

**OCEAN 2000**  
**Valdivia, Chile. 25-27 Octubre**

***“EL EFECTO DEL BULBO DE PROA EN EL COMPORTAMIENTO DEL BUQUE  
EN LA MAR (TRABAJOS EXPERIMENTALES)”***

**Luis Pérez Rojas, Dr. Ing. Naval<sup>1</sup>**  
**Adolfo Marón Loureiro, Ing. Naval<sup>2</sup>**  
**Raúl Atienza Martín, Ing. Naval<sup>3</sup>**

Es conocido el efecto beneficioso que el bulbo de proa de un buque representa no sólo sobre la resistencia al avance sino también ante su comportamiento en la mar. Si sobre el primer aspecto, el de la resistencia, hay numerosos trabajos tanto numéricos como experimentales no ocurre lo mismo con la acción sobre el comportamiento en la mar.

El presente trabajo recoge los ensayos experimentales realizados en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, analizando el efecto que sobre el comportamiento del buque en la mar representan tres bulbos diferentes en una misma carena. Este trabajo se enmarca dentro del Programa europeo “Training and Mobility of Researchers to Large-Scale Facilities”, financiado por la Comisión Europea.

También se incluyen los ensayos de resistencia al avance realizados en el Canal de Ensayos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid.

---

<sup>1</sup> Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la E.T.S.I.Navales (Universidad Politécnica de Madrid). Avda. Arco de la Victoria s/n, 28040 MADRID. Email: lperezr@etsin.upm.es

<sup>2</sup> Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo. Carretera de la Sierra s/n 28048 El Pardo MADRID. Email ceh.mail@cehipar.es

<sup>3</sup> Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, actualmente en Laboratorio de Puertos y Costas. C.E.D.E.X., Antonio López 81. Email raul.atienza@cedex.es

## **INDICE.-**

### 0.- INTRODUCCIÓN

### 1.- DEFINICIÓN DE LAS CARENAS

### 2.- ENSAYOS DE RESISTENCIA

- 2.1.- Descripción instalaciones
- 2.2.- Definición de los ensayos
- 2.3.- Resultados en aguas tranquilas
- 2.4.- Ensayos en olas regulares
  - 2.4.1.- Oleaje utilizado
  - 2.4.2.- Resultados en olas regulares

### 3.- ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO EN LA MAR

- 3.1.- Descripción del Programa “Training and Mobility of Researchers to Large-Scale Facilities”
- 3.2.- Descripción de las instalaciones
- 3.3.- Descripción de los ensayos.
  - 3.3.1.- Modelo e instrumentación.
  - 3.3.2.- Ensayos realizados.
- 3.4.- Resultados de los ensayos de comportamiento en la mar.

### 4.- CONSIDERACIONES FINALES.

## 0.- INTRODUCCIÓN.

Por bulbo de proa se entiende a todo engrosamiento de volumen situado en la proa, sea protuberante o no más allá de la curva de la roda, sin importar su forma o su tamaño.

Durante muchos años los ingenieros navales han estado buscando la manera de reducir o estabilizar la intensidad de las perturbaciones que se concentraban en la proa del buque. Ya en tiempos de los clipers, los ingenieros sabían que modificando la proa era un buen método para reducir la resistencia de presión. Pero hemos de remontarnos a R. E. Froude para tener constancia de la utilidad del bulbo desde el punto de vista hidrodinámico, y a David Taylor[1], en 1907; para encontrar al primero que proyectó y construyó un bulbo de proa como tal, con la intención de aumentar la velocidad de un barco.

Las bases para la justificación teórica del efecto del bulbo de proa en buques rápidos se obtuvieron, algunos años más tarde, gracias a los trabajos de Sir Thomas Havelock [2] en 1928, sobre las olas dejadas por una esfera, que prepararon el camino para los estudios de W.C.S. Wigley [3] y G. Weiblum [4], quienes a partir de la teoría linealizada de la resistencia por formación de olas de proa del buque, atribuyeron su acción a la atenuación del sistema de olas de olas del buque, por superposición con el sistema de olas generado por el propio bulbo.

Durante los años que median entre estos trabajos pioneros y el decenio de los sesenta, el bulbo se aplicó, con bastante éxito, en buques de velocidad relativamente alta, con números de Froude en torno a 0,30. Estos bulbos solían ser bulbos bajos, poco protuberantes y de escaso volumen.

Un hecho que pudo constatarse en esos años, sin que pudiera justificarse, fue el ahorro de potencia que se conseguía con la aplicación del bulbo en petroleros de coeficiente de bloque del orden de 0,85 y con números de Froude menores de 0,2, que si bien eran poco significativos en condición de plena carga, alcanzaban porcentajes del 15 y el 20 por ciento en la condición de lastre.

Estos resultados fueron explicados por E. Eckert y S.D. Sharma [5], basándose en que el mecanismo de acción del bulbo es radicalmente distinto en dos tipos diferentes de buques. En los buques rápidos actúa por atenuación del sistema de olas de proa, como ya se ha indicado, y reducción, por tanto, de la resistencia por formación de olas, mientras que en los buques lentos, en la situación de lastre, disminuye la resistencia por olas rompientes, que en estos buques supone porcentajes en torno al 20% de la resistencia total.

Esta componente debida a la formación de olas rompientes en proa fue descubierta en 1969 por E. Baba[6], sigue la similitud de la ley de Froude como la componente debida a la formación de olas y puede estimarse basándose en la teoría del salto hidráulico en aguas someras.

En un principio, por facilidad de construcción, se emplearon bulbos de formas muy simples, de sección transversal prácticamente cilíndrica y localmente muy planas en la zona baja. Al intentar traspasar estas formas a buques pequeños, más veloces y de menor calado, se ocasionaron problemas de pantocazos, lo que provocó un parón en el uso del bulbo en barcos de tamaño medio. La solución llegó con la variación transversal del bulbo al adoptar secciones de tipo “peonza” en lugar de las utilizadas de secciones circulares, elípticas o incluso en gota de agua con zonas muy planas en los pies de cuaderna. Esta solución, la de “peonza”, suaviza la entrada de la roda en el agua, por su forma en V en la zona baja, mientras que el volumen desplazado hacia arriba y la forma plana del bulbo en su parte superior tienen un efecto amortiguador del cabeceo.

Si en general, existen numerosos estudios tanto experimentales como analíticos sobre la actuación del bulbo de proa en la resistencia al avance, no se puede decir lo mismo sobre su influencia en el comportamiento en la mar del buque así como en su maniobrabilidad.

En el trabajo de A. Rem[7] sobre los aspectos de la maniobrabilidad se indica que no existe información sobre el efecto de las formas de proa en la maniobrabilidad de un buque. Esto incluye la presencia del bulbo de proa.

Por lo que se refiere a los efectos del bulbo sobre las cualidades marineras del buque, se puede señalar que, en plena carga, el bulbo reduce considerablemente la amplitud de los movimientos relativos de la proa respecto a la flotación, Este efecto se va atenuando al disminuir el calado y en lastres ligeros no existe prácticamente diferencia. De igual forma, al reducir los movimientos relativos de la proa, reduce la probabilidad de emersión de la misma y con ello, la posibilidad de pantocazos.

El presente trabajo recoge los ensayos experimentales llevados a cabo en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo dentro del Programa europeo “Training and Mobility of Researchers to Large-Scale Facilities”, financiado por la Comisión Europea. También se incluyen los ensayos correspondientes a la resistencia al avance, realizados, en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid.

## 1.- DEFINICIÓN DE LAS CARENAS.

La carena ensayada corresponde a la de un buque de las siguientes características:

Eslora entre perpendiculares.....	113,22 m
Eslora flotación plena carga.....	117.00 m
Manga máxima.....	18.50 m
Puntal a la cubierta ppal.....	10.08 m
Calado de proyecto.....	7.40 m
Desplazamiento máximo.....	12564 t.

Las formas iniciales, recogidas en la figura 1.1, corresponden a las de un buque existente y que había demostrado un comportamiento positivo tanto en los aspectos de resistencia al avance como de comportamiento en la mar. El bulbo de esta carena (figura 1.2) se puede calificar como un bulbo alto.

La segunda alternativa que aparece en la figura 1.3 corresponde a un bulbo más bajo que se puede calificar como un bulbo intermedio y con mayor protuberancia. Esta alternativa se proyectó de acuerdo con las experiencias obtenidas en el Canal de la E.T.S.I.Navales.

También se consideró una tercera alternativa, basada en un bulbo bajo, típicamente recomendado para situaciones de lastre (figura 1.4). Como se acaba de indicar, las carenas ensayadas difieren exclusivamente en el bulbo de proa. En la tabla 1.1 se recogen las características de los tres bulbos estudiados.

	Area (m <sup>2</sup> )	Z <sub>C. de G</sub> (m) Sobre línea base	Protuberancia (m)
<b>BULBO 1</b>	14.87	4.44	4.00
<b>BULBO 2</b>	14.88	3.94	4.80
<b>BULBO 3</b>	11.37	2.62	4.00

Tabla 1.1

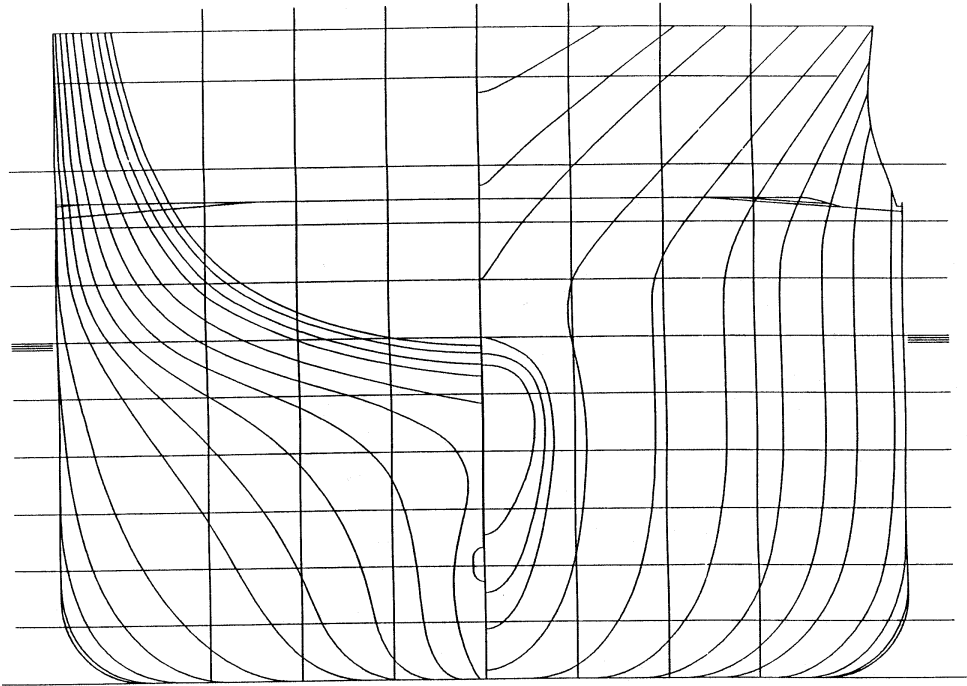


Figura 1.1

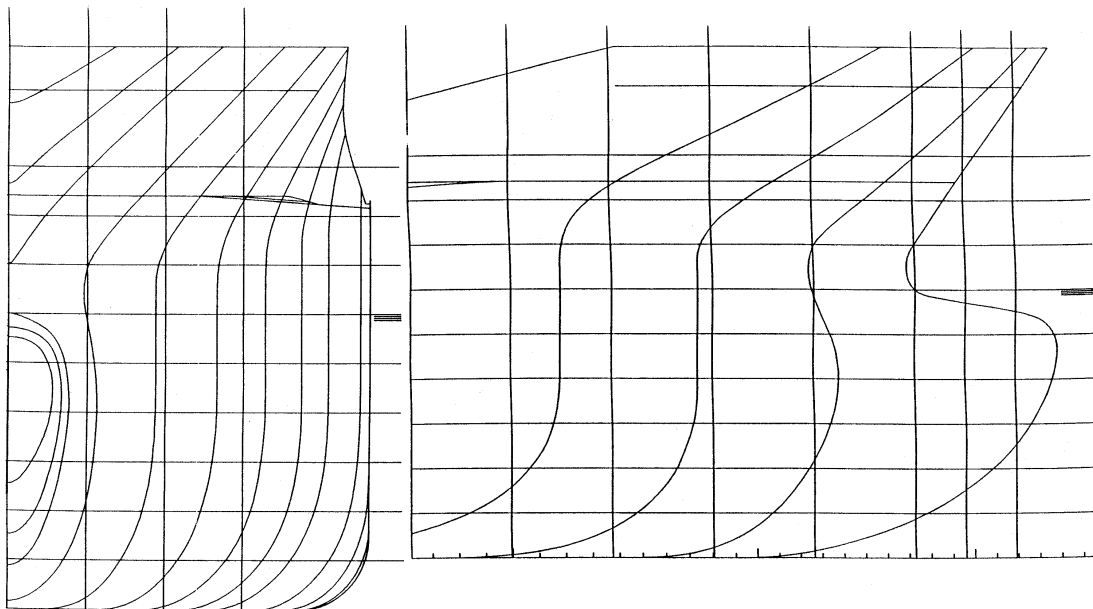


Figura1.2

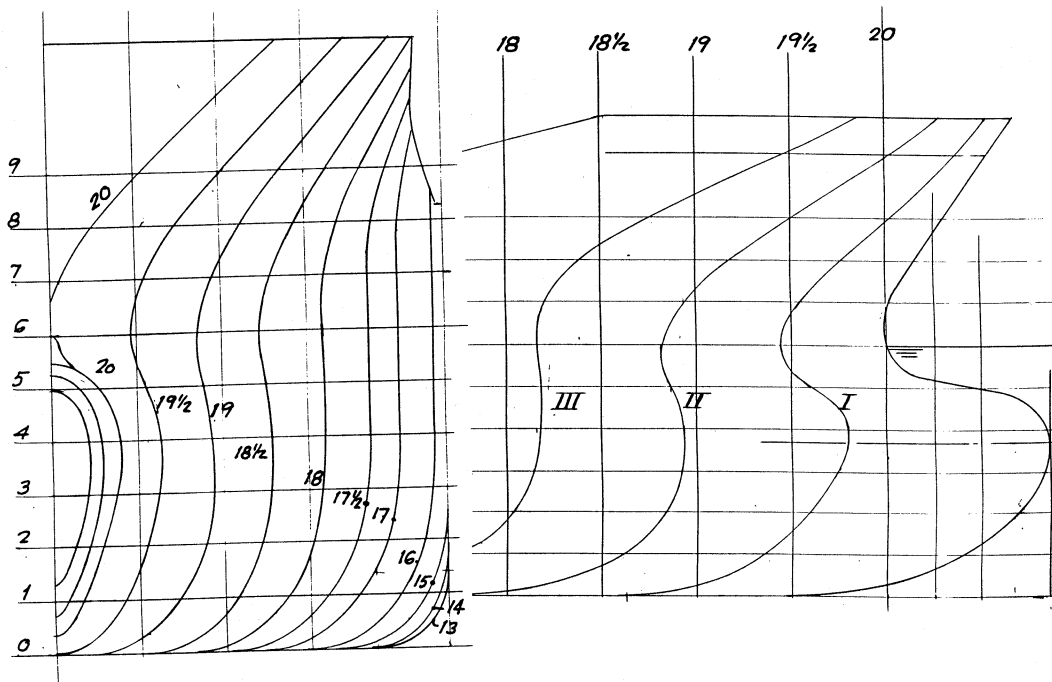


Figura 1.3

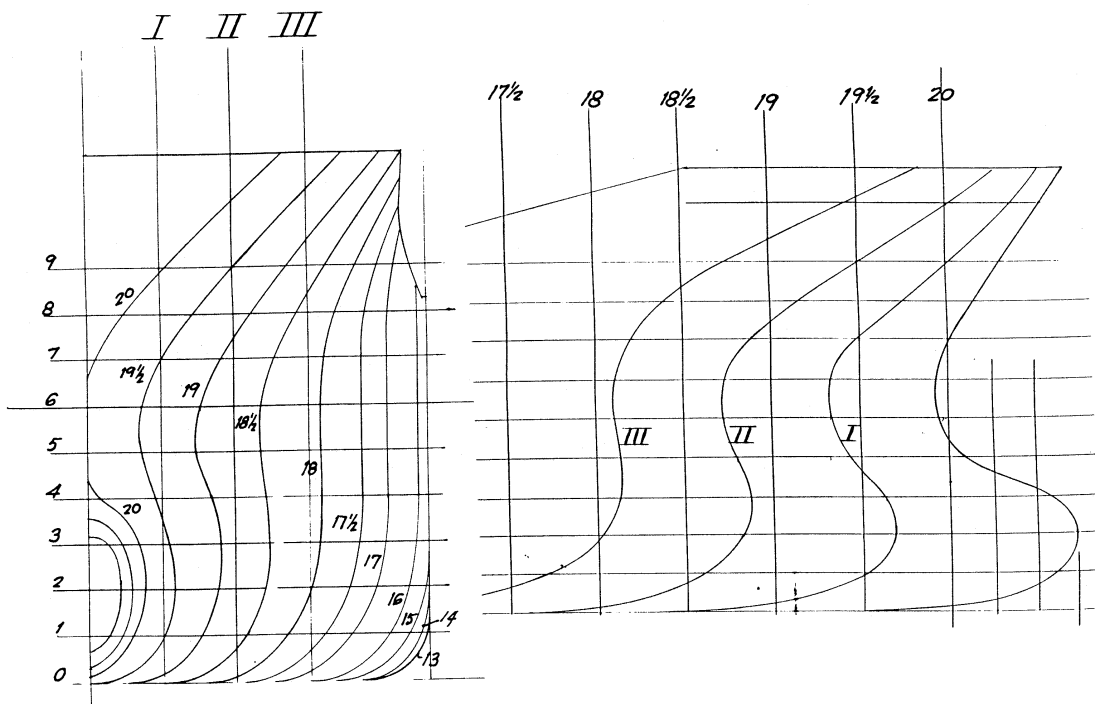


Figura 1.4

## 2.- ENSAYOS DE RESISTENCIA.

### 2.1.- Descripción de las instalaciones.

Los ensayos de resistencia tuvieron lugar en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid que construyó en su día un "Canal de Ensayos", el hermano pequeño del Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo inaugurado en los años treinta, con el fin de facilitar la formación del Ingeniero Naval en el campo experimental.



Figura 2.1.- Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales

Por este canal pasaron numerosas promociones de ingenieros navales y la Asociación de Investigación de la Construcción Naval (ASINAVE) lo utilizó para llevar a cabo una obra significativa en el campo de la investigación. La crisis de la construcción naval marcó el final de esta fructífera Asociación que durante muchos años aportó esfuerzo y ciencia al campo de la construcción naval, lo que llevó a un cierto olvido a estas instalaciones, reduciéndose su uso a las prácticas de la asignatura de "Teoría del Buque".

A finales de los ochenta, un grupo de ingenieros navales, vinculados de diversa forma con la Escuela, decidieron revitalizar las instalaciones y se iniciaron una serie de trabajos de investigación al amparo del artículo 11 de la Ley de Reforma Universitaria.

Desde entonces, más de cien trabajos de investigación se han realizado con el respaldo de esta normativa, solicitados tanto por empresas privadas como públicas de ámbito nacional e internacional. Líneas de investigación, realización de tesis doctorales, cooperación con otros Centros y Grupos de Investigación en España y en el extranjero, Comunicaciones y Ponencias presentados a reuniones nacionales e internacionales, incorporación a la International Towing Tank Conference, participación en las Comités Técnicos de esta Institución, son algunas de las actuaciones que se han desarrollado en los últimos años en el "Canal" de la ETSIN.

Este "canal" que fue inaugurado en 1967 con unas dimensiones de 56 metros de largo, 3,8 m. de ancho y 2,2 m. de profundidad, posteriormente se aumentó su longitud hasta los 100 m. Fue proyectado por Luis de Mazarredo con el fin de que los estudiantes de ingeniería se pusieran en contacto con los métodos de experimentación. En la figura 2.2, se presenta un corte transversal del mismo

En la cabecera se prolonga en un canalillo de trimado cuyas paredes laterales están constituidas por cristales de 12 mm. de espesor. Este canalillo está situado sobre un foso desde el que se puede ver el modelo con más comodidad.

En el otro extremo, existe un generador de olas de tipo pantalla que permite la realización de ensayos a aguas agitadas. Movido por un motor eléctrico de 2 Kw. Permite alcanzar olas regulares de hasta 0,2 m. y períodos de olas comprendidos entre 0,5 y 2 segundos.

Para poner en movimiento el modelo se dispone de un carro de estructura de acero, que rueda sobre dos líneas de carriles ancladas en los pretiles laterales del "canal". La alineación y nivelación de estos carriles se ha efectuado con gran precisión para evitar alteraciones de la velocidad del carro durante los ensayos.

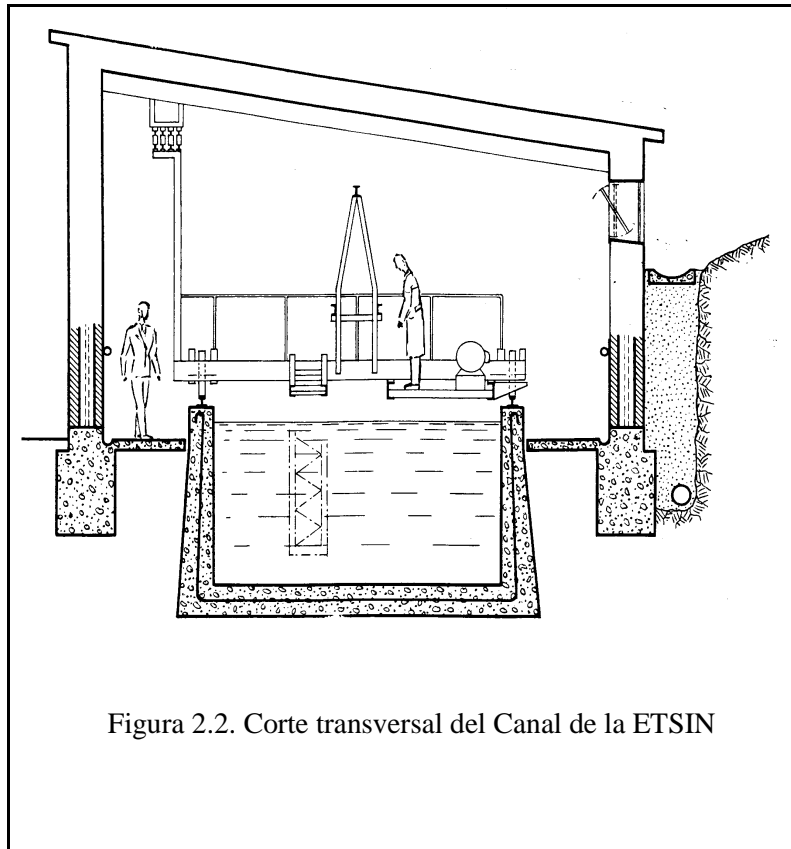


Figura 2.2. Corte transversal del Canal de la ETSIN

El carro es movido por cuatro motores (uno por cada rueda) de corriente continua de 2.8 Kw a 220 V conectados en serie para conseguir la igualdad de sus pares motores. La transmisión se realiza a través de sendos engranajes reductores para que siendo así los motores más ligeros puedan reaccionar antes a la regulación. El carro puede alcanzar una velocidad de hasta 3.5 m/s.

La antigua regulación a través de un grupo de válvulas tiratrones y la utilización de un grupo Ward-Leonard ha sido sustituida por un sistema de regulación basado en la electrónica de potencia, en donde ha participado activamente el personal del Centro.

## 2.2.- Definición de los ensayos.

Los ensayos en aguas tranquilas se realizaron con modelos construidos en madera de samba, utilizando un factor de escala  $\lambda = 40$ . Esta escala fue elegida de tal forma que las dimensiones del "Canal" no presentaran "efectos de pared" y siguiendo las indicaciones de la International Towing Tank Conference.

Se realizaron ensayos en dos condiciones de carga; lastre y plena carga, cuyas características quedan reflejadas en la tabla 2.1.



	BULBO 1		BULBO 2		BULBO 3	
	P.C.	Lastre	P.C.	Lastre	P.C.	Lastre
<b>Desplazamiento (t)</b>	12564	7522	12564	7522	12564	7522
<b>Eslora flotación (m)</b>	117	111.95	117	113.27	117	110.82
<b>Cpr (m)</b>	7.4	4.1	7.4	4.1	7.4	4.1
<b>Cpp (m)</b>	7.4	5.2	7.4	5.2	7.4	5.2
<b>Cm (m)</b>	7.4	4.65	7.4	4.65	7.4	4.65

Tabla 2.1

### 2.3.- Resultados en aguas tranquilas.

En las figuras 2.4 y 2.5 se presentan los resultados de los ensayos de remolque en aguas tranquilas en ambas situaciones de carga: lastre y plena carga respectivamente. Es necesario resaltar que las diferencias no son exageradas al tratarse de bulbos reales en la práctica. Sin embargo, se constata que el bulbo 3 es el que presenta peores resultados tanto en lastre como en plena carga. El bulbo intermedio (bulbo 2) es el que presenta mejores resultados para la situación de lastre. Para la situación de plena carga, el bulbo 2 es el que presenta menor potencia hasta la velocidad de 13.75 nudos, siendo la velocidad contractual de 13.5 nudos.

En la tabla 2.2 se indican los valores de la potencia de remolque en aguas tranquilas para las velocidades de 13.5 nudos en plena carga y 14.5 nudos en lastre.

	Bulbo 1		Bulbo 2		Bulbo 3	
	Lastre	Plena carga	Lastre	Plena carga	Lastre	Plena carga
<b>Velocidad</b>	14.5 nudos	13.5 nudos	14.5 nudos	13.5 nudos	14.5 nudos	13.5 nudos
<b>Pot.Rem(CV)</b>	2998	2503	2878	2504	3065	2701
<b>%</b>						

Tabla 2.2

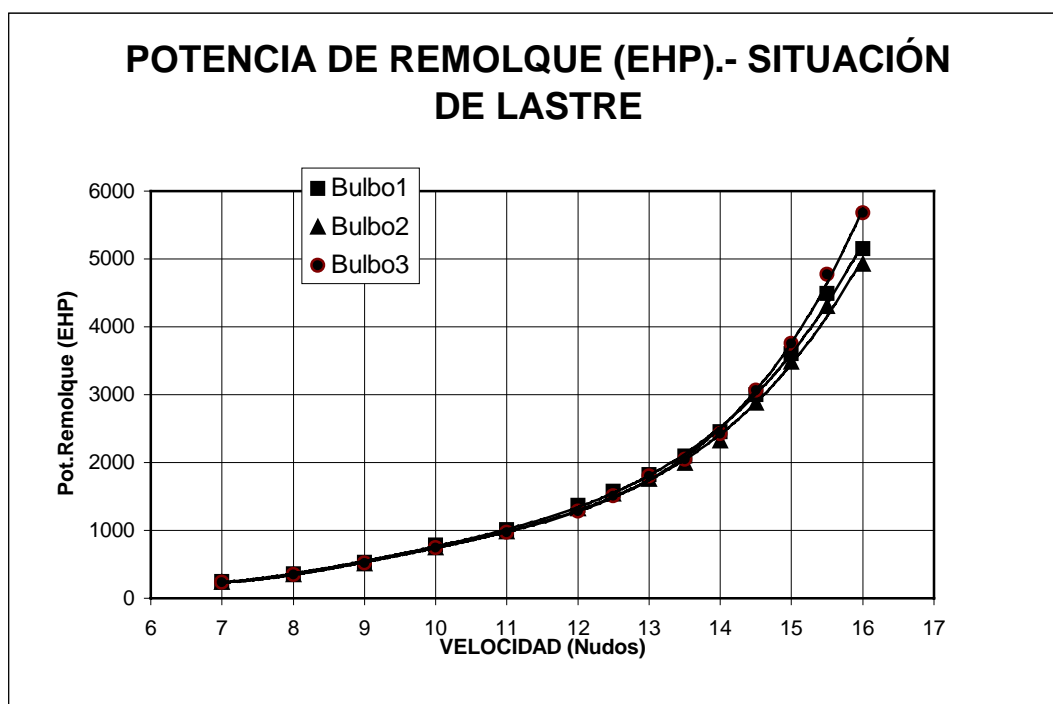


Figura 2.4

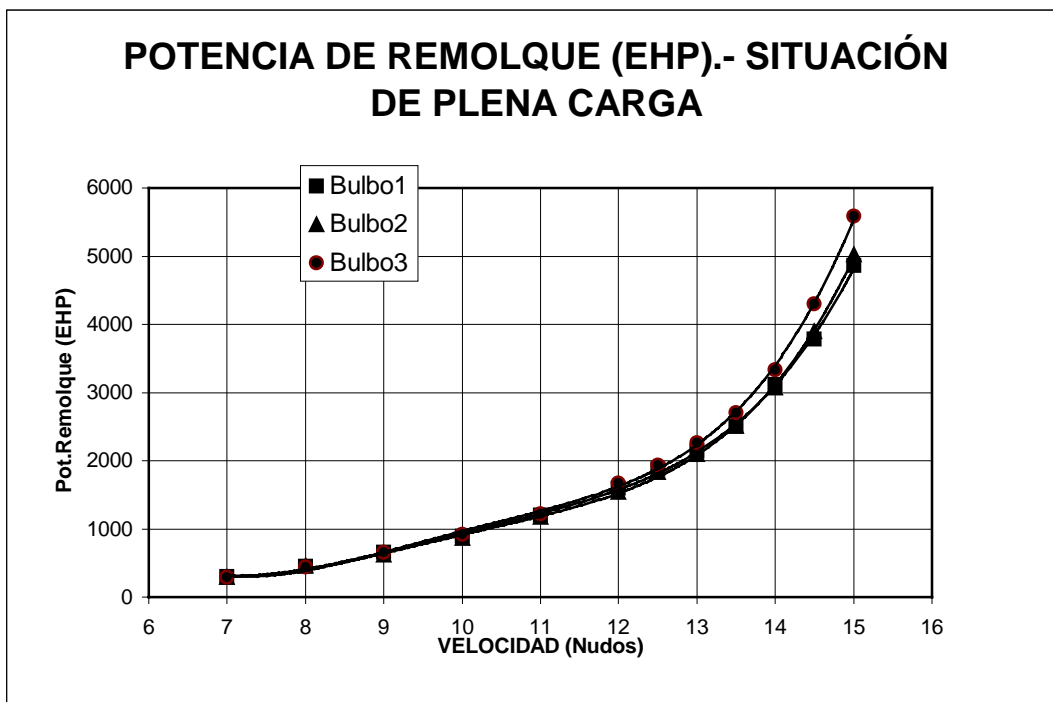


Figura 2.5

## 2.4.- Ensayos en olas regulares.

### 2.4.1.- Oleaje utilizado

El estado de la mar que se quería modelizar para los ensayos de resistencia añadida en olas era el estado de la mar Beaufort 6, caracterizado por el inicio de la formación de olas largas con la existencia muy pronunciada de “borreguitos”, acompañado con viento calificado como “fresco”.

De acuerdo con la Tabla 5.1 “Definition of Sea Conditions: Wave and Sea for Fully Arisen Sea” (8), un valor medio de la altura de olas para este estado de la mar es de 2.35 m como valor medio y 3.75 m como valor significativo. Se eligió una altura de 2.9 m que coincide con la altura significativa de ola del espectro Pierson-Moskowitz para un estado de la mar Beaufort 6. Igualmente este valor queda confirmado con la información contenida en (9). El período elegido fue de 6.75 segundos. En (8), se indica un valor de 7 segundos para el período medio de un mar de grado Beaufort 6.

De todo lo anterior se deduce que los valores ensayados, olas regulares de 2.9 m de altura y 6.75 s de período representan adecuadamente un estado de la mar Beaufort 6.

### 2.4.2.- Resultados en olas regulares.

En las figuras 2.6 y 2.7 se presentan los resultados de los ensayos de remolque en olas regulares en ambas situaciones de carga: lastre y plena carga respectivamente. Es evidente que el bulbo bajo es el que proporciona peores resultados. Los otros dos bulbos dan resultados muy similares, el bulbo intermedio (bulbo 2) aporta valores ligeramente menores de la resistencia aunque no sean totalmente definitivos (mejora del orden del 1% para 13 nudos tanto a plena carga como en lastre).

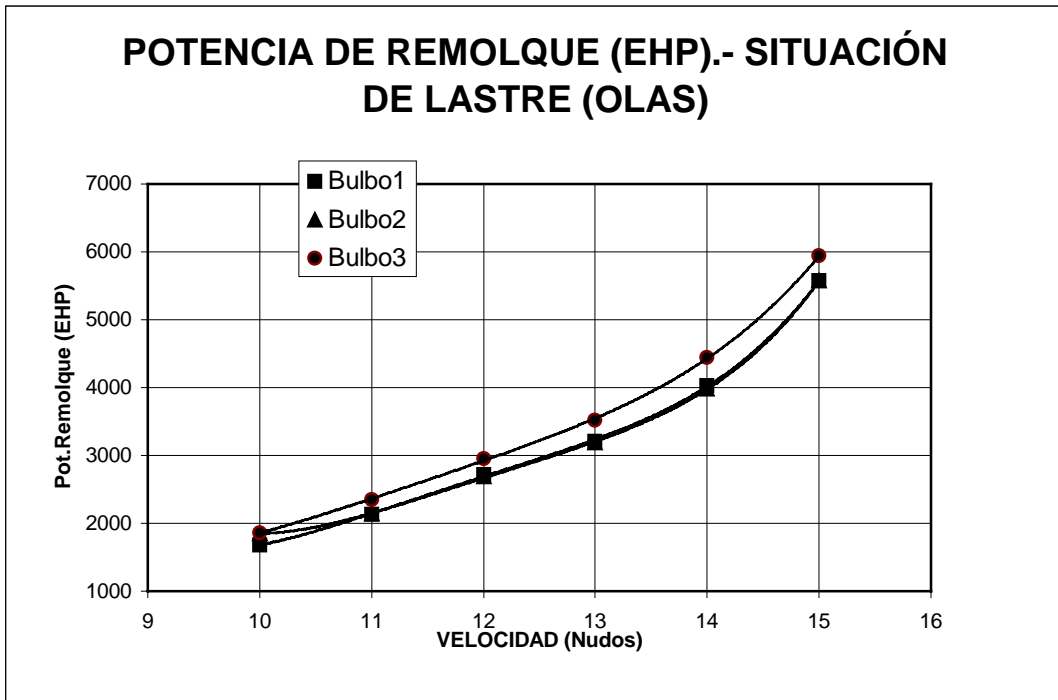


Figura 2.6

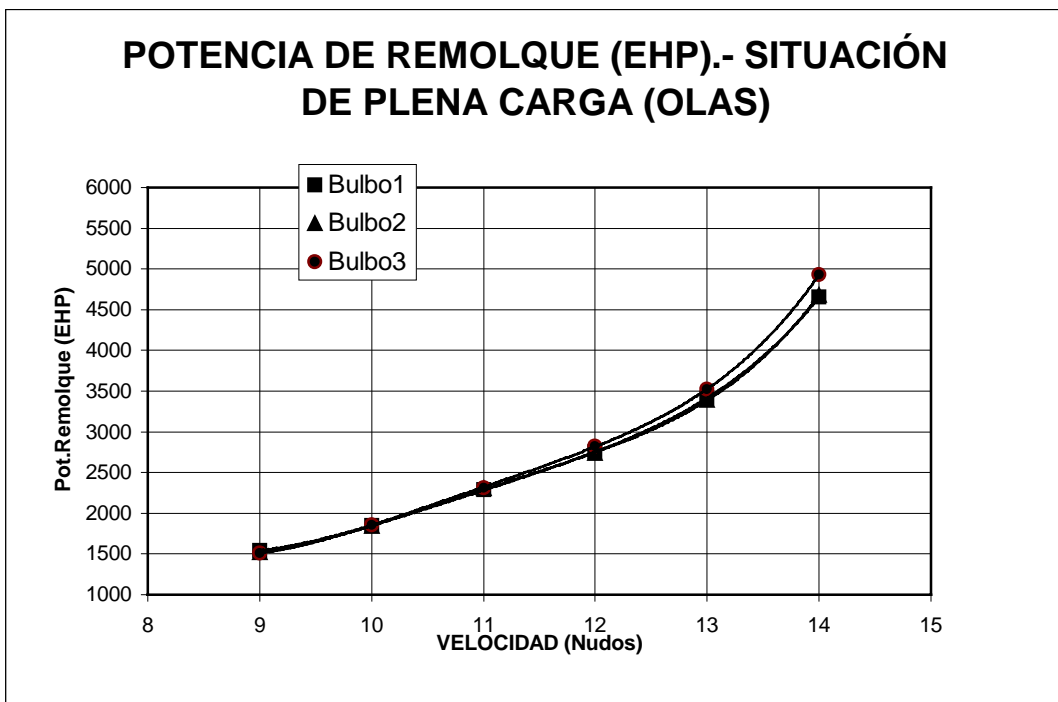


Figura 2.7

### 3.- ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO EN LA MAR.

#### 3.1.- Descripción del Programa “Training and Mobility of Researchers. Access to Large Scale Facilities”.

Los ensayos de comportamiento en la mar han sido financiados en su totalidad por la Unión Europea (UE) dentro de su programa de Acceso a Grandes Instalaciones (“Training and Mobility of Researchers. Access to Large Scale Facilities”). El objetivo principal de este programa es permitir el uso de las grandes instalaciones europeas de investigación por parte de grupos de investigadores que normalmente no tienen la capacidad económica suficiente para cubrir los grandes costes asociados. Normalmente se trata de grupos pertenecientes a Universidades o pequeñas empresas de ingeniería. Como ventaja adicional se consigue fomentar la colaboración entre investigadores de los distintos países de la UE.

El Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo ha sido clasificado por la Comisión Europea como una Gran Instalación lo que le permite ofrecer el uso completamente gratuito de sus instalaciones durante un total de unos cuarenta días al año. Los costes implicados son cubiertos totalmente por la UE. Los investigadores que hacen uso de esta posibilidad reciben dinero para sus viajes y estancia.

#### 3.2.- Descripción de las instalaciones

El Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo es un centro de investigación en Hidrodinámica Naval perteneciente al Ministerio de Defensa español. Dispone de tres grandes instalaciones: Canal de Aguas Tranquilas, Túnel de Cavitación y Laboratorio de Dinámica del Buque. Además dispone de departamentos de construcción de modelos, delineación y “Computational Fluid Dynamics (CFD)”.

Los ensayos descritos aquí se realizaron en el Laboratorio de Dinámica del Buque. Éste básicamente es un gran canal de oleaje inaugurado en 1992 y diseñado para estudios de comportamiento en la mar de buques y artefactos “offshore” y ensayos de maniobrabilidad.

El Laboratorio consta de un tanque de 150 por 30 metros con una profundidad de agua de 5 metros. Además dispone de un pozo de 10 por 10 metros con una profundidad total de 10 metros para el ensayo de plataformas en gran profundidad.

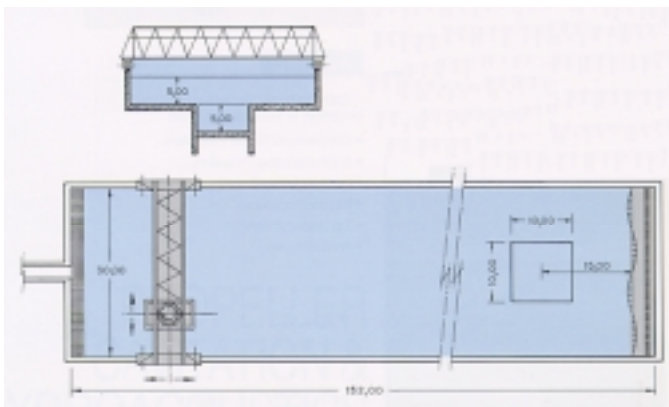


Figura 3.1

En uno de los lados cortos (30 m) se dispone de un generador de olas formado por 60 paletas de 0,5 metros de ancho. Cada paleta dispone de un actuador hidráulico accionado por ordenador de forma que se puede controlar independientemente el movimiento de cada una de ellas. El generador es capaz de producir olas regulares (sinusoidales) de hasta 1,4 metros de altura y períodos de entre 0,8 y 5 segundos. También puede generar olas irregulares (superposición aleatoria de olas regulares) de hasta 0,4 metros de altura significativa. Al estar el generador segmentado en paletas se pueden generar olas en cualquier dirección. En especial, se pueden generar olas superpuestas de direcciones aleatorias para obtener mares de cresta corta.

Las olas generadas en un extremo son absorbidas en el opuesto por medio de una playa de perfil aproximadamente parabólico.

A lo largo del tanque se desplaza un carro del tipo CPMC (“Computerised Planar Motion Carriage”). El carro principal se puede desplazar a todo lo largo del tanque a una velocidad de hasta 5 m/s y con una aceleración máxima de 1 m/s<sup>2</sup>. Bajo este carro principal se mueve transversalmente un subcarro con una velocidad máxima de 3,5 m/s. En la parte inferior del subcarro está la torreta que puede girar 360° y es donde se dispone el modelo a ensayar. Todos los movimientos son controlados en tiempo real por un ordenador de forma que se puede reproducir cualquier movimiento del buque en el plano horizontal.

En unos casos el modelo es arrastrado por el carro de acuerdo con una trayectoria predeterminada, ya sea para medir las fuerzas hidrodinámicas que se producen durante la maniobra o para medir el comportamiento en olas del modelo cautivo. Otras veces el modelo es libre (autopropulsado y con piloto automático o manual) y el carro se limita a seguirlo de forma automática para facilitar la toma de datos.

### **3.3.- Descripción de los ensayos.**

#### 3.3.1.- Modelo e instrumentación

Para los ensayos se utilizó el modelo de la ETSIN con tres proas diferentes que ya se describió con anterioridad. Para los ensayos en olas se le añadieron cubiertas estancas para evitar acumulación de agua. En los ensayos de comportamiento en la mar no basta con reproducir las características estáticas de la distribución de pesos (desplazamiento y calados) sino que es necesario ajustar sus características dinámicas, principalmente sus inercias transversal y longitudinal y la altura de su centro de gravedad.

En este caso se han tomado para las inercias los valores estándar correspondientes a un radio de giro longitudinal del 25% de la eslora entre perpendiculares y un radio de giro transversal del 35% de la manga. El centro de gravedad se ha fijado a una altura (ZG) de 6.376 metros sobre la línea base. Ello implica que, debido a la variación de formas, los GM difiriesen ligeramente para las distintas proas: 1.298, 1.283 y 1.282 metros para las proas 1(bulbo alto), 2(bulbo intermedio) y 3(bulbo bajo) respectivamente.

Sobre el modelo se instaló un sistema de remolque consistente en una barra vertical con rótula en su extremo inferior permitiendo el movimiento libre en sentido vertical y en balance y cabeceo. Este sistema disponía de un potenciómetro lineal y dos angulares para la medida del movimiento vertical, balance y cabeceo.

Se dispusieron un total de cinco acelerómetros, tres verticales a lo largo de la eslora y dos transversales, uno en la toldilla y otro en el puente. Un sensor de ola a proa medía el perfil de ola incidente y otros dos, uno en la cuaderna 19 y otro en la 0 permitieron medir el movimiento relativo entre buque y ola en proa y popa. Por último, se dispuso un captador de presión de slamming (o pantocazos) bajo la quilla en la sección 17.

En este trabajo solamente se considerarán los resultados correspondientes a los tres movimientos (vertical, balance y cabeceo) y al movimiento relativo en proa por ser los más afectados por las formas de proa.

Todas las señales de los distintos sensores se digitalizan simultáneamente en tiempo real a razón de 20 muestras por segundo y por sensor. Los datos se analizan a posteriori mediante el software desarrollado en El Canal de El Pardo. Los resultados que se presentan son siempre a escala del buque (escala real).

### 3.3.2.- Ensayos realizados

Las tres proas se ensayaron a la velocidad de 13 nudos con rumbos relativos a las olas de 0°, 45°, 90°, 135° y 180°. Es decir, cubriendo todo el rango entre mar de popa (0°), través (90°) y mar de proa (180°). Los resultados que se presentan aquí se centran en las olas de proa y través por ser los más interesantes.

Los ensayos se realizaron en olas regulares con las características indicadas en la tabla siguiente:

$\lambda/L_{pp}$	$\lambda$ (m)	T (s)	H (m)	$v = H/\lambda$
0.5	56.6	6.0	1.42	1/40
0.7	79.3	7.1	1.98	1/40
0.9	101.9	8.1	2.55	1/40
1.1	124.5	8.9	3.11	1/40
1.3	147.2	9.7	3.68	1/40
1.5	169.8	10.4	4.25	1/40
0.5	56.6	6.0	0.94	1/60
0.7	79.3	7.1	1.32	1/60
0.9	101.9	8.1	1.70	1/60
1.1	124.5	8.9	2.08	1/60
1.3	147.2	9.7	2.45	1/60
1.5	169.8	10.4	2.83	1/60

Tabla 3.1

Se eligieron olas con una longitud de entre media y una vez y media la eslora del buque y con dos pendientes diferentes para poder estudiar los posibles efectos no lineales. La ola de 1,5  $L_{pp}$  y pendiente de 1/40 no se ensayó por resultar demasiado grande para el modelo. Por lo tanto, se realizaron un total de 165 ensayos (55 para cada proa).

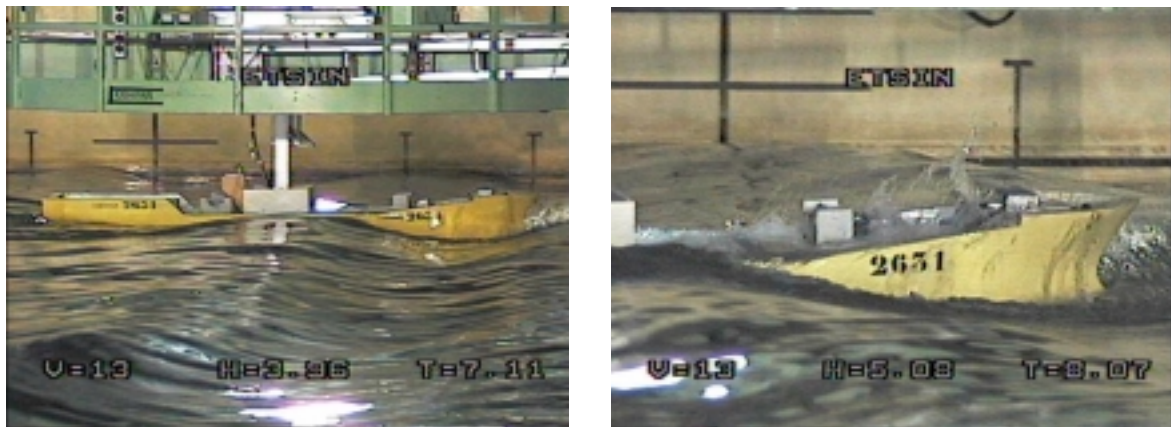


Figura 3.2

### 3.4. Resultados de los ensayos de comportamiento en la mar.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de comportamiento en la mar para la condición de plena carga y 13 nudos de velocidad. Los valores de las RAO's representados, son la media de los obtenidos en los ensayos para cada una de las pendientes ensayadas, 1/40 y 1/60, la siguiente figura muestra la comparación de las dos pendientes para la RAO del movimiento de cabeceo en mares de proa de la primera proa.

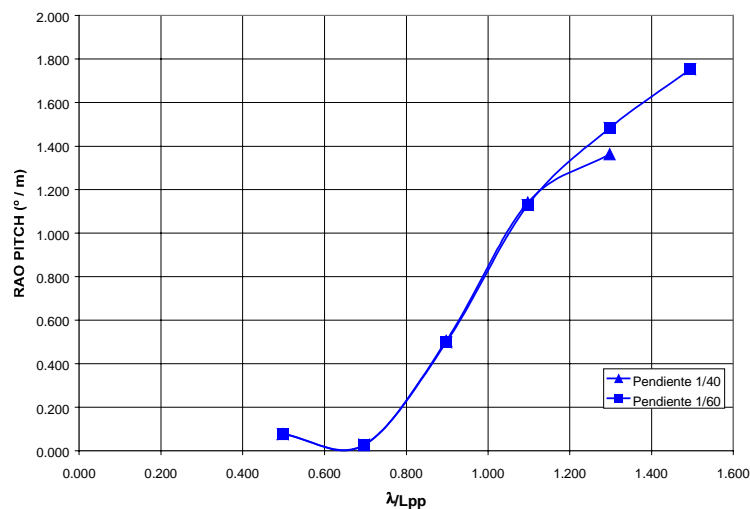


Figura 3.3. Primera proa. RAO de “pitch” mares de proa. Comparación de pendientes.

Las figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 muestran la comparación de las tres proas, en mares de proa (180°), para las siguientes RAOs: movimiento vertical (heave), movimiento de cabeceo (pitch), aceleración en la cuaderna 18, ola en proa y presión en la proa bajo la quilla (presión de slamming).

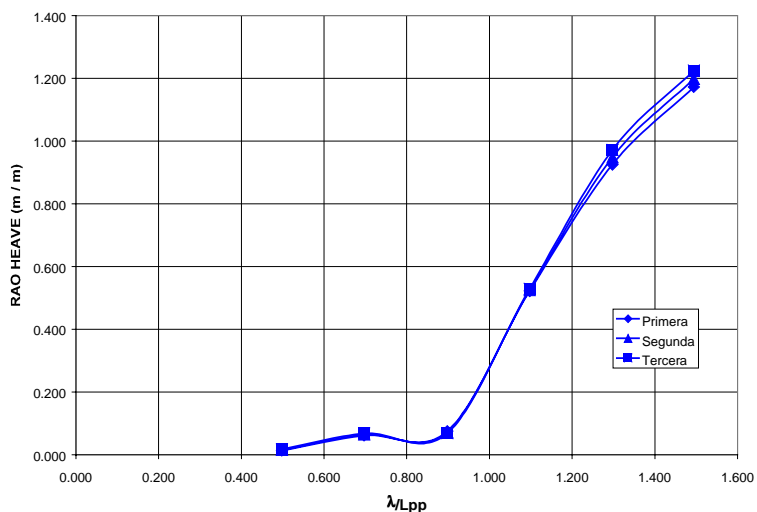


Figura 3.4. RAO de movimiento vertical, mares de proa.

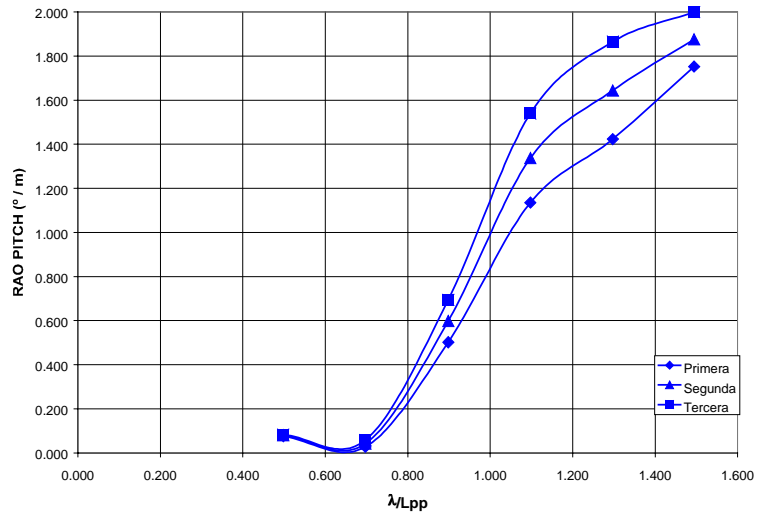


Figura 3.5. RAO de movimiento de cabeceo, mares de proa.

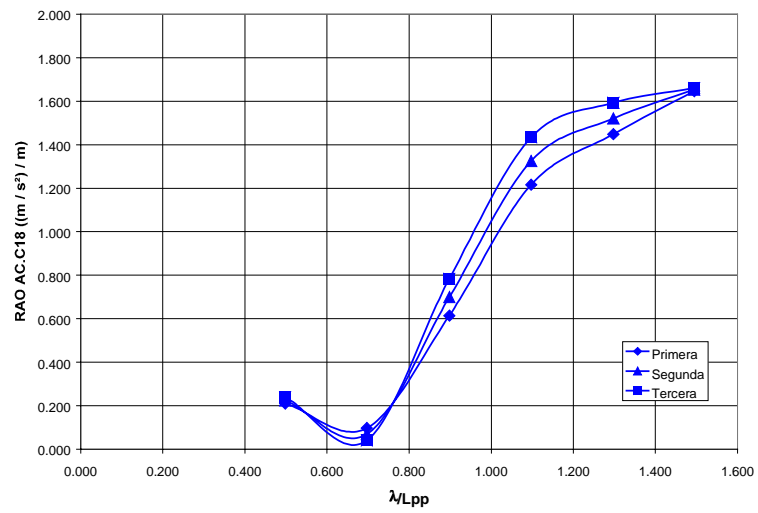


Figura 3.6. RAO de aceleración en proa, mares de proa.

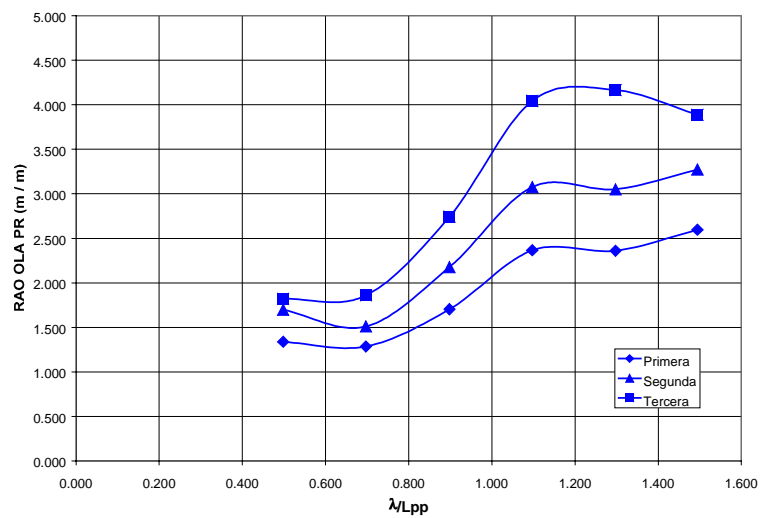


Figura 3.7. RAO de ola en proa, mares de proa.



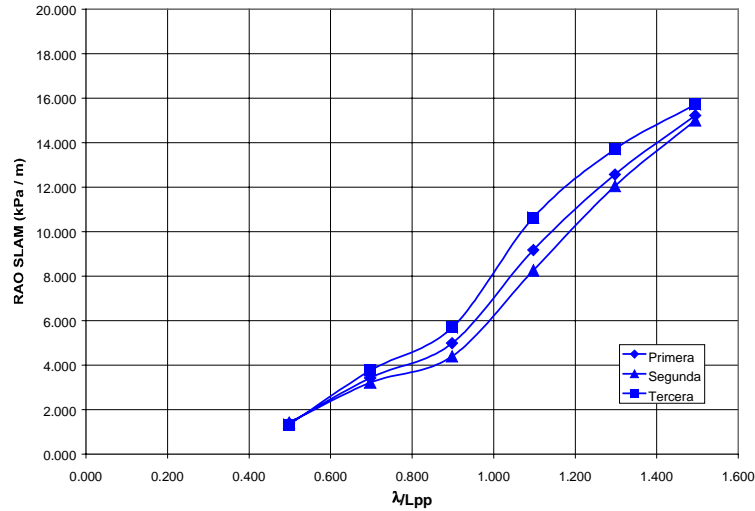


Figura 3.8. RAO de presión en proa, mares de proa.

Se puede apreciar en las figuras anteriores que para mares de proa, la tercera proa es la que peores resultados da en cuanto a comportamiento en la mar se refiere, ya que tiene una mayor respuesta al movimiento de cabeceo, se alcanzan valores de RAO para el cabeceo por encima de  $2.0^\circ/m$  frente a los  $1.7^\circ/m$  que alcanza la primera proa. Además este mayor movimiento de cabeceo lleva consigo una mayor aceleración, una mayor ola en proa y una mayor presión bajo la quilla en la cuaderna 17.

Para el movimiento vertical no se aprecian apenas diferencias entre las tres proas, esto es debido a que el efecto del bulbo para este movimiento es menor.

Las figuras 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 muestran la comparación de las tres proas, en mares de través ( $90^\circ$ ), para las siguientes RAOs: movimiento vertical (heave), movimiento de cabeceo (pitch), aceleración en la cuaderna 18, ola en proa y presión en la proa bajo la quilla.

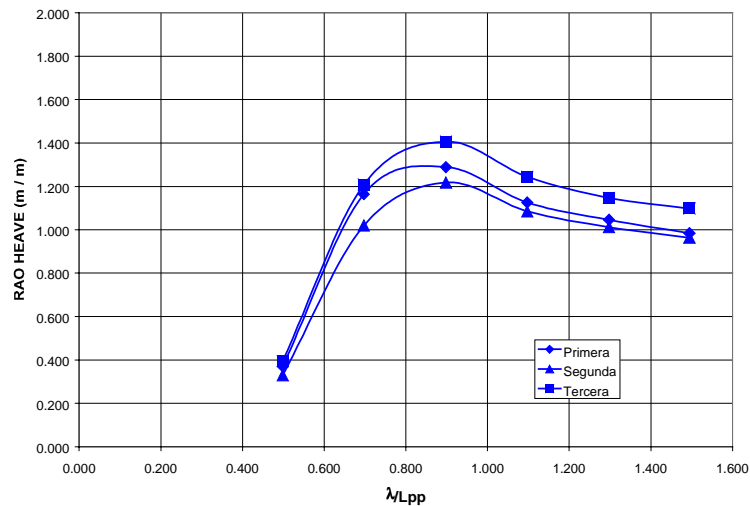


Figura 3.9. RAO de movimiento vertical, mares de través.

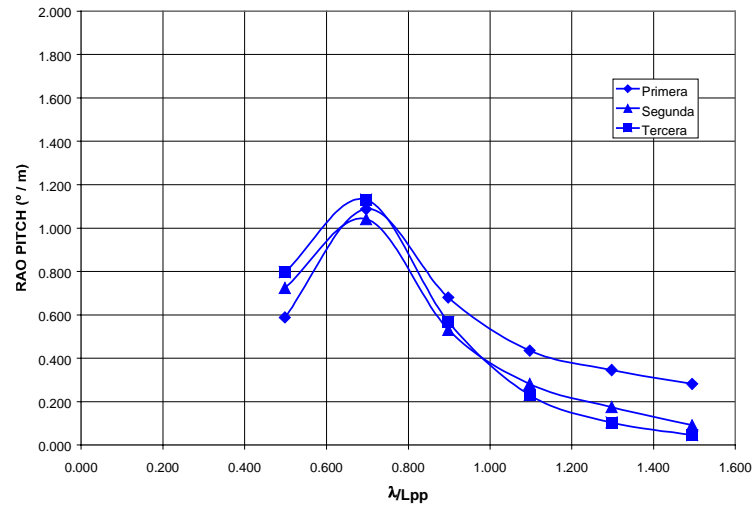


Figura 3.10. RAO de movimiento de cabeceo, mares de través.

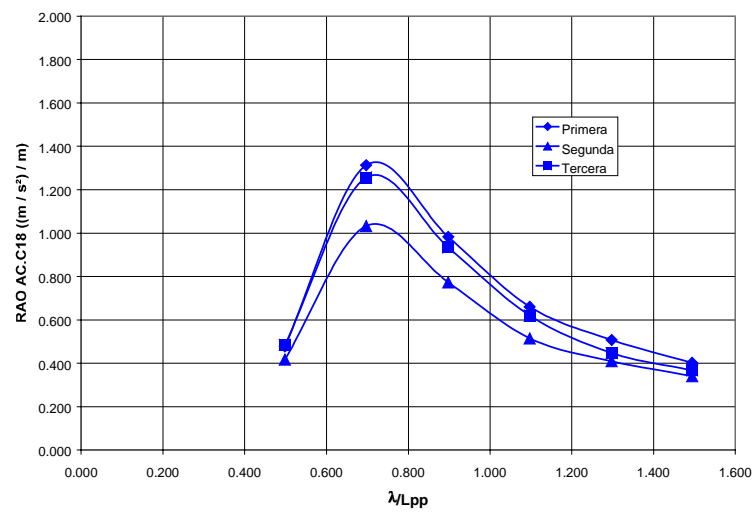


Figura 3.11. RAO de aceleración en proa, mares de través.

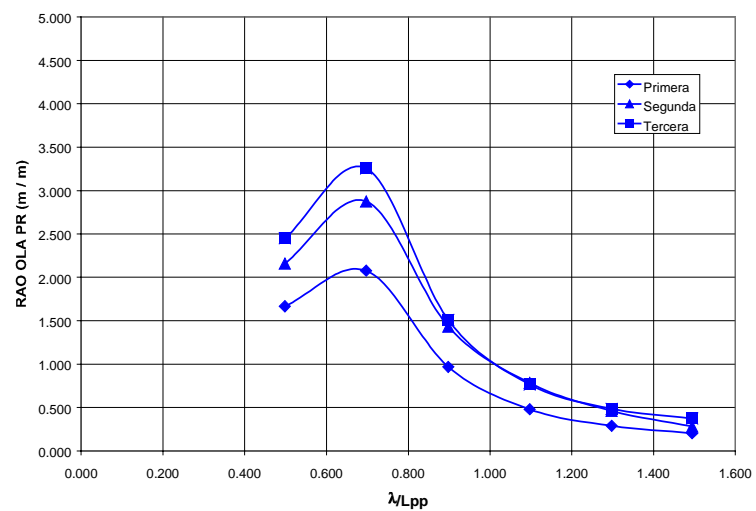


Figura 3.12. RAO de ola en proa, mares de través.

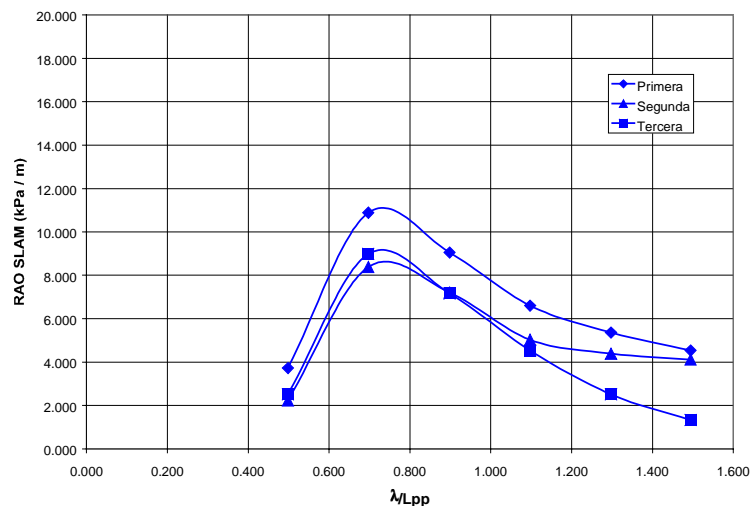


Figura 3.13. RAO de presión en proa, mares de través.

Para mares de través las diferencias entre las tres proas no son tan significativas como en los mares de proa. Aún así la tercera proa sigue estando entre las peores, teniendo en la zona de resonancia mayor movimiento de cabeceo, mayor movimiento vertical y por lo tanto mayor ola en proa y mayor aceleración en la cuaderna 18.

#### 4.- CONSIDERACIONES FINALES.

De lo expuesto en apartados anteriores se pueden señalar las siguientes consideraciones a modo de conclusiones:

- Las diferencias encontradas en los distintos ensayos realizados no son en muchos casos muy significativas. Este hecho debe achacarse a que las formas proyectadas son formas reales dentro de las tres variantes de bulbo alto, intermedio y bajo, y en ningún caso meramente académicas y que las variaciones contempladas sólo están referidas al bulbo de proa.
- Para los ensayos de remolque en aguas tranquilas, los peores resultados los aporta el bulbo bajo, siendo el bulbo intermedio el que aporta mejores resultados de forma global, sólo superado por el bulbo alto en la condición de plena carga para altas velocidades.
- En los ensayos de resistencia añadida en olas regulares, nuevamente la carena del bulbo bajo es la de peores resultados siendo los resultados de los otras dos carenas muy similares con una ligerísima superioridad del bulbo intermedio. Este hecho se constata con los resultados de comportamiento en la mar, dado que la carena de bulbo bajo es la que mayor RAO de altura de ola en proa proporciona y además el cabeceo es mucho mayor.
- Al igual que ocurre en los ensayos de remolque en aguas tranquilas, los peores resultados del buque frente a las olas los aporta la tercera proa, es decir, el bulbo bajo. Los resultados de las otras dos proas son muy discutidos, ya que la primera de las proas, bulbo alto, frente a la segunda de las proas, bulbo intermedio, tiene mejor comportamiento en cuanto al cabeceo y la aceleración de proa, pero más presión de slamming.

## **AGRADECIMIENTOS.**

Todo trabajo de investigación es fruto de un equipo humano, el presente trabajo no es una excepción y por ello debe reconocerse la labor de los investigadores D. Ricardo Abad Arroyo, D. Eloy Carrillo Hontoria, D. José F. Núñez Basáñez, D. Ricardo Zamora Rodríguez y D. Jesús Valle Cabezas, el maestro carpintero D. Jerónimo Lázaro Merinero, autor material de los modelos, D<sup>a</sup> Riansares Gómez García, responsable de la labor administrativa y por último y no por ello menos importante la labor de los siguientes alumnos con cuya aportación han aprendido a amar un poco la investigación hidrodinámica: D. J. Ramón Rodríguez García, D. José L. Pérez Martínez, D<sup>a</sup> Teresa Quesada Rodríguez, D. Angel Manuel Fernández Alvarez, D. Jorge Barredo López y D. Raúl Estaire Gómez.

Por parte del Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo se quiere agradecer el trabajo realizado por el siguiente equipo de investigación: Juan Alberto Vecino Montalvo, Cesa Gutierrez, Jose María Riola, Luis Bernal, Jose Luis Parejo, Francisco Requena y Jesús Villaseñor.

## **REFERENCIAS.-**

- [1] Taylor, D.W., "Influence of the Bulous Bow on Resistance". Marine Engineering and Shipping Age. Septiembre 1923.
- [2] Havelock, T.H., "The Wave Pattern of a Doublet in a Stream", The Collected Papers of Sir Thomas Havelock on Hydrodynamics. C. Wigley Editor. Office of Naval Research. Department of the Navy. 1963.
- [3] Wigley, W.C.S., "The Theory of Bulbous Bow ind its Practical Application". Transac. NECIES, Vol. 52, 1935-1936.
- [4] Weimblum, G., "Theorie des Wultschiffe". Schiffbau Bd.37. 1936.
- [5] Eckert, E. Y Sharma, S.D., "Bow Bulbs for Slow, Full-Form Ships". SNAME. Technical and Research Bulletin 1-33. New York. 1973
- [6] Baba, E., "A New Component of Viscous Resistance of Ships". Journal of Zosen Kiokai. N° 125. 1969.
- [7] Rem, A., " Basic Aspects of Manoeuvring and Course keeping". Training Course Hydrodynamics in Ship Design. MARIN. Noviembre 1992.
- [8] Bhattacharyya, R., ""Dynamics of Marine Vehicles", pág. 104, John Wiley & Sons. New York. 1972
- [9] Gran, S., "A Course in Ocean Engineering" (Devepolments in Marine Technology, N° 8). ELSEVIER, 1992.