El 19 se colocaban los dos pontones laterales al conjunto Kursk-Giant, y el día siguiente el conjunto entraba en el dique flotante donde se depositaría el submarino, para su traslado definitivo a un astillero para su desguace.

CAPÍTULO 5: CÁLCULO PRÁCTICO DE LA FLOTACIÓN DE UN BUQUE SINIESTRADO

El buque tipo de la clase FFG-7 embarranca la mayor parte de su eslora en una orilla de poca pendiente.

Características resumidas del buque:

Calados antes del accidente: 14 pies 6 pulgadas a proa y popa. Pasado todo a pies son 14,5' de calado medio.

Calados embarrancado: 13 pies 10 pulgadas a proa. Pasado a pies son 13,83' y 14 pies 0 pulgadas a popa, que son 14,0'. Calado medio 13,91'.

El centro de flotación se ha calculado 23,4' a popa de la sección media del barco y el centro de la reacción del fondo se ha calculado 50' por delante.

a-Calcular por los diversos métodos la fuerza de reacción del fondo:

(1) Cálculo mediante distribución de flotación residual:

Se utiliza la regla de Simpson usando las 20 secciones de área de las 21 curvas *Bonjean*. Los calados para las 20 secciones se calculan interpolando entre el calado de proa de 13,83' y el de popa de 14,0' a popa. La distancia entre secciones son los 408' de la eslora entre perpendiculares entre 20, lo cual da una distancia de 20,4'.

Estación	Calado	Ordenada (Sección de Área)	Factor Regla Simpson	Volumen $\sum f(V)$
0/Per.Proa	13.83	0	1	0
1	13.84	49	4	196
2	13.85	118	2	236
3	13.86	184	4	736
4	13.87	243	2	486
5	13.87	294	4	1176
6	13.88	340	2	680
7	13.89	384	4	1536
8	13.90	421	2	842
9	13.91	445	4	1780
10	13.92	461	2	922
11	13.92	458	4	1832
12	13.93	436	2	872
13	13.94	409	4	1636
14	13.95	358	2	716
15	13.96	294	4	1176
16	13.97	225	2	450
17	13.97	158	4	632
18	13.98	99	2	198
19	13.99	49	4	196
20/Per.Popa	14.00	6	1	6
			$\sum f(V)$	16304

$$\nabla = h/3 \sum f(V)$$

$$\nabla = 20.4/3 \times (16304) = 110,867.2 \text{ pies}^3$$

Los desplazamientos obtenidos mediante las curvas *Bonjean* incluyen el volumen de la sección de chapa del casco del buque, pero no la de otros salientes como domos de sonares, quillas de balance, estabilizadores...., por lo que ha de aplicarse un factor de corrección de acuerdo con una tabla dependiendo del tipo de buque. En este caso para un buque de guerra de una hélice con sonar en el casco (el ejemplo de la primera columna de la tabla) se ha tomado un valor redondeado de 0.017. Este factor se multiplica por el desplazamiento a plena carga sacado de los datos del buque:

$$\nabla_{\text{apendices}} = 3,951 \text{ ton} \times 0.017 = 67.2 \text{ ton} (\nabla_{\text{app}})$$

$$\begin{aligned} \nabla_{\text{final}} &= \nabla / 35 + \nabla_{\text{app}} & \nabla &= 110,867.2 / 3 + 67.2 = 3,234.8 = \pm 3,235 \text{ ton} \\ R &= \nabla_{\text{inicial}} - \nabla_{\text{final}} & R &= 3,475 - 3,235 = 240 \text{ ton} \end{aligned}$$

(2) Cálculo por el método de cambio de desplazamiento:

$$R = \nabla_a - \nabla_b \quad \text{entrando en las curvas } \textit{Bonjean} \text{ con el calado}$$

medio inicial y final se obtienen unos desplazamientos:

$$\nabla_a = 3,475 \text{ ton}$$

$$\nabla_b = 3,250 \text{ ton}$$

$$R = 3,475 - 3,250 = 225 \text{ ton}$$

(3) Cálculo mediante cambio de calado de proa:

Los datos del buque señalan una eslora entre perpendiculares de 408'.

TPI=entrando en la curva TPI con el nuevo calado de 13,91' se obtiene 32.5 en la parte inferior de las curvas de *Bonjean*.

MT1=entrando con calado inicial de 14,5' se obtiene 750 en la parte superior de las curvas *Bonjean*.

d_r=distancia del centro de flotación (la mitad de la eslora más la distancia desplazada del centro de flotación): 204'+23,4'=227,4'.

d_i=la distancia entre el centro de flotación y el de reacción es 50'+23,5'=73,5'.

$$\Delta T_f = \text{cambio en el calado de proa: } 14'6'' - 13'10'' = 8''$$

$$R = \frac{\Delta T_f (TPI)(MT1)(L)}{(L)(MT1) + (d_r)(d_i)(TPI)}$$

$$R = \frac{8 \times 32.5 \times 750 \times 408}{(408 \times 750) + 73.5 \times 227.4 \times 32.5} \quad R = 93.8 \text{ ton}$$

(4) Cálculo mediante toneladas por centímetro de inmersión:

$$R = (T_{\text{mbs}} - T_{\text{mas}}) \times TPI$$

$$T_{\text{mbs}} = \text{calado medio antes de embarrancar } 14'6''$$

$$T_{\text{mas}} = \text{calado medio despues de embarrancar } 13'11''$$

$$R = (7'') \times 32.5 = 227.5 \text{ ton}$$

(5) Cálculo mediante cambio de asiento:

A_i=cambio de asiento embarrancado

$$R = \frac{MT1(A_i)}{d_r} \quad R = \frac{750 \times 2''}{73.4} \quad R = 20.4 \text{ ton}$$

En definitiva, se puede ver que los métodos de cambio de calado a proa y cambio de asiento dan unos resultados dispares con el resto y sobre todo con el método más exacto de flotación residual para este caso. En el primer caso porque el centro de presión no está definido con precisión, y en el segundo porque el centro de reacción del fondo está igualmente mal definido y sobre todo porque el ascenso del buque más que el cambio de asiento es el efecto general de este embarrancamiento.

b- Calcular cual será la variación en la reacción del fondo durante la marea alta. La altura de la marea en la pleamar ascenderá 6 pulgadas con respecto a la altura de la hora de embarrancamiento:

t= 6 pulgadas que sube la marea.

d_r=distancia ya calculada entre centro de flotación y de reacción.

$$\Delta R = \frac{-t \times TPI \times MT1 \times L}{(TPI \times d_r^2) + (MT1 \times L)} \qquad \Delta R = \frac{-6 \times 32.5 \times 750 \times 408}{(32.5 \times 73.5^2) + (750 \times 408)}$$

$$\Delta R = -28.94 = \pm 29 \text{ ton}$$

$$R_{\text{marea alta}} = 240 - 29 = -211 \text{ ton}$$

La fuerza de reacción para liberarlo se ve reducida en 29 toneladas por medio de la marea.

Pero los rescatadores quieren tener un resguardo suficiente cuando liberen al buque y desean calcular los efectos y la estabilidad si:

c- Se llenan los tanques 5-250-1-F y 5-250-2-F a popa.

d- Se vacian de combustible los tanques 5-116-1-F y 5-116-2-F a proa.

c- Capacidad de los 2 tanques según el diagrama superior es 67.2 ton. Las medidas de los tanques son 47' de largo y 33' de ancho. El lcg de cada tanque es 59.8' a popa de la zona media del buque y el kg 4.19'.

Además se ha calculado un KG del buque de 18'.

Punto neutro 10' a popa del centro de flotación, esto es, a 33.4' a popa de la mitad del buque.

KM_{embarrancado} de 22.5 se ha obtenido de la curva de formas para un desplazamiento de 3,250 ton.

La reacción R se toma como 240 por el método de flotación residual.

El ascenso virtual del centro de gravedad con el buque embarrancado debido a la reacción del fondo tal y como está y sin mover ningún peso es:

$$GG1 = \frac{KG \times R}{W - R} = \frac{18 \times 240}{3475 - 240} = 1.33'$$

Movimiento de G al llenar los tanques:

$$GG_1 = \frac{Gg \times w}{W+w} \quad GG_1 = \frac{(4.19 - 18) \times 67.2}{3475 + 67.2} \quad GG_1 = -0.26' \text{ (hacia abajo)}$$

$$KG_1 = 18 - 0.26 = 17.74'$$

Cambio de la reacción del fondo al llenar los tanques:

$$\Delta R = w \frac{d}{d_{nr}} \quad \Delta R = 67.2 \frac{-59.8 + 33.4}{73.5 + 10}$$

d = distancia del peso añadido o retirado al punto neutro

$d_n = (d_r + d_n)$ donde d_n es distancia LCF a punto neutro ($d_n = 10$) y d_r la distancia de LCF a punto de reacción R ($d_r = 73.5$).

$\Delta R = -13.35$ (negativo porque se ha añadido peso a popa del punto neutro del buque)

$$R_{nueva} = 240 - 13.35 = 226.6 \text{ ton}$$

Ascenso virtual de G debido a la reacción del fondo:

$$GG_1 = \frac{(KG_1 \times R_1)}{W_1 - R_1} \quad GG_1 = \frac{17.74 \times 226.6}{(3475 + 67.2) - 226.6} \quad GG_1 = 0.70'$$

Ascenso virtual de G debido a las superficies libres transitorias mientras se inundaban los 2 tanques:

$$GG_1 = \frac{2 \times i}{V} \quad GG_1 = \frac{2 \times 140753}{113225} = 2.48' \text{ (tanques llenándose por parejas)}$$

$$i_{\text{para cada tanque}} = \frac{a^3 \times l}{12} = \frac{33^3 \times 47}{12} = 140753 \text{ pies} \times \text{ton}$$

$$V = 3475 - 240 = 3235 \times 35 = 113225 \text{ pies}^3$$

$KG_{\text{efectivo}} = KG_1 + GG_1_{\text{reaccion fondo}} + GG_1_{\text{superficie libre}}$

$$KG_{\text{efectivo}} = 17.74 + 0.70 + 2.48 \quad KG_{\text{efectivo}} = 20.92'$$

$GM_{\text{efectivo}} = KM_{\text{embarrancado}} - KG_{\text{efectivo}}$

$$GM_{\text{efectivo}} = 22.5 - 20.92 \quad GM_{\text{efectivo}} = 1.58'$$

d-La capacidad de los 2 tanques es de 131.4 ton. Las medidas de los tanques son 24' de largo y 13' de ancho. El lcg de cada tanque es 75.5' a proa de la zona media del buque y el kg 9.02'.

$$GG_1 = \frac{Gg \times w}{W+w} \quad GG_1 = \frac{(9.02 - 18) \times (-131.4)}{3475 + (-131.4)} \quad GG_1 = 0.35' \text{ (hacia arriba)}$$

$$KG_1 = 18 - 0.35 = 17.65$$

Cambio de la reacción del fondo al vaciar los tanques:

$$\Delta R = w \frac{d}{d_{nr}} \quad \Delta R = -131.4 \frac{33.4+75.5}{73.5+10}$$

d=distancia del peso añadido o retirado al punto neutro

$d_{nr} = (d_r + d_n)$ donde d_n es distancia LCF a punto neutro ($d_n=10$) y d_r la distancia de LCF a punto de reacción R ($d_r=73.5$).

$$\Delta R = -171.4$$

$$R_{nueva} = 240 - 171.4 = 68.6$$

Ascenso virtual de G debido a la reacción del fondo:

$$GG_1 = \frac{(KG_1 \times R_1)}{W_1 - R_1} \quad GG_1 = \frac{17.65 \times 68.6}{(3475 - 131.4) - 68.6} \quad GG_1 = 0.37$$

Ascenso virtual de G debido a las superficies libres transitorias mientras se vacían los 2 tanques:

$$GG_1 = \frac{2 \times i}{V} \quad GG_1 = \frac{2 \times 4394}{113225} = 0.77 \text{ (tanques llenándose por parejas)}$$

$$i_{\text{para cada tanque}} = \frac{a^3 \times l}{12} = \frac{13^3 \times 24}{12} = 4394 \text{ pies} \times \text{ton}$$

$$V = 3475 - 240 = 3235 \times 35 = 113225 \text{ pies}^3$$

$$KG_{\text{efectivo}} = KG_1 + GG_1_{\text{reaccion fondo}} + GG_1_{\text{superficie libre}}$$

$$KG_{\text{efectivo}} = 17.65 + 0.37 + 0.77$$

$$KG_{\text{efectivo}} = 19.68'$$

$$GM_{\text{efectivo}} = KM_{\text{embarrancado}} - KG_{\text{efectivo}}$$

$$GM_{\text{efectivo}} = 22.5 - 19.68$$

$$GM_{\text{efectivo}} = 2.82'$$

En resumen, en cualquiera de los dos procedimientos el buque permanece estable, pero en el segundo supuesto se reduce enormemente la fuerza de reacción hasta solo 68.6 toneladas. En vista de ello, los rescatadores planean intentar liberar al buque durante la marea alta mediante el último supuesto de vaciar los 2 tanques de combustible.

e- Calcular la reacción del fondo y la fuerza necesaria para liberarlo en marea alta con los tanque de combustible vacíos. El buque está embarrancado en zona de roca con un coeficiente de fricción μ de 1.1.

La reducción de la fuerza de reacción al subir la marea ya se calculó en el punto b: $\Delta R = 29 \text{ ton}$

$$R_{\text{marea alta}} = R - \Delta R_{\text{marea}} - \Delta R_{\text{vaciado tanques}}$$

$$R_{\text{marea alta}} = 240 - 29 - 171.4 = \pm 40 \text{ ton}$$

La fuerza necesaria para liberarlo será por tanto:

$$F = 1.12 \times \mu \times R$$

$$F = 1.12 \times 1.1 \times 40 = 49.28 \text{ (ton. cortas)}$$

La fuerza es medida en toneladas cortas en el sistema anglosajón. Para pasarlo al sistema métrico se multiplica por 0.907: $49.28 \times 0.907 = 44.69 \text{ ton. métricas}$

f-Calcular los nuevos calados y GM una vez refloatado el buque:

Ascenso vertical medio del buque al vaciarse los tanques:

$$\Delta a_{\text{por ascenso vertical}} = \frac{w}{\text{TPI}} \quad \Delta a_m = \frac{-131.4}{32.5} \quad \Delta a_m = -4.04 \text{ (}\pm 4' \text{ menos)}$$

Momento de asiento = $w \times$ brazo de asiento (al centro de flotación)

$$\text{Momento de asiento} = -131.4 \times (23.4 + 75.5) = 12995.46$$

$$\Delta a_{\text{asiento}} = \frac{\text{Momento de asiento}}{\text{MT1}} \quad \Delta a = \frac{12995.46}{750} \quad \Delta a = 17.3 \text{ por proa}$$

$\Delta C_{\text{popa}} =$ Cambio calado ascenso vertical + Cambio calado variación de asiento

$$\Delta C_{\text{popa}} = -4 - \left(\Delta a \times \frac{\text{LCF a Perpendicular Popa}}{\text{Eslora}} \right) \quad \Delta C_{\text{popa}} = -4 - \left(-17.3 \times \frac{204 - 23.4}{408} \right)$$

$$\Delta C_{\text{popa}} = 3.65' \text{ (} +4' \text{)}$$

$\Delta C_{\text{proa}} =$ Cambio calado ascenso vertical - Cambio calado variación de asiento

$$\Delta C_{\text{proa}} = -4 + \left(\Delta a \times \frac{\text{LCF a Perpendicular Proa}}{\text{Eslora}} \right) \quad \Delta C_{\text{proa}} = -4 + \left(-17.3 \times \frac{204 + 23.4}{408} \right)$$

$$\Delta C_{\text{proa}} = -13.64' \text{ (} -14' \text{)}$$

Nuevos calados estando a flote:

$$C_{\text{popa}} = 14 \text{ pies } 6 \text{ pulgadas} + 4 \text{ pulgadas} = 14 \text{ pies } 10 \text{ pulgadas}$$

$$C_{\text{proa}} = 14 \text{ pies } 6 \text{ pulgadas} - 14 \text{ pulgadas} = 13 \text{ pies } 4 \text{ pulgadas}$$

$KM_{a \text{ flote}} = 22.55$ (entrando en el plano de formas para un desplazamiento de 3343.6 que es la resta de desplazamiento a flote del peso aligerado 3475-131.4= 3343.6)

$KG = 17.65$ pies (ya calculado en la parte d)

$GM = KM - KG$

$GM = 22.55 - 17.65$

$GM = 4.90'$

En resumen, el buque puede ser rescatado durante la marea alta ejerciendo una fuerza de tiro de unas 50 toneladas y permanecerá estable con un GM de 4.90.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES PERSONALES

El accidente del submarino Kursk se originó por la explosión de un torpedo impulsado por peróxido de hidrógeno debido a una falta de mantenimiento adecuado. El país en general y la armada en particular pasaba por una etapa precaria de financiación que se dejó sentir en tener que amarrar en puerto gran número de buques dejándolos que se oxidaran por falta de recursos.

El salvamento del submarino se debió al trabajo de un consorcio de empresas holandesas especialistas en el rescate y transporte marítimo. La armada rusa no tenía los medios y la experiencia para llevarla a cabo, pero el sector privado sí. Utilizando tecnología del mundo offshore y de la industria petrolífera se logró rescatar del fondo la nave más pesada hasta el momento.

Una operación de salvamento de buques es siempre una operación complicada donde el éxito no está garantizado. No hay un libro de texto a seguir para un siniestro de este tipo, cada circunstancia es única y deben aplicarse las técnicas más apropiadas para cada caso. En cualquier caso, contra más preparado sea el equipo de rescate, y mejor sea el plan desarrollado, más posibilidades de éxito tendrá la operación.

A pesar de que se planifica concienzudamente, los cálculos con que se trabaja no dejan de ser una estimación debido a lo difícil de inspeccionar un barco embarrancado o hundido. Siempre debe haber un margen de reserva en la capacidad de izado de la grúa o de flotación en los pontones o bolsas para superar los imprevistos.

Estas operaciones son una mezcla de ingeniería y buenas artes marineras. Con un buque sumergido prima más la primera, mientras que en un buque embarrancado lo hace la segunda, en cualquier caso se complementan.

Más valer pecar en exceso por haber reunido equipo y personal que lamentarse por no tener los medios suficientes.

Se trabaja contra el reloj, especialmente en embarrancamientos, para evitar que las condiciones climáticas deterioren al buque accidentado, y si las circunstancias se complican, se debe ser capaz de cambiar a un plan alternativo o improvisar usando el buen juicio.

CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

U.S. Navy Salvage Manual Volume 1. Strandings, Harbor Clearance and Afloat Salvage (Revision 2). United States Navy. May 2013

U.S. Navy Salvage Engineer's Handbook . Salvage Engineering (Revision 1). Charles A. Bartholomew. March 2008

U.S. Navy Salvage Manual. Volume 4. Deep Ocean Operations. United States Navy. August 1993

U.S. Navy Salvor's Handbook (Revision 1). United States Navy. January 2004

U.S. Navy Underwater Cutting & Welding Manual. Department of the Navy (Change B). Charles A. Bartholomew. June 2002

Manual de Salvamento y Reparaciones a Flote. Armada Española. Dirección de Enseñanza Naval (2002). Recopilado por Sargento Primero Buzo D. Rafael Lorente Ortiz

Mud, Muscle and Miracles. Marine Salvage in the United States Navy (2nd Edition). Charles A. Bartholomew y William I. Milwee Jr. Naval History & Heritage Command. 2009

Recovery Operation of the Submarine Kursk. Mammoet & Smith International. Document no. 00.12.040-R-022

Risk and Hazards in Recovering the Nuclear Submarine Kursk. J.H. Large. Large & Associates Consulting Engineers, London UK

El rescate del Kursk ¿Misión imposible? Oscar J. Calandra. Boletín Centro Naval. Armada Argentina

Evaluation, Selection and Development of Subsea Cutting Techniques. Advanced Mechanics & Engineering Limited. HSE Books. 1997

The Kursk Accident. Norwegian Radiation Protection Authority. 2001