



ESTABILIDAD DESPUÉS DE COLISIÓN

Introducción



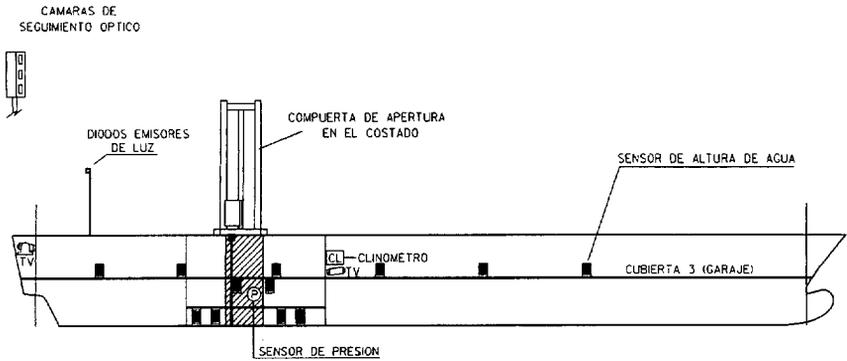
A seguridad del buque después de una colisión o un impacto debe ser uno de los temas más importantes a considerar durante el proyecto de un buque.

Para establecer normas que garanticen la supervivencia de los buques se están desarrollando en diversos centros de investigación, entre los que se encuentra el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, una serie de trabajos encaminados a conocer el comportamiento real de un buque tras una vía de agua.

Entre los campos de investigación abiertos, destaca el de los buques *ferries* de pasaje ro-ro (*roll-on roll-off*) o de carga rodada, ya que son en la actualidad un modo de transporte vital en todos los mares del mundo. Anualmente unos 25 millones de pasajeros utilizan *ferries* para desplazarse en Europa.

Aparentemente estos buques de pasaje no tienen similitud con los buques de guerra, pero al observar que su característica principal es tener una gran cubierta corrida de garaje, para la entrada y salida fácil y rápida de los vehículos situada por encima de la flotación con el buque intacto, se comprueba que esta cubierta también es habitual en algunos buques de guerra, como la cubier-

INSTRUMENTACION DEL MODELO



ta de hangar en los portaaviones o la cubierta de carros de buques tipo LST, por lo que se pueden extraer conclusiones de esta investigación.

En los últimos años, barcos de este tipo han padecido una serie de accidentes con enormes pérdidas de vidas, entre los que destacan el *European Gateway* en el canal de La Mancha en 1982, el *Doña Paz* en Filipinas, el *Herald of Free Enterprise* en la costa belga en 1987, el transbordador *Haití* en el mar Caribe en 1993 y el *Estonia* en el mar Báltico en 1994. Entre estos cinco accidentes se perdieron más de 5.000 vidas.

Tanto el accidente del *ferry European Gateway*, el del *Herald of Free Enterprise* como el del *Estonia* tuvieron como principal causa la acumulación de agua sobre la cubierta del garaje.

El *ferry European Gateway* colisionó con el barco *Speedlink Vanguard* cerca de la costa inglesa del canal, siguiendo todos los pasos que se dan en este tipo de accidentes: la colisión, una progresiva inundación en la cubierta de carga rodada y finalmente el hundimiento del buque.

El *ferry Herald of Free Enterprise* zozobró poco después de zarpar del puerto belga de Zeebrugge en su ruta hacia Dover. El barco estaba ligeramente trimado de proa y llevaba las compuertas de proa abiertas para ventilar el garaje, lo que provocó la entrada de agua debido al oleaje y el hundimiento del buque en menos de un minuto.

A las dos de la madrugada del miércoles 28 de septiembre del año 1994, el *ferry M/S Estonia* se hundió en las aguas del mar Báltico mientras realizaba el recorrido entre los puertos de Tallín y Estocolmo. Las noticias que llegaron a partir de la 0124, hora en que envió su primer mensaje de socorro, fueron que el agua entraba en la cubierta de vehículos por un fallo en el portalón de proa. A la 0130 el barco navegaba escorado casi 30°, las cinchas que sujetaban los vehículos se estaban rompiendo y el buque continuaba aumentando su escora debido al corrimiento de la carga, dando la vuelta y hundiéndose por la popa.

Debido a estos accidentes, los armadores, proyectistas navales y las administraciones marítimas se han visto obligados a revisar la seguridad de sus buques con el fin de aplicarles un estándar de máxima seguridad, que ha dado lugar en Europa al Acuerdo de Estocolmo, firmado para establecer unas normas más estrictas de seguridad en cuanto a la estabilidad en los buques de pasaje. La zona geográfica que cubre el acuerdo limita al sur con el cabo Finisterre y al norte con el punto más septentrional de Noruega, incluyendo el mar Báltico y el mar del Norte.

Una de las normas de este acuerdo es que puede demostrarse el cumplimiento de la estabilidad después de averías en esta clase de buques de dos modos: el primero consiste en superar con éxito un determinado programa de ensayos en un canal de experiencias hidrodinámicas. El segundo se basa en incluir en los cálculos de estabilidad la

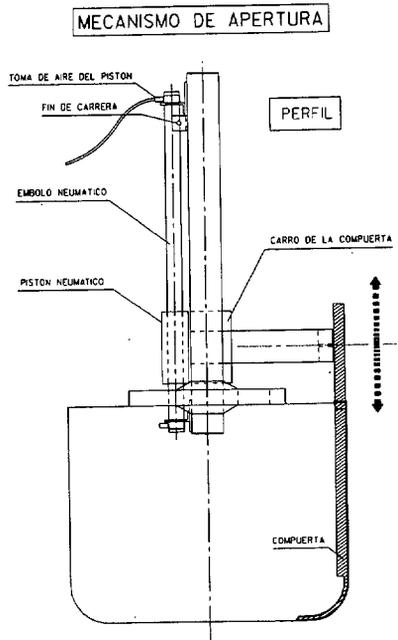
posible acumulación de agua sobre la cubierta corrida del garaje y comprobar que el barco no se hunde. La altura de agua acumulada se calcula en función del francobordo (distancia entre la cubierta corrida estanca del garaje y el calado) residual y de la altura significativa de ola (la media del tercio de olas de mayor altura) esperada máxima en la zona de operación del barco.

La extensión de la vía de agua producida en un buque por una colisión depende de muchos parámetros, entre los que están los espesores de las chapas del forro, las cubiertas, mamparos y demás elementos de la superestructura que reciben y absorben el impacto, sufren las deformaciones, etc.

Además de los múltiples factores mecánicos que están presentes en el momento del choque, hay otra serie de fenómenos hidrodinámicos que intervienen en los primeros instantes de una colisión. Entre ellos destacan los efectos transitorios producidos por la repentina entrada de una gran cantidad de agua por el costado averiado del buque, que fueron el objetivo de este trabajo.

El coeficiente de bloque

El coeficiente de bloque de un buque es la relación del volumen de la carena a cierto calado entre la eslora, la manga en la cuaderna maestra y el



calado en la flotación. Este coeficiente indica cómo son las formas del barco, más finas o más llenas, lo que tiene una gran influencia en el movimiento de balance.

El amortiguamiento del balance del buque tras la colisión se debe al rozamiento con el agua, a la generación de olas producidas por el buque, a los efectos viscosos y vórtices en la quilla, el pantoque y los apéndices.

Aunque estos efectos no tienen siempre una relación sencilla, se puede decir, en una primera aproximación, que la variación del coeficiente C_B implica la modificación del amortiguamiento en balance, lo que debe tenerse en cuenta si se trata de extrapolar los resultados a otro barco.

Unos valores aproximados de dicho coeficiente se exponen en la siguiente tabla:

Buque	C_B
Fragata tipo F-100	0,45
Buque anfibio tipo LST	0,55
Portaeronaes	0,50
Buque transporte tipo <i>Galicia</i>	0,60
Buque aprovisionamiento	0,60
<i>Ferry</i> pasaje ensayado	0,62

Para reproducir en el laboratorio el fenómeno de la de entrada de agua, se necesitaba un modelo *ferry*, un sistema que pudiese simular una rápida vía de agua en su costado y la instrumentación necesaria para recoger los datos obtenidos en los ensayos. El modelo debía reproducir no sólo las formas exteriores, sino también la disposición interna de los compartimentos inundados.

Para conservar las mismas propiedades hidrostáticas del buque original, se construyó un modelo de fibra de vidrio a escala, con un coeficiente de bloque C_B de 0,62, característico en este tipo de *ferries*, con los apéndices más significativos: hélices, ejes, túneles, timones, quillas de balance, etc., y la compartimentación interior en la zona de la avería lo más exacta posible al buque real, simulando la permeabilidad necesaria mediante bloques de espuma que representan tanques, generadores y motores. También se pusieron los mamparos estancos y las salidas de ventilación para evitar en lo posible bolsas de aire que produjeran una inundación asimétrica.

En la siguiente tabla se exponen los factores de escala que relacionan al buque y su modelo en los ensayos:

Magnitudes	Factor escala
Eslora y manga (m)	λ
Puntal y calado (m)	λ
Altura de ola (m)	λ
Balance y cabeceo ($^{\circ}$)	1
Tiempo (s)	$\lambda^{0.5}$
Velocidad (m/s)	$\lambda^{0.5}$
Aceleración (m/s ²)	1
Volumen (m ³)	λ^3
Peso (ton)	$\rho\lambda^3$

Al casco se le cortó una zona del costado de estribor para simular la avería estándar según SOLAS, que consiste en una vía de agua de extensión el 3 por 100 de la eslora más tres metros, con una profundidad de un quinto de la manga hacia crujía y con forma de triángulo isósceles sin límite en altura. El trozo de costado que se quitó fue usado en los ensayos como compuerta vertical deslizante.

Mecanismo deslizante

En el canal se desarrolló un mecanismo que desliza hacia arriba una compuerta simulando una rápida vía de agua en el costado.

El sistema se basa en el disparo de un pistón neumático a una velocidad controlada, que mediante un brazo levanta la compuerta verticalmente a una gran velocidad, permitiendo la inundación de la compartimentación interior del modelo.

El sistema neumático se montó en la vertical del centro de gravedad del modelo para que el disparo del mecanismo interfiriese lo menos posible en el registro de la toma de datos de la respuesta del modelo. La estanqueidad de la compuerta se consiguió con goma y vaselina.

Compartimentación simétrica

Aunque en las crónicas de viaje de Marco Polo ya se mencionan los mamparos estancos de los juncos chinos del final del siglo XIII, no se conoce ningún requerimiento para la ubicación de mamparos estancos hasta el British Marine Shipping Act de 1854, que obligaba a la construcción de mamparos delimitando la cámara de máquinas.

Más tarde, en 1891, la Cámara de Comercio británica obligó a los buques de pasaje de más de 129 m que cruzasen el canal de la Mancha a ser capaces de seguir flotando a pesar de tener dos compartimentos abiertos a la mar.

Se define como «compartimentado de un buque» a la disposición de mamparos longitudinales y transversales que son la base de la seguridad del barco.

El primer paso para prevenir el problema de la escora del buque tras un impacto o colisión consiste en proyectar una compartimentación simétrica de tanques laterales, unidos por un conducto a través del doble fondo. Al sufrir la colisión en un costado, parte del agua que rápidamente entra en el barco pasa a través de dichos conductos por el doble fondo a inundar los tanques simétricos de la otra banda, anulando la peligrosa escora y manteniendo el buque adrizado, aunque con menor francobordo.

En el modelo ensayado, la vía de agua inundaba los dos compartimentos de mayor capacidad, la cámara de máquinas y la de generadores, debajo de los cuales se encontraban los conductos de conexión entre los tanques simétricos laterales.

La solución, desde el punto de vista estático, no presenta problemas, aunque sí los presenta desde un punto dinámico, ya que la inundación no es instantánea y el comportamiento dinámico del buque vendrá determinado por una serie de variables, tales como el tamaño de la avería, la altura metacéntrica, la permeabilidad de los espacios inundados y de las cubiertas que se puedan inundar, la altura de la cubierta de francobordo, la disposición, volumen y altura de los tanques del doble fondo, etc.

Desarrollo de los ensayos

Para la toma de los datos se prepararon una serie de equipos, entre los que destacan:

- El equipo de trayectografía sin contacto es un sistema óptico capaz de recoger información en tres dimensiones de hasta varios puntos de luz a la vez. Los puntos de luz colocados sobre el modelo, cuyos movimientos se van a medir, son diodos (LEDs) que emiten luz infrarroja.
- Esta luz emitida por los diodos entra en las lentes de las cámaras del equipo y se recoge en un detector, fotosensible. Luego las cámaras digitalizan la salida del detector, que es enviada a un ordenador donde se registran las series temporales de los diodos. El ordenador resuelve el problema trigonométrico que permite obtener las coordenadas instantáneas de cada LED y el movimiento del modelo en sus seis grados de libertad.
- El medidor de altura de francobordo consiste en dos varillas situadas en la abertura de la vía de agua que se conectan a un circuito capacitivo.

vo, tal que una variación del nivel de agua entre las varillas registra una señal mayor o menor en la serie temporal.

- Captadores de presión y medidores de altura de agua para conocer el desarrollo en los tanques simétricos a los averiados.

La preparación de los ensayos consistió en medir el peso y calcular la inercia longitudinal y transversal. Luego se pone el modelo en el canal de trimado para una comprobación de los calados y se efectúa una prueba de inclinación de la que se obtiene la altura metacéntrica GM (distancia entre el centro de gravedad del barco y el metacentro transversal). A continuación se llevó el modelo al laboratorio de dinámica del buque, donde se preparó la instrumentación para comenzar el ensayo.

Una vez listo e inspeccionado el modelo, se dispara el sistema neumático que abre la compuerta que simula la colisión. Cuando la puerta deslizante sube, la rápida entrada de agua hace que el modelo empiece a escorarse hacia el costado de la avería, mientras el agua penetra a través del costado dañado inundando los espacios del doble fondo, la cámara de máquinas y la sala de generadores.

Durante el desarrollo de los ensayos se aprecia que la cubierta corrida del garaje no se inunda para valores de GM altos, pero para valores menores se produce una escora mayor, por lo que la cantidad de agua acumulada sobre ella es cada vez más grande.

A partir de un determinado valor de altura metacéntrica, el momento restaurador residual no es capaz de evitar la zozobra del modelo. La finalidad de los ensayos era encontrar, para cada configuración interna del modelo, el GM límite que evite su hundimiento.

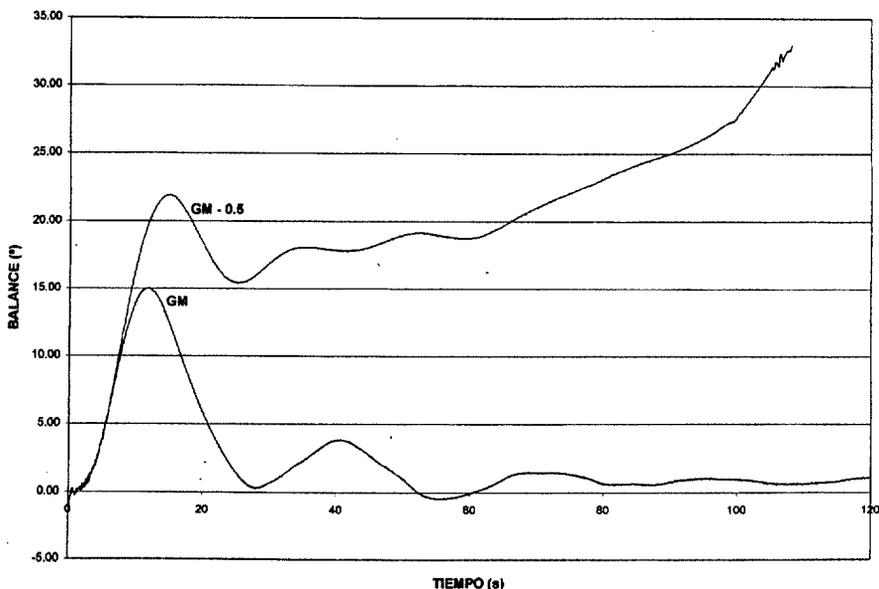
Entre las figuras se presenta un registro de la respuesta de balance del modelo respecto al tiempo. En él se observa el incremento de la escora hacia el costado de la avería hasta un pico máximo a partir del cual el modelo tiende a adrizarse y, tras una serie de picos cada vez menores, debido al amortiguamiento del balance, se estabiliza de nuevo con un francobordo menor. También se presenta el registro de un ensayo en el que el modelo zozobró, siendo la única diferencia con el registro anterior un GM 0,5 metros menor.

En la matriz de ensayos se variaron parámetros como el dimensionamiento de los conductos de doble fondo, de los tanques laterales y el diámetro de las tuberías de ventilación de los tanques de doble fondo.

Deriva en avería

Como se ha visto, si se produce un impacto, la compartimentación simétrica reducirá la peligrosa escora, manteniéndose el buque adrizado con un francobordo menor. El reducir la escora facilita, si es necesario, las operaciones de lucha contra incendios, salvamento y evacuación de las personas.

ENSAYOS TRANSITORIOS DE BALANCE EN SIMULACION DE AVERIAS

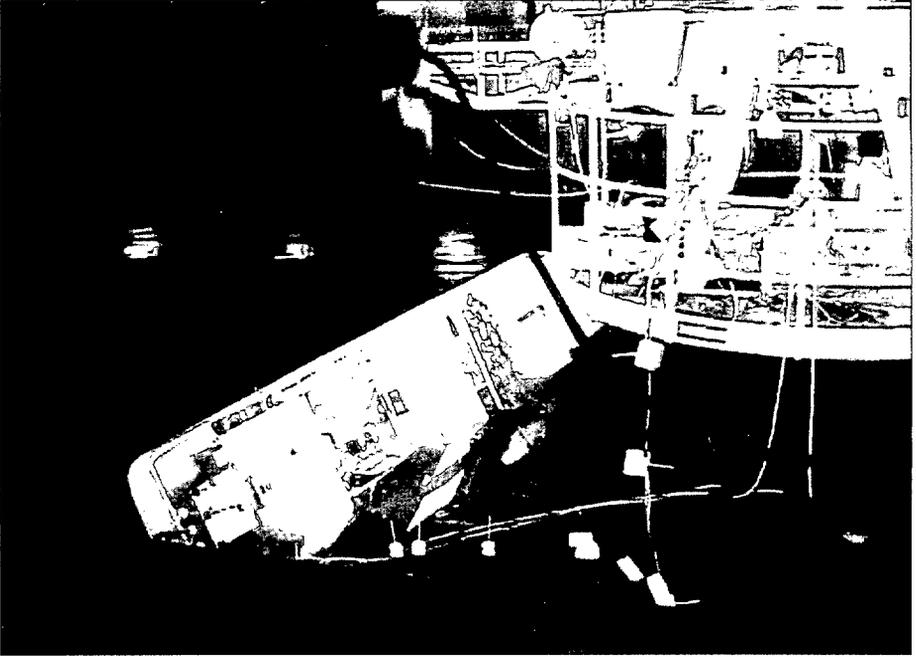


Para afrontar estos trabajos, es muy importante conocer cómo afecta la avería a la deriva del buque. Se conoce teóricamente la fuerza de empuje del oleaje contra el barco en la dirección de las olas, lo que permite comparar los resultados teóricos y los datos registrados en los ensayos para establecer en qué tanto por ciento se reduce la deriva del buque al tener los dos compartimentos inundados.

En la figura se presentan los resultados de un modelo al que se le dejó derivar libremente con un espectro de oleaje tipo JONSWAP de cuatro metros de altura significativa (la media del tercio de olas de mayor altura) y unos periodos de pico de ocho y doce segundos.

Conclusiones

De los ensayos realizados se deduce que la futura reglamentación sobre estabilidad en buques de pasaje deberá contar con los efectos transitorios producidos por la entrada del agua, cosa que los estudios teóricos no tienen en cuenta al considerar una comunicación instantánea entre tanques. La escora debida a la inundación inicial puede provocar la acumulación de una gran cantidad de agua sobre la cubierta del garaje y hacer zozobrar al buque.



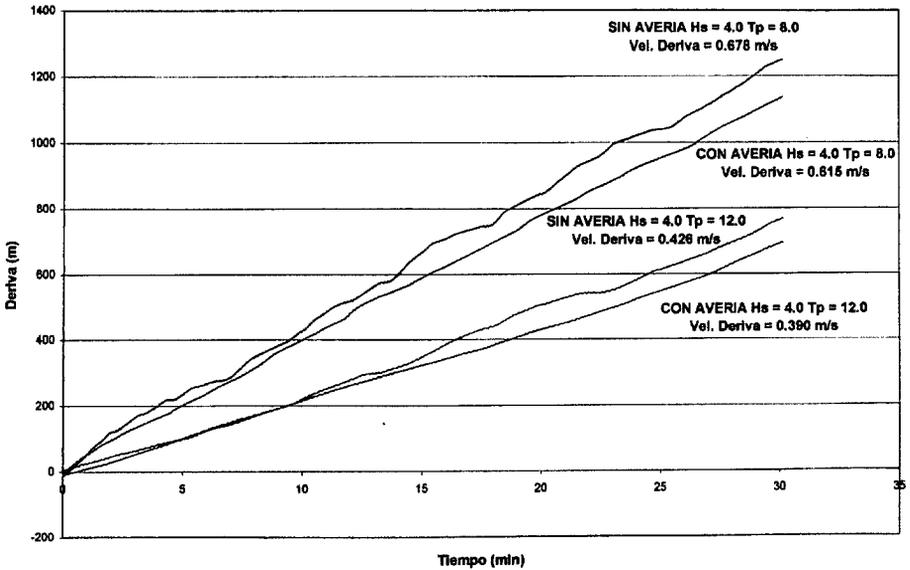
Se puede establecer una gran similitud entre los buques *ferries* ro-ro, con grandes cubiertas corridas sin mamparos, y algunos buques de guerra, como portaaeronaves o buques de transporte tipo LST. La posible inundación de sus cubiertas da lugar a una gran cantidad de agua acumulada que hundiría al buque por pérdida de estabilidad.

Los resultados obtenidos son especialmente de interés si se tiene en cuenta que la diferencia entre los francobordos antes y después de la inundación es del orden de los *ferries* de pasaje. El barco ensayado tenía un francobordo antes de la avería de cerca de 3 m y de 1,5 m después. La mayoría de los buques de este tipo, a excepción de muy pocos buques de reciente construcción, suelen tener valores bastante más críticos.

Los fenómenos transitorios en general y la necesidad de este tipo de ensayos adquieren importancia cuando se demuestra que el modelo, a igualdad de altura metacéntrica, no sobrevive al ingreso de agua en el ensayo de flujo inicial transitorio con el dispositivo de puerta deslizante, aunque sí resiste previamente a un ensayo de supervivencia con olas de seis metros de altura significativa.

Además de la ya mencionada altura metacéntrica, las dimensiones y compartimentación interiores de los espacios inundados, se evidencia la importancia del francobordo residual de la cubierta del garaje, ya que si es

COMPARACION DERIVA



suficientemente grande evitará la entrada de agua sobre dicha cubierta. Para valores menores de francobordo residual, la acumulación de agua sobre la cubierta del garaje creará un momento escorante que al exceder al momento restaurador residual produce la zozobra del modelo.

El Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo tiene diversos proyectos para la continuación de trabajos de investigación en el campo de la seguridad marítima.

José María RIOLA RODRÍGUEZ

