

# **Validación de Resultados Numéricos en la Predicción de Comportamiento en la Mar de Buques Pesqueros**

F. Pérez-Arribas<sup>1</sup>, R. Zamora<sup>1</sup>, L. Pérez-Rojas<sup>1</sup> & J. Freiria<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Canal de Ensayos Hidrodinámicos - E.T.S.I.N., Universidad Politécnica de Madrid; Madrid, España

<sup>2</sup>Canal de Ensayos - Facultad de Ingeniería, Universidad de la República; Montevideo, Uruguay

## **Resumen**

*Uno de los aspectos más relevantes en la utilización de modelos matemáticos aplicados a fenómenos físicos es la confianza que los operadores tengan en los resultados, reconociendo ciertos márgenes de incertidumbre. La metodología de validación de estos modelos consiste en la comparación de resultados teóricos con datos obtenidos del prototipo. Sin embargo, por lo general no se cuenta con el prototipo o las dificultades prácticas de experimentación en condiciones reales hacen imposible la obtención de datos para estudios comparativos. Ante esta dificultad se deben obtener datos de otras fuentes confiables. En el ámbito de la Ingeniería Naval la metodología adoptada es la modelación física en canales de prueba basada en la teoría de similitud.*

*El empleo del Canal de Pruebas y la modelación física en aplicaciones navales ha demostrado sus bondades en más de un siglo de historia, desde la determinación de la resistencia hidrodinámica del agua sobre el casco hasta las aplicaciones más específicas como predicción de cavitación en hélices. El presente trabajo muestra la aplicación de esta herramienta para la validación de modelos matemáticos desarrollados para predecir los movimientos de buques sobre las olas.*

## **Abstract**

*One of most relevant aspects of utilization of mathematical models on physical phenomena is the operator confidence about results and uncertainty margin. Validation methodology consist on comparing theoretical results with prototype data. However, actual data is not available in general, as prototype do not exist or exists practical difficulties to obtain it. Data may be obtain from other sources, such as physical modelling, universally adopted by Naval Engineering practices.*

*The use of flume tank on naval application has demonstrated its reliability through more than a century on several fields as resistance or cavitation prediction. The present work shows how this tool is applied to validate mathematical models of ship free motions heave and pitch for fishing vessels.*

## **Introducción**

*Es bien conocido el efecto que la mar gruesa tiene sobre el rendimiento de un buque en todos los aspectos operativos. Todas las actividades abordo toman más tiempo que cuando el mar está en relativa calma debido a las dificultades derivadas de las aceleraciones y movimientos bruscos. En condiciones extremas el buque puede llegar a encallar o incluso hundirse, siendo ésta el último paso en la pérdida de eficiencia.*

*Si bien estas afirmaciones son ciertas en la generalidad de los casos, son extremadamente sensibles en buques pesqueros, sobre todo por la relación de sus tamaños con la longitud de onda de las olas encontradas, las características de estabilidad y las condiciones de trabajo abordo (Pérez Rojas, 1982; Roberts, 2002).*

*Los movimientos del buque sobre las olas han sido modelados teóricamente, pero existen dificultades prácticas para validar dichos modelos. Los ensayos en canales de prueba con modelos a escala reducida permiten obtener resultados experimentales que respalden los resultados numéricos. Adicionalmente, el comportamiento del modelo y como es afectado por distintas condiciones de mar puede ser registrado para utilizar en forma comparativa con datos del prototipo en condiciones similares (Bass et al, 2003; Pérez Rojas et al, 2003).*

*El objeto del presente trabajo es mostrar la validación de modelos matemáticos desarrollados para evaluar las amplitudes máximas de los movimientos de arfada y cabeceo en buques pesqueros, con una descripción breve del desarrollo de los mismos.*

## **Modelos Numéricos**

*El beneficio de esta herramienta es tener una rápida estimación de las amplitudes de los movimientos de arfada y cabeceo por intermedio de fórmulas experimentales en las cuales intervienen un conjunto de parámetros geométricos y dinámicos relacionados con el buque, y otro conjunto de parámetros relacionados con la configuración del estado del mar.*

*Estas formulaciones analíticas son aplicadas a diferentes configuraciones de buques, las cuales son derivadas de tres formas tipo iniciales, correspondientes a tres buques representativos de la flota pesquera española. La generación de las diferentes configuraciones se logra mediante la variación sistemática de las dimensiones y relaciones para los buques testigo, lo que ha representado más de 7000 arreglos distintos descritos en la Tabla 1 (Perez Rojas, 2003).*

*Tabla 1. Formas analizadas*

<i>Buque Tipo</i>	<i>Dimensiones Principales Lpp x B x D</i>	<i>Formas escaladas</i>
<i>Ship A</i>	<i>17.8 x 6.0 x 3.0</i>	<i>2700</i>

Ship B	13.4 x 4.7 x 2.2	2700
Ship C	29.0 x 8.0 x 3.7	2160

La aplicación de las formulaciones paramétricas a estas formas llevó a la representación análoga de los movimientos de arfada y cabeceo mediante el cálculo estadístico de los coeficientes funcionales de las respectivas variables no dimensionales:  $B/T$ ,  $\Delta^{1/3}/L_{pp}$ ,  $L_{pp}/B$ ,  $x_B/L_{pp}$ ,  $x_F/L_{pp}$ ,  $C_F$ ,  $C_B$ ,  $C_P$ ,  $GM_T$ , y variables dimensionales: altura de ola significativa,  $H_{1/3}$  (m), período,  $T_0$  (s), velocidad del buque,  $V$  (nudos), y ángulo de incidencia o encuentro,  $\mu$  ( $^\circ$ ).

A las 7560 configuraciones se aplicó la teoría de rebanadas a los efectos del cálculo dinámico, y posteriormente los resultados fueron analizados mediante regresiones analíticas obteniendo los modelos numéricos correspondientes a ambos movimientos. Los límites en las variaciones paramétricas se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Rango de variación paramétrica

Parámetros	Buque A	Buque B	Buque C
$B/T$	2.20 - 2.70	2.63 - 3.21	2.00 - 2.44
$\Delta^{1/3}/L_{pp}$	2.77 - 3.51	2.60 - 3.28	2.48 - 3.11
$L_{pp}/B$	2.43 - 3.63	2.33 - 3.48	2.97 - 4.43
$C_B$	0.60 - 0.67	0.55 - 0.60	0.59 - 0.63
$C_P$	0.68 - 0.75	0.64 - 0.70	0.67 - 0.72
$GM_T$	0.56 - 1.14	0.28 - 0.95	0.30 - 0.76

Luego del análisis completo de las formas se desarrollan las ecuaciones para el cálculo de la amplitud del movimiento de arfada y del movimiento de cabeceo mediante la determinación de los coeficientes aplicados a cada uno de los parámetros descritos.

La metodología numérica está basada en la Teoría de las Rebanadas, siendo utilizado el software CMAR2D para la predicción de los movimientos del buque; este programa se fundamenta en la teoría de flujo potencial, no considerándose propiedades viscosas del fluido; para tener en cuenta estos efectos se han introducido coeficientes de amortiguamiento apropiados.

La Teoría de Rebanadas tiene un rango de aplicación limitado. Por lo general se debe limitar a relaciones  $\lambda / L_{pp} \sim [ 0.5 - 3.5 ]$  ( $\lambda =$  longitud de onda); otras hipótesis de trabajo son: altas frecuencias de encuentro, bajas velocidades de avance, y buques esbeltos.

A pesar de estas limitaciones, las curvas numéricas RAO comparadas con las obtenidas en ensayos experimentales muestran una buena correlación (los valores del Número de Froude utilizados fueron menores que 0.36). También a pesar de la falta de esbeltez de los buques pesqueros, la teoría de rebanadas funciona con buenos resultados para buques con relaciones bajas  $L_{pp} / B$ , tanto como 2.5. Los valores RAO para los movimientos verticales en olas muy largas



$$\theta = b_1 \cdot (B/T) + b_2 \cdot (\Delta^{1/3}/L_{pp}) + b_3 \cdot (L_{pp}/B) + b_4 \cdot (x_B/L_{pp}) + b_5 \cdot C_F + b_6 \cdot H_{1/3} + b_7 \cdot (H_{1/3})^3 + b_8 \cdot T_0 + b_9 \cdot GM_T + b_{10} + b_{11}(V^\alpha + 1) \quad (2.)$$

donde

$\theta$  = amplitud máxima (cabeceo);  $b_i$  = coeficientes generados estadísticamente

Desviación Estándar      0.1197 (11.98 %)  
Estimador  $R^2$               0.9957

Los coeficientes  $b_i$ , como fue mencionado, son dependientes de la velocidad y el ángulo de incidencia de la ola:

para  $i = 1$  a  $10$

$$b_i = (a'_{i1} + a'_{i2} \cdot \mu + a'_{i3} \cdot \mu^2) \cdot v^2 + (a'_{i4} + a'_{i5} \cdot \mu + a'_{i6} \cdot \mu^2) \cdot v + (a'_{i7} + a'_{i8} \cdot \mu + a'_{i9} \cdot \mu^2) \quad (3.)$$

donde

$\mu$  = ángulo de incidencia;  $v$  = velocidad de avance del buque.

para  $i = 1$  a  $10$

$b_{11} = 1.1173$ ,  $\alpha = 0.7457$ .

Los coeficientes  $a'_{ij}$  son mostrados en tabla 4:

Tabla 4. Coeficientes de Regresión para cabeceo,  $b_i = f(a'_{ij})$ .

	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$	$a_{i5}$	$a_{i6}$	$a_{i7}$	$a_{i8}$	$a_{i9}$
$b_1$	-0.0330768	0.0004151	-0.0000013	0.4168141	-0.0048706	0.0000146	-2.9114421	0.0402605	-0.0001080
$b_2$	-0.1409648	0.0018863	-0.0000055	1.2399164	-0.0144718	0.0000418	-4.9509878	0.0696842	-0.0001849
$b_3$	-0.0639065	0.0008569	-0.0000025	0.5737026	-0.0069155	0.0000214	-2.6327636	0.0375183	-0.0001133
$b_4$	0.2565755	-0.0035847	0.0000149	-3.9031403	0.0431715	-0.0001859	48.986943	-0.6954585	0.0019603
$b_5$	0.6318900	-0.0091812	0.0000269	-4.9361479	0.0661355	-0.0001965	16.894743	-0.2546103	0.0006663
$b_6$	0.0043081	-0.0000735	0.0000001	-0.0285328	0.0008314	-0.0000012	-4.5079854	-0.0683610	-0.0001927
$b_7$	-0.0001049	0.0000017	-3.60 e-09	0.0008571	-0.0000190	4.24 e-08	0.0618286	-0.0009419	0.0000027
$b_8$	-0.0023163	0.0000349	-7.80 e-08	0.0193964	-0.0003491	0.0000008	0.6828553	-0.010474	0.0000305
$b_9$	-0.0089899	0.0001500	-0.0000003	0.0105501	-0.0005262	0.0000008	1.8449365	-0.026195	0.0000644
$b_{10}$	0.0141286	0.0006240	-0.0000041	-0.2332338	-0.0028525	0.0000373	-14.63183	0.2324656	-0.0006395

### Resultados numéricos

Se consideraron dos buques a los efectos de la aplicación de los modelos de arfada y cabeceo, siendo sus dimensiones y datos hidrostáticos los que se muestran en tablas 5 y 6:

Tabla 5. Modelo de Buque 1 – Dimensiones y propiedades hidrostáticas

Eslora entre Perpendiculares ( $L_{pp}$ ), m	13.37
Manga (B), m	4.70
Calado en Perpendicular de Popa, m	1.92
Calado en Perpendicular de Proa, m	1.31
Calado Medio (T), m	1.62
Desplazamiento ( $\Delta$ ), ton	62.675
LCB desde Perpendicular de Popa ( $x_B$ ), m	5.56
LCF desde Perpendicular de Proa ( $x_F$ ), m	5.37
Coeficiente de Bloque ( $C_B$ )	0.419
Coeficiente Prismático ( $C_P$ )	0.631
Coeficiente de Flotación ( $C_F$ )	0.848
Altura Metacéntrica ( $GM_T$ )	0.62



Figura 1 – Modelo de Buque 1 – Vista General

Tabla 6. Modelo de Buque 2 – Dimensiones y propiedades hidrostáticas

Eslora entre Perpendiculares ( $L_{pp}$ ), m	19.00
Manga (B), m	6.60
Calado en Perpendicular de Popa, m	3.56
Calado en Perpendicular de Proa, m	2.67
Calado Medio (T), m	3.11
Desplazamiento ( $\Delta$ ), ton	244.655
LCB desde Perpendicular de Popa ( $x_B$ ), m	7.22
LCF desde Perpendicular de Proa ( $x_F$ ), m	7.21
Coeficiente de Bloque ( $C_B$ )	0.612
Coeficiente Prismático ( $C_P$ )	0.727
Coeficiente de Flotación ( $C_F$ )	0.823
Altura Metacéntrica ( $GM_T$ )	0.50



Figura 2 – Modelo de Buque 2 – Vista General

Los resultados de la aplicación de los modelos matemáticos de arfada y cabeceo se muestran en las Tablas 8 a 11 indicados con subíndice "num".

### Experimentos con modelos físicos

#### Modelos

Los factores geométricos y cinemáticos seleccionados para los modelos físicos fueron:

$$\text{Modelo 1} \quad e_{L1} = 1 / 8, e_{v1} = 1 / \sqrt{8}$$

$$\text{Modelo 2} \quad e_{L2} = 1 / 13, e_{v2} = 1 / \sqrt{13}$$

#### Configuración del tren de olas

Se consideraron condiciones de mar representativas para la zona de operación; de acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization - WMO) los códigos de estado del mar se muestran en la siguiente tabla (Guedes, 1995):

Tabla 7. Códigos de Estado del Mar (WMO)

Estado del Mar Código	Altura Significativa de Ola m	Período s	Descripción
3	0.875	7.5	Suave
4	1.875	8.8	Moderado
5	3.250	9.7	Grueso

La ITTC recomienda el espectro de energía de Bretschneider para representar un estado de mar de olas irregulares a los efectos del cálculo numérico. La densidad de energía está caracterizada por:

$$S_{\xi} = \frac{A}{\omega^5} \cdot e^{\frac{-B}{\omega^4}} \quad (4.)$$

donde

$$A = \frac{173 \cdot (H_{1/3})^2}{\bar{T}^4} \quad (5.)$$

$$B = \frac{691}{\bar{T}^4} \quad (6.)$$

$\bar{T}$  = Período (Valor medio);  $H_{1/3}$  = Altura de Ola significativa

La respuesta del buque al espectro de energía para un movimiento "m" debe escribirse como:

$$S_m(\omega_e) = S_\xi \cdot (\omega_e) |H_m(\omega_e)|^2 \quad (7.)$$

siendo

$$S_\xi(\omega_e) = \frac{S_\xi(\omega)}{1 - \left( \frac{2 \cdot \omega \cdot V}{2 \cdot g} \right) \cdot \cos \alpha} \quad (8.)$$

el espectro de amplitudes de ola incidente para un buque que desarrolla una velocidad V;

$$|H_m(\omega_e)|^2 \quad (9.)$$

es denominado "Operador de Respuesta de Amplitud" (RAO) para el movimiento "m".

Los operadores fueron escogidos de tal manera que  $(\eta_i/\xi)^2$  con  $i = 2, 3, \dots, 6$  para movimientos del buque y  $(s_p/\xi)^2$  para movimientos relativos respecto a la superficie de la ola.

La densidad espectral para aceleraciones fue calculada utilizando:

$$RAO(\text{acceleration}) = \omega_e^4 \cdot RAO(\text{movement}) \quad (10.)$$

Los resultados fueron presentados en forma RMS, siendo

$$rms = \sqrt{m_0} \quad (11.)$$

donde  $m_0$  es descripta por

$$m_0 = \int_0^\infty S_m(\omega_e) \cdot d\omega_e \quad (12.)$$

### **Resultados con modelos físicos**

Los modelos fueron ensayados en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas a dos velocidades representativas, 4 y 8 nudos (prototipo).

Los movimientos del modelo son registrados por medio de instrumentos electrónicos. Dos acelerómetros colocados en los extremos de popa y proa miden aceleraciones verticales en esos puntos, mientras tres dispositivos laser permiten

componer la posición angular del modelo y la posición vertical de su centro de gravedad respecto a una referencia fija.

La información registrada es procesada para obtener la correspondencia experimental entre el ángulo de trimado generado por el cabeceo del buque, y el movimiento vertical, arfada, en función del tiempo.

Los valores RMS de arfada y cabeceo se desprenden de los datos experimentales y son mostrados en las tablas 8 a 11 indicados con subíndice "exp".

### Datos Comparativos

El conjunto de datos experimentales (subíndice "exp") y numéricos (subíndice "num") son mostrados en las tablas 8 a 11, correspondientes a ambos buques 1 y 2 para las velocidades predefinidas 4 y 8 nudos.

Tabla 8. Resultados Buque 1, 4 nudos.

$H_{1/3}$ m	$Z_{num}$ cm	$Z_{exp}$ cm	$\theta_{num}$ °	$\theta_{exp}$ °
0.88	30.3	24.0	1.7	1.9
1.88	52.5	51.0	3.0	3.1
3.25	86.6	84.0	4.6	4.4

Tabla 9. Resultados Buque 1, 8 nudos.

$H_{1/3}$ m	$Z_{num}$ cm	$Z_{exp}$ cm	$\theta_{num}$ °	$\theta_{exp}$ °
0.88	33.6	27.0	3.8	2.0
1.88	55.7	55.0	5.2	3.3
3.25	89.9	98.0	6.7	5.7

Tabla 10. Resultados Buque 2, 4 nudos.

$H_{1/3}$ m	$Z_{num}$ cm	$Z_{exp}$ cm	$\theta_{num}$ °	$\theta_{exp}$ °
0.88	23.1	22.0	2.6	1.7
1.88	45.2	48.0	3.9	2.8
3.25	79.3	83.0	5.4	4.1

Tabla 11. Resultados Buque 2, 8 nudos.

$H_{1/3}$ m	$Z_{num}$ cm	$Z_{exp}$ cm	$\theta_{num}$ °	$\theta_{exp}$ °
0.88	26.3	24.0	4.7	3.1
1.88	48.5	51.0	6.0	5.2
3.25	82.6	86.0	7.6	7.7

Las figuras 3 – 10 muestran las tendencias de los resultados obtenidos mediante la aplicación de ambas metodologías

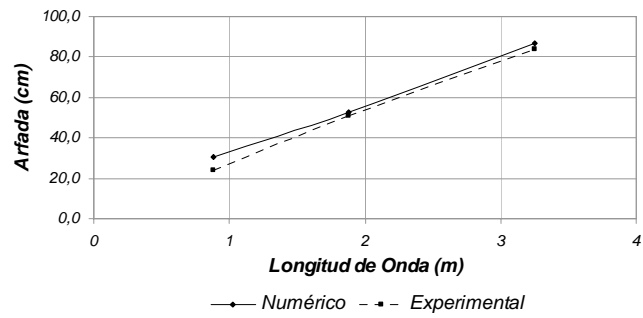


Figura 3 – Arfada - Buque 1, 4 nudos

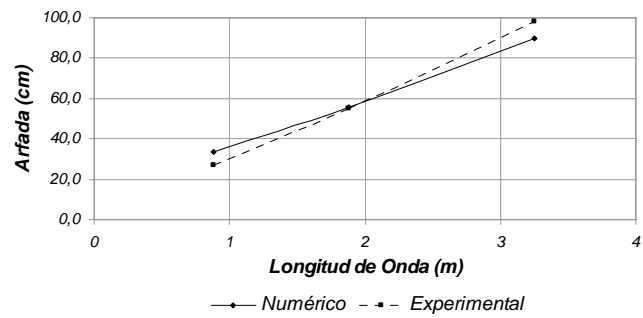


Figura 4 – Arfada - Buque 1, 8 nudos

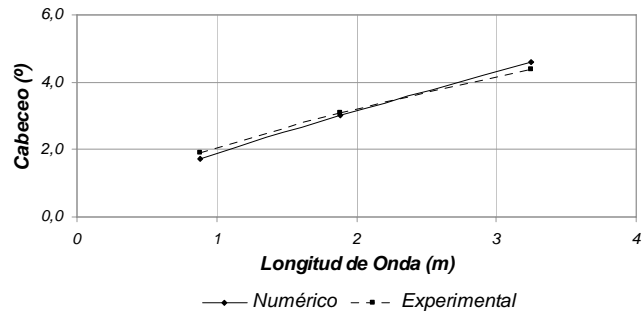


Figura 5 – Cabeceo - Buque 1, 4 nudos

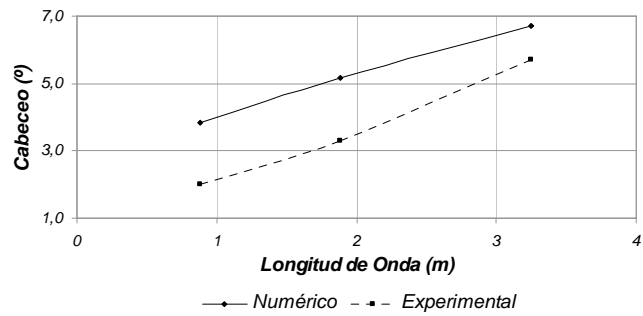


Figura 6 – Cabeceo - Buque 1, 8 nudos

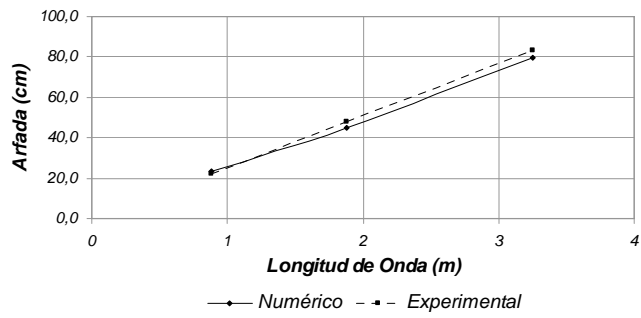


Figura 7 – Arfada - Buque 2, 4 nudos

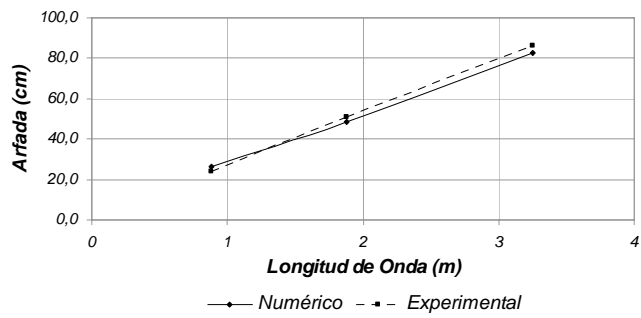


Figura 8 – Arfada - Buque 2, 8 nudos

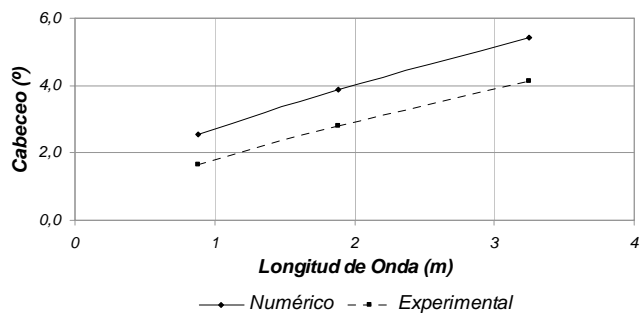


Figura 9 – Cabeceo - Buque 2, 4 nudos

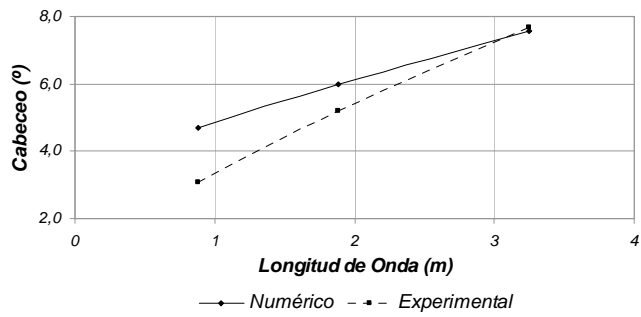


Figura 10 – Cabeceo - Buque 2, 8 nudos

## **Conclusiones**

*Las formulaciones obtenidas para calcular las amplitudes de los movimientos de arfada y cabeceo representan en forma estadísticamente correcta los datos numéricos de los más de 7000 casos de estudio propuestos, representando sus desviaciones estándar un 6% para la arfada y un 12% para el cabeceo. Los resultados de su aplicación a los buques seleccionados, denominados “1” y “2”, muestran resultados numéricamente comparables con observaciones en prototipos para este tipo de embarcaciones.*

*Por otro lado, la correcta modelación de acuerdo a un esquema de flujo que mantiene constante el Número de Froude, permite obtener en forma funcional los movimientos de arfada y cabeceo para una amplia serie de configuraciones de olas. Si bien dichas configuraciones son generadas en forma de olas regulares, la aplicación del espectro de amplitudes de Bretschneider recomendada por la ITTC, permite transformar la información obtenida sobre la base de una distribución de mar irregular.*

*La comparación de ambos resultados, permiten demostrar que el modelo numérico en general lleva a resultados comparables, manteniendo las tendencias de crecimiento y rango de valores. En el caso del movimiento de arfada los valores son comparables para ambos casos y velocidades. En el otro caso, el movimiento de cabeceo muestra una mayor desviación con relación a los valores experimentales; salvo en un caso puntual el resto de las predicciones sobreestiman el fenómeno.*

*La contribución de la modelación física puede ser evaluada en distintos ámbitos. Uno de estos es la verificación primaria de los datos numéricos. El otro es la generación de datos para el ajuste de los modelos numéricos.*

## **Referencias Bibliográficas**

[1] Roberts, S.E.; “Hazardous Occupations in Great Britain”, *Lancet* 2002. pp 543 – 44.

[2] Hall, T.A.; “Stability of capsized Fishing Vessels During Dive Rescue Operations”, *Marine Technology*. July 1997, Vol. 34 No. 3, pp 155 – 180.

[3] Pérez – Rojas, L.; “La seguridad en los buques pesqueros”, *Ingeniería Naval*, October 1982, pp 360 – 379.

[4] Bass, D., Hopkins, D., Bose, N. and Carroll, B.; “Seakeeping Correlation Studies”. *Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Madrid, September 2003. pp 677 – 687.

[5] Pérez – Rojas, L., Abad, R., Pérez – Arribas, F., and Arias, C.; “Some Experimental Results on the Stability of fishing Vessels”. *Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Madrid, September 2003. pp 643 – 653.

[6] Guedes Soares, C.; Fonseca, N. and Centeno, R.; "Seakeeping Performance of Fishing Vessels in the Portuguese Economic Zone". *International Conference on Seakeeping and Weather*, RINA, London, 1995

[7] Pérez – Arribas, F.; Zamora, R.; Pérez – Rojas, L.; Freiria, J.; "A Quick Estimation of Seakeeping Characteristics on Fishing Vessels". *Proceedings of IMAM 2005 - Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources*; International Maritime Association of the Mediterranean; Lisboa, Portugal, Septiembre 2005.