

Coeficiente de amortiguamiento en balance del modelo de un buque pesquero con velocidad de avance

José R. Marín López, PhD.¹, and Juan C. Pinto Loor, Ing. Naval²,

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y Recursos Naturales, Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, jrmarin@espol.edu.ec

²Astilleros Navales Ecuatorianos, Vacas Galindo s/n y Vivero (junto a la ría), jpinto@astinave.com.ec

Resumen– En este trabajo el coeficiente de amortiguamiento en el movimiento de balance del modelo de un buque pesquero tipo sardinero sin y con velocidad de avance es determinado en forma experimental. Dicho parámetro se calcula con registros de oscilación transiente usando un modelo de 2 metros de longitud. Las primeras pruebas, sin velocidad de avance se realizan en una piscina. Para las pruebas con velocidad, el modelo es halado desde el costado de un bote con propulsión fueraborda; los puntos de halado en proa y guía en el espejo (popa) están a la altura de la línea de flotación, lo que permite al modelo oscilar libremente alrededor del eje longitudinal. Para las pruebas, se toman tres condiciones de carga y tres valores de altura metacéntrica, para cada una.

Los registros en tiempo del ángulo de balance son filtrados numéricamente, y con estas señales se determinan los coeficientes de amortiguamiento; finalmente a través de simulaciones los valores de los coeficientes de amortiguamiento son confirmados. Con los resultados del grupo de pruebas sin velocidad de avance, iniciando el movimiento con relativamente altos ángulos de escora, los coeficientes cuadrático y cúbico del amortiguamiento también son calculados. Resultados del segundo grupo de pruebas muestran un gran incremento en coeficiente de amortiguamiento por influencia de la velocidad del modelo. Los resultados se comparan con una muy conocida formulación semiempírica.

Palabras clave — Amortiguamiento en balance, influencia de la velocidad, seguridad de buques pesqueros.

Abstract– In this work the roll motion damping coefficient of a sardine fishing vessel model without and with velocity is experimentally determined. This parameter is calculated from the transient oscillation register using a 2 m long model. The first tests with no velocity, are developed in a pool. For the tests with velocity the model is side-towed from an outboard powered boat; points of pull at the bow and direction guide at transom (stern) are at points of the flotation, which allows the model to freely oscillate around a longitudinal axis. For the tests, three load conditions and three values of metacentric height for each one were analyzed.

Time registers of balance angle are numerically filtered, and with these signals damping coefficients are determined; finally through numerical simulations values for damping coefficients are confirmed. With the results from the first group of tests without velocity, starting the motion with relatively high heel angle, quadratic and cubic coefficients are also estimated. Results from the second group of tests show a large increment of the damping coefficient due to influence of the velocity. Results are compared with those from a well known semiempirical formulation.

Keywords — Roll damping, influence of velocity, fishing vessel safety

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.354>

ISBN: 978-0-9993443-0-9

ISSN: 2414-6390

15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering Innovations for Global Sustainability”, 19-21 July 2017, Boca Raton, FL

I. INTRODUCCIÓN

La evaluación estática de la estabilidad de un buque ha mostrado limitaciones, y la Organización Marítima Internacional empezó desde hace algunos años a desarrollar la Segunda Generación de Criterios de Estabilidad Intacta, [1]. En este análisis de tipo dinámico y por tanto más completo, la amplitud de la respuesta a la acción de las olas depende inversamente de la disipación de energía causada por el efecto de Amortiguamiento, el cual es influenciado por las formas del casco, la velocidad de avance, acción de las quillas de balance, condiciones de carga, entre otros. De hecho, el coeficiente de este efecto es considerado como criterio de comprobación para evitar alguno de los modos de zozobra, [1].

Debido a las complejidades por efectos viscosos y por las olas que se generan, es prácticamente imposible determinar analíticamente el amortiguamiento en balance de un buque, [2]. Una alternativa es el uso de herramientas de CFD (“Computational Fluid Dynamics”) pero el manejo de la turbulencia parece que requiere de parámetros de sintonización no acordados completamente todavía. Por ello otra opción es obtenerlo experimentalmente, incluyendo la influencia de la velocidad de avance, que se ha determinado como un parámetro que lo puede incrementar considerablemente, [3]. En una de las formas más sencillas, se puede lograr arrastrando el modelo a varias velocidades y registrando la curva de extinción de su oscilación desde un ángulo de balance pronunciado.

Los trabajos de Himeno e Ikeda son reconocidos como las referencias básicas para la estimación del coeficiente de amortiguamiento en balance de buques, [4]. También autores como Haddara y Zhang, [5] han realizado estudios experimentales para la determinación del coeficiente de amortiguamiento en balance de buques pesqueros que operan en el Atlántico específicamente, con velocidad de avance y olas de popa; los ensayos experimentales se efectuaron para tres modelos con formas diferentes y el coeficiente fue obtenido mediante el método de energía. Comparando los resultados obtenidos de las pruebas de modelos con los predichos con el método Himeno e Ikeda se comprobó su aplicabilidad para este tipo de buques. También en [6] Cevallos et al efectuaron pruebas sin velocidad de avance, en aguas tranquilas y en condición de máxima carga, para determinar el efecto de quillas de balance sobre el coeficiente de amortiguamiento. Estas

pruebas experimentales se realizaron con tres modelos de buques pesqueros que operan en el Pacífico oriental, y el coeficiente de amortiguamiento fue determinado a partir de las curvas de extinción. Al igual que en la referencia [5] se compararon los resultados obtenidos con los predichos con el método Himeno e Ikeda sin velocidad de avance, y se confirmó su aplicabilidad para este tipo de embarcaciones. Los resultados de las investigaciones con ciertos pesqueros como los japoneses no son completamente adecuados para otros buques pesqueros típicamente empleados en aguas del Pacífico oriental, por las diferencias en formas (esbeltas y afinadas, propias para altas velocidades). Por ello se hace necesario determinar este parámetro en forma experimental, incluyendo el efecto de velocidad de avance.

El objetivo de este trabajo es determinar experimentalmente el coeficiente de amortiguamiento en balance de un buque pesquero con formas típicas empleadas en la región ecuatorial, Pacífico oriental, incluyendo el efecto de la velocidad de avance. Actualmente particularmente en este medio no se ha realizado investigación alguna sobre la influencia de la velocidad de avance sobre el coeficiente de amortiguamiento en balance de buques con formas características locales. Con el presente trabajo mediante pruebas experimentales se pretende obtener dicho coeficiente para con estos resultados poder con mayor precisión garantizar la estabilidad en respuesta dinámica de la embarcación.

II. COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO EN BALANCE DE UN BUQUE

A. Ecuación de Balance Desacoplado de un buque

La ecuación de movimiento de balance desacoplado de un buque, $\phi(t)$, esto es la rotación respecto de un eje longitudinal, en oscilación libre es, [3]:

$$(J_{xx} + m_{44})\ddot{\phi} + N\dot{\phi} + \Delta GZ(\phi) = 0 \quad (1)$$

donde J_{xx} y m_{44} son la inercia seca y añadida respecto del eje x , $N\dot{\phi}$ es el momento debido al amortiguamiento, Δ es el desplazamiento, y GZ es el brazo de adrizamiento (distancia entre las líneas de acción del peso y de la boyantez, una vez que el buque se inclina). Para el caso de oscilación con amplitudes pequeñas, este brazo adrizante se lo expresa como $GM_T \phi$, donde GM_T es la altura metacéntrica, distancia vertical entre el centro de gravedad y el metacentro transversal del buque. El término de amortiguamiento para amplitudes pequeñas se puede expresar como proporcional a la velocidad de oscilación, $\dot{\phi}$.

Dividiendo la ecuación anterior para la inercia virtual, suma de la seca y la añadida:

$$\ddot{\phi} + 2\nu_{eq}\dot{\phi} + \omega_{0,eq}^2 \phi = 0. \quad (2)$$

Al oscilar el sistema alrededor de su equilibrio estático, el amortiguador disipa energía y en cada ciclo se produce una reducción en amplitud de oscilación:

$$\phi(t) = ae^{-\nu_{eq}t} e^{i(\omega_a t + \theta)} \quad (3)$$

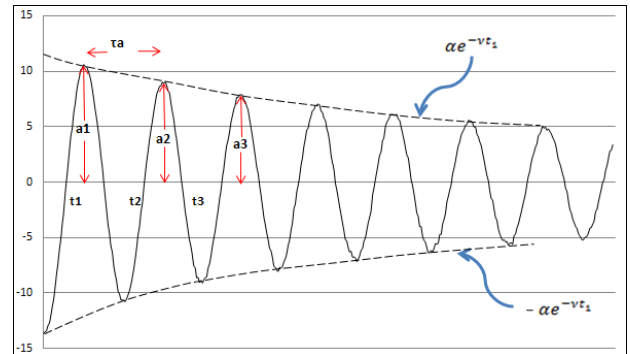


Fig. 1. Oscilación libre amortiguada.

El exponente real de la ecuación anterior, resume el efecto amortiguador, y también se lo puede expresar como $\nu_{eq} = 2\xi\omega_0$, donde ξ es el coeficiente de amortiguamiento adimensional, porcentaje del crítico, y ω_0 es la frecuencia natural de oscilación. La frecuencia a la que ocurre este movimiento, ω_b , es ligeramente inferior a la natural, influenciada por el amortiguamiento: $\omega_a = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$; en el caso de oscilación con altas amplitudes, la frecuencia natural muestra dependencia de la amplitud.

B. Coeficiente de amortiguamiento

Empleando la reducción en amplitud en un ciclo, se puede determinar el coeficiente de amortiguamiento equivalente, ν_{eq} , aplicando el concepto del decremento logarítmico, [2]:

$$\nu_{eq} = \frac{1}{\tau_a} \ln \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} \right), \quad (4)$$

ó si el registro es muy corto:

$$\nu_{eq} = \frac{2}{\tau_a} \ln \left(\frac{a_n}{a_{n+1/2}} \right), \quad (5)$$

donde τ_a es el período de oscilación amortiguada, y, a_n , $a_{n+1/2}$ y a_{n+1} son las amplitudes en tres medios ciclos sucesivos, ver Fig. 1.

En el caso de oscilación lineal es decir con pequeñas amplitudes, el coeficiente de amortiguamiento es constante. Si la amplitud de la oscilación es alta, entonces la razón entre ellas no es constante, y el coeficiente de amortiguamiento tampoco. Una vez que la disipación de energía reduce la amplitud, se opera en el ámbito lineal, y el coeficiente de amortiguamiento toma un valor constante.

En el caso de oscilación con amplitudes altas, autores como Bulian, [7], y Pawlowski, [8], recomiendan expresar el

momento debido al amortiguamiento con componentes lineal, cuadrático y cúbico:

$$N\dot{\phi} = N_1\dot{\phi} + N_2\left|\dot{\phi}\right| + N_3\dot{\phi}^3. \quad (6)$$

El coeficiente de amortiguamiento equivalente se puede relacionar con los componentes lineal, cuadrático y cúbico de la siguiente forma, [7]:

$$v_{eq} = 1/2 b_1 + 4/(3\pi) b_2 (\omega_n a) + 3/8 b_3 (\omega_n a)^2, \quad (7)$$

donde a es la amplitud instantánea y ω_n la frecuencia de oscilación.

Los coeficientes b_i s se definen como, notándose que no tienen las mismas unidades:

$$b_i = \frac{N_i}{(J_{xx} + m_{44})}. \quad (8)$$

En este trabajo se calcula el coeficiente equivalente, v_{eq} , a partir del registro en tiempo del ángulo de balance, aplicando (4) ó (5), y se lo grafica versus la amplitud media instantánea, a . Luego se ajusta numéricamente un polinomio cúbico, y por comparación con (7), se determinan los términos b_i s.

II. EMBARCACIÓN ANALIZADA

A. Características principales

La embarcación analizada es un pesquero de tipo sardinero que opera en aguas ecuatorianas, alcanzando una velocidad de 14 nudos, [9]. El modelo empleado es de 2 metros de longitud total y a continuación se presentan las características principales de buque y modelo:

TABLA I
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL BUQUE ANALIZADO

	Buque	Modelo
Eslora total, m	36.5	2.00
Eslora entre perpendiculares, m	32.76	1.82
Manga, m	8.5	0.466
Puntal, m	4.33	0.238
Desplazamiento de diseño, ton	649	0.108
Calado diseño, m	3.42	0.188
Coficiente Bloque	0.64	
Coficiente Sección Media	0.87	
Ángulo de astilla muerta, °	10	

A continuación se presentan las líneas de formas del buque analizado, que no incluye bulbo de proa, y las

secciones transversales tienen dos chinás. La embarcación no tiene quillas de balance.

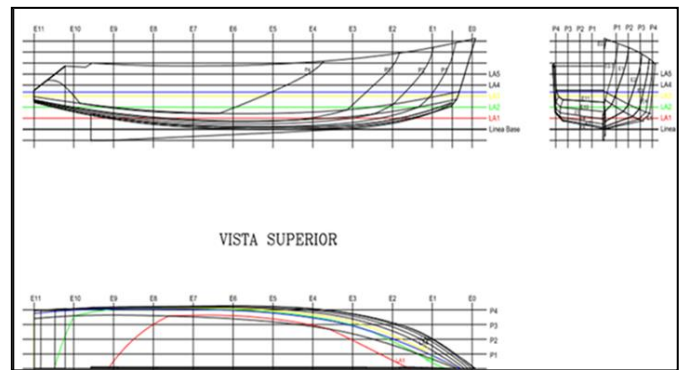


Fig. 2 Líneas de formas de la embarcación pesquera.

B. Condiciones de carga

Se consideran tres condiciones de carga del buque, con las características que se especifican a continuación. No se puede incrementar más el calado, dado que el modelo no tiene cubierta y un ángulo de escora inicial relativamente pequeño produciría inundación del modelo:

TABLA II
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS CONDICIONES DE CARGA ANALIZADAS

	Condic.1	Condic. 2	Condic. 3
Peso _{mod} , kg	48.0	63.0	77.0
T, cm	11.2	13.2	15.2
C_b	0.51	0.56	0.59
C_m	0.80	0.82	0.84

III. PRUEBAS SIN VELOCIDAD DE AVANCE

A. Proceso experimental

El modelo para las pruebas se construye con madera y no tiene cubierta.



Fig. 3 Modelo del buque pesquero.

Para cambiar la frecuencia de oscilación se instala un bloque de acero de 17.5 kg que puede deslizarse verticalmente en dos barras como guías, alterando la posición vertical del centro de gravedad del modelo. Una vez desplazado el peso verticalmente, se desarrolla un

experimento de inclinación para determinar la altura metacéntrica GM_T . Para medir los ángulos durante las pruebas se emplea un inclinómetro electrónico de alta precisión, marca Geomechanics, que envía una señal que es registrada a través de una tarjeta de adquisición de datos en un computador. Se registraron 50 y 100 scans/seg, en las pruebas sin y con velocidad de avance, respectivamente.



Fig. 4 Dispositivo para cambiar el GM

Los registros de la variación en tiempo del ángulo de balance fueron filtrados, antes de tomarse la información para calcular el coeficiente de amortiguamiento. Para esto se empleó la función “Sliding window” disponible en el paquete EasyPlot.

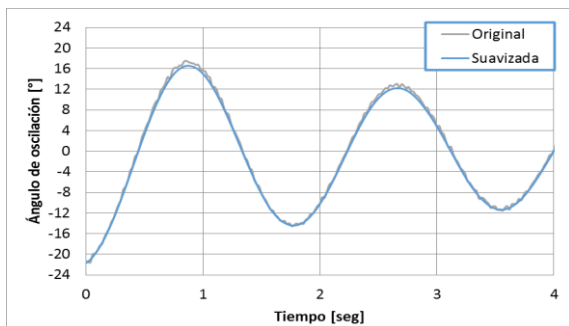


Fig. 5 Filtración de registro en tiempo.

A continuación se presenta un grupo típico de pruebas, luego de ser filtradas.

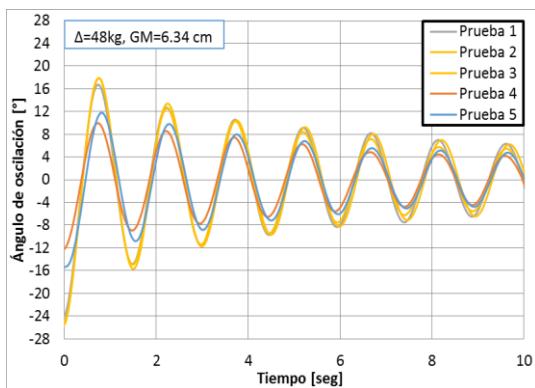


Fig. 6 Señales filtradas.

Una vez filtradas, se toman las amplitudes sucesivas y se determina el coeficiente de amortiguamiento equivalente. Ploteándolo versus la amplitud instantánea se desarrollan polinomios de ajuste que permiten determinar los coeficientes lineal, cuadrático y cúbico.

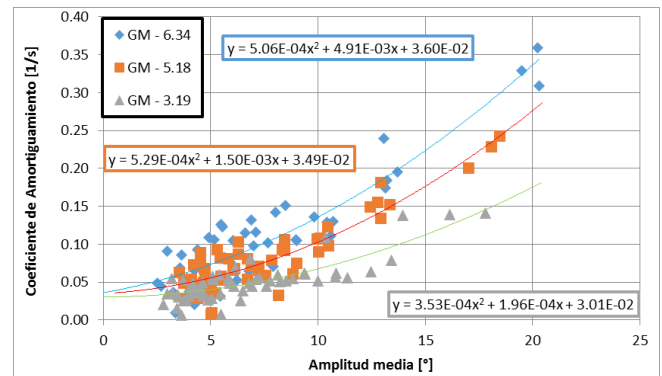


Fig. 7 Ajuste polinómico al coeficiente de amortiguamiento, $\Delta=48$ kg

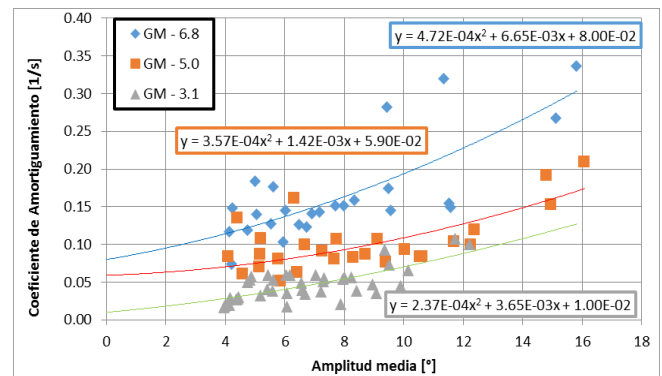


Fig. 8 Ajuste polinómico al coeficiente de amortiguamiento, $\Delta=63$ kg

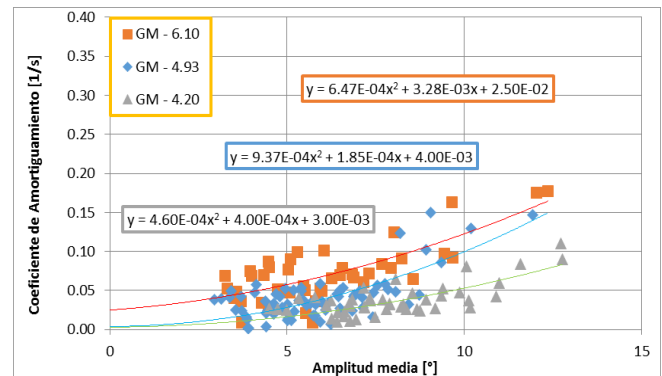


Fig. 9 Ajuste polinómico al coeficiente de amortiguamiento, $\Delta=77$ kg

Con los coeficientes de amortiguamiento determinados, se realiza una comprobación para determinar si corresponden cercanamente a los datos experimentales originales. Para ello se simula el movimiento empleando los coeficientes determinados, empleando el algoritmo Runge-Kutta de 4to orden. A continuación se presenta un caso típico, y se considera que el resultado numérico es suficientemente cercano al registro original.

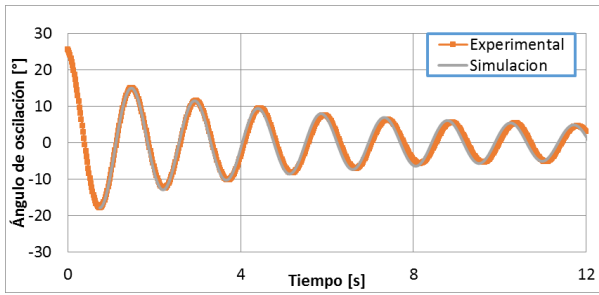


Fig. 10 Comprobación del coeficiente de amortiguamiento.

A continuación se resumen los coeficientes de amortiguamiento determinados en las tres condiciones de carga analizadas, habiendo tomado el promedio de siete repeticiones. Se incluye el coeficiente de correlación R^2 del ajuste polinómico, y el radio virtual de giro en balance, k_{xx} , como porcentaje de la manga del modelo.

TABLA III
COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO SIN VELOCIDAD DE AVANCE

Condición	GM [cm]	ω [rad/s]	b_1 [1/s]	b_2 [ad]	b_3 [s]	R^2	k_{xx}/B
Manga del modelo: 46 cm							
Regreso a Puerto $\Delta=48$ [kg]	6.34	4.407	0.0720	0.1504	0.2280	0.853	0.391
	5.18	3.716	0.0698	0.0543	0.3353	0.833	0.420
	3.19	2.791	0.0602	0.0095	0.3967	0.685	0.439
Salida de Puerto $\Delta=63$ [kg]	6.80	5.196	0.1600	0.1750	0.1630	0.573	0.338
	5.00	4.084	0.1180	0.0464	0.2107	0.449	0.385
	3.10	2.897	0.0200	0.1726	0.2090	0.505	0.416
Cargado $\Delta=77$ [kg]	6.10	4.489	0.0500	0.0669	0.3512	0.473	0.375
	4.93	3.756	0.0080	0.0068	0.6010	0.522	0.402
	4.20	3.145	0.0060	0.0171	0.4029	0.547	0.444

Al elevar el peso móvil, se reduce la altura metacéntrica GM_T , y por tanto la frecuencia de oscilación; este movimiento coloca masa a mayor distancia del c. de gravedad y por tanto incrementa el radio de giro virtual. De los resultados se nota que el coeficiente lineal b_1 crece con la frecuencia de oscilación del modelo para cada condición de carga. Además, aunque la frecuencia de oscilación no es la misma, parece que al incrementar el peso del modelo, el amortiguamiento se reduce. Respecto del ajuste de las curvas, sus valores de R^2 son relativamente bajos, excepto en la condición 1 con valores superiores a 0.7.

IV. PRUEBAS CON VELOCIDAD DE AVANCE

A. Proceso experimental

Para estas pruebas se instala un brazo de 3 metros de longitud en el borde de un bote impulsado con un

fueraborda, y se observa que no haya influencia de la estela del bote sobre el modelo. Se hala al modelo desde un punto en proa y se los guía con un punto en el espejo, ambos a la altura de la línea de flotación; de esta forma el eje de giro longitudinal coincide con la flotación. A través de un sistema de poleas se aplica un par de fuerzas hacia abajo y arriba en los costados del modelo, forzándolo a inclinarse hacia un lado, tratando de no aplicar fuerza neta en dirección vertical. Se lo suelta y se registra en tiempo su movimiento oscilante. Las pruebas se realizan en un pequeño lago artificial, dentro del campus de la ESPOL.



Fig. 11 Dispositivo de halado del modelo

En este caso debido a la influencia de la velocidad de avance, los coeficientes de amortiguamiento son mayores y por tanto las oscilaciones decaen muy rápidamente.

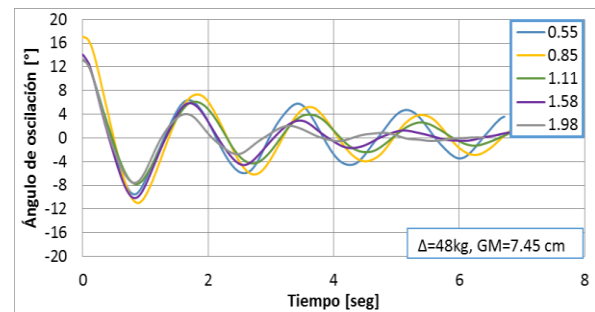


Fig. 12 Registros en tiempo del ángulo de balance con velocidad de avance

B. Resultados experimentales

En el caso de pruebas de modelo con velocidad de avance por limitaciones del modelo que no contaba con cubierta, se tuvo que iniciar el movimiento con ángulos relativamente pequeños, de manera que el ámbito de oscilación en esas pruebas es prácticamente lineal. En las siguientes tres figuras se presenta la variación del coeficiente de amortiguamiento equivalente, en función de la velocidad de avance; se incluye para velocidad nula, el resultado correspondiente obtenido en las primeras pruebas. Dado que no es posible establecer con precisión la velocidad de avance en las pruebas, se grafica los resultados para las diferentes velocidades, y luego se los interpola para el valor requerido.

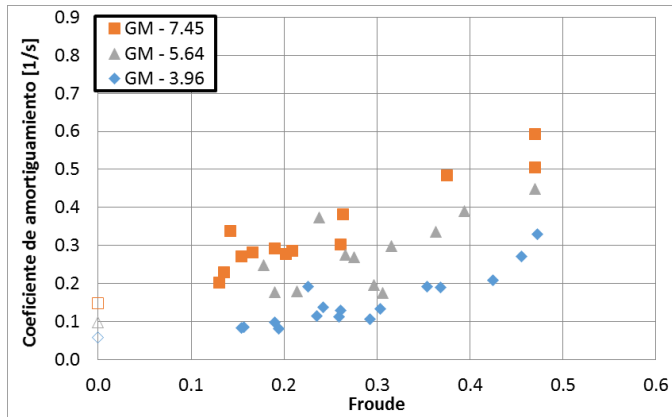


Fig. 13 Coeficiente de amortiguamiento en función de la velocidad de avance, $\Delta=48$ kg

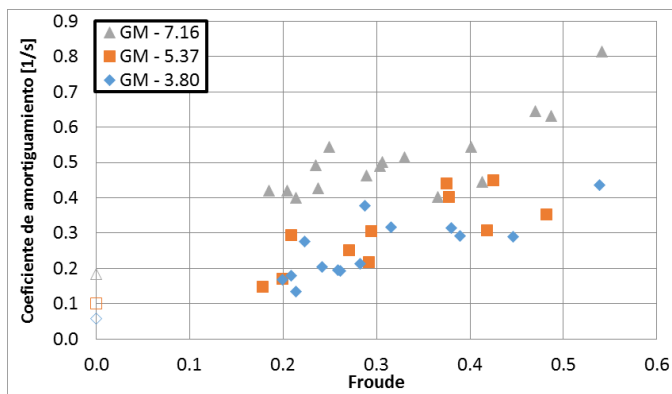


Fig. 14 Coeficiente de amortiguamiento en función de la velocidad de avance, $\Delta=63$ kg

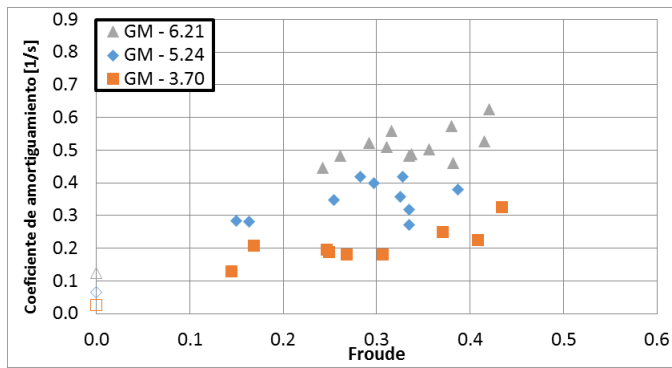


Fig. 15 Coeficiente de amortiguamiento en función de la velocidad de avance, $\Delta=77$ kg

A continuación se resumen los resultados interpolados para velocidades de 1.38 y 1.7 m/s, con números de Froude de 0.32 y 0.40; esta última corresponde a la velocidad de diseño del buque real. Además del coeficiente de amortiguamiento, se reporta el radio de giro virtual, que oscila entre 0.25 y 0.50 de la manga, aproximadamente; la posición del peso móvil para elevar el CG del modelo, incide en este valor. Conforme crece la velocidad, es notorio

el incremento en amortiguamiento; también se nota que con el desplazamiento, se incrementa dicho efecto.

TABLA IV
COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO CON VELOCIDAD DE AVANCE

Velocidad de avance 1.38 [m/s]					
Condición	GM [cm]	ω_0 [rad/s]	v [1/s]	b_I [1/s]	k_{xx}/B (CO)
					B: 46 cm
Regreso a Puerto $\Delta=48$ [kg]	7.45	4,034	0.420	0.840	0.460
	5.64	3,339	0.280	0.560	0.484
	3.96	2,480	0.140	0.280	0.546
Salida de Puerto $\Delta=63$ [kg]	7.16	5,240	0.500	1,000	0.347
	5.37	3,768	0.300	0.600	0.418
	3.80	2,950	0.250	0.500	0.449
Cargado $\Delta=77$ [kg]	6.21	6,391	0.510	1,020	0.265
	5.24	4,353	0.350	0.700	0.358
	3.70	3,164	0.200	0.400	0.413

Velocidad de avance 1.7 [m/s]					
Condición	GM [cm]	ω_0 [rad/s]	v [1/s]	b_I [1/s]	k_{xx}/B (CO)
					B: 46 cm
Regreso a Puerto $\Delta=48$ [kg]	7.45	4,034	0.490	0.980	0.460
	5.64	3,339	0.395	0.790	0.484
	3.96	2,480	0.220	0.440	0.546
Salida de Puerto $\Delta=63$ [kg]	7.16	5,240	0.540	1,080	0.347
	5.37	3,768	0.400	0.800	0.418
	3.80	2,950	0.295	0.590	0.449
Cargado $\Delta=77$ [kg]	6.21	6,391	0.580	1,160	0.265
	5.24	4,353	0.430	0.860	0.358
	3.70	3,164	0.300	0.600	0.413

V. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LA FORMULACIÓN DE HIMENO-IKEDA

A. Descripción general del método de Himeno-Ikeda

Existen algunas formulaciones semiempíricas para estimar el coeficiente de amortiguamiento en balance de un buque, pero entre ellos existen dos nombres que resaltan: Himeno e Ikeda. De hecho en algunas publicaciones aparecen como coautores, de manera que sin ningún ánimo de ofender a nadie, en este trabajo se lo va a referir como el método de Himeno-Ikeda. En la referencia clásica [4] se presenta este método, y en [10] se presenta una formulación algo más sencilla, específicamente aplicable a buques cargueros, y es con la que se comparan los resultados presentes. El método identifica cinco componentes del amortiguamiento: friccional, B_F , formación de vórtices, B_V , sustentación, B_L , formación de olas, B_W , y el efecto de quillas de balance, B_{BK} . A su vez, la componente por quillas de balance tiene subcomponentes por fuerza normal sobre la quilla y sobre el casco, y la formación de olas y su

interacción con el casco. La componente de sustentación depende directamente de la velocidad de avance, y para los restantes también se ven incrementadas por dicha influencia.

La formulación semiempírica para el coeficiente de amortiguamiento en balance de buques cargueros, presentada en [10] es aplicable en los siguientes rangos:

$$0.5 \leq C_b \leq 0.85$$

$$2.5 \leq B/d \leq 4.5$$

$$-1.5 \leq OG/d \leq 0.2$$

$$0.9 \leq C_m \leq 0.9$$

donde C_b es el coeficiente Bloque, B y d son la manga y el calado, OG es la distancia vertical desde la flotación hasta el centro de gravedad, y C_m es el coeficiente de sección Media. En la siguiente tabla se muestran las características del modelo del buque pesquero, en las tres condiciones de carga analizadas, comparadas con los rangos de aplicación del método de Himeno-Ikeda (T aquí denota el calado).

TABLA V
VALIDACIÓN DE LA APLICABILIDAD DE LA FORMULACIÓN

Caract.	Regreso a Puerto $T=11.2$ cm			Salida de Puerto $T=13.2$ cm			Cargado $T=15.2$ cm			Rango de aplicación
L_{PP} [m]	1.81			1.82			1.83			-
L/B	4.16			4.13			4.10			-
B/T	3.88			3.33			2.93			2.5-4.5
C_b	0.484			0.559			0.607			0.5-0.85
C_m	0.652			0.734			0.782			0.9-0.99
OG/T	-0.97	-1.07	-1.25	-0.37	-0.51	-0.65	-0.14	-0.21	-0.26	-1.5-0.2
τ [s]	1.46	1.74	2.32	1.22	1.55	2.17	1.44	1.70	1.99	-
GM [cm]	6.3	5.1	3.1	6.8	5.0	3.1	6.1	4.9	4.2	-

Se nota que la razón manga/calado y la posición relativa del c. de gravedad respecto del calado están dentro de los rangos de aplicación del método, pero los coeficientes bloque y de sección media no lo están. Sin embargo, conforme se incrementa el desplazamiento, dichos coeficientes tienden a entrar en dichos rangos.

B. Comparación de resultados sin velocidad de avance

A continuación se presentan resultados experimentales comparados con los obtenidos aplicando la formulación presentada en [10], agrupados por condición de carga y valor de la altura metacéntrica.

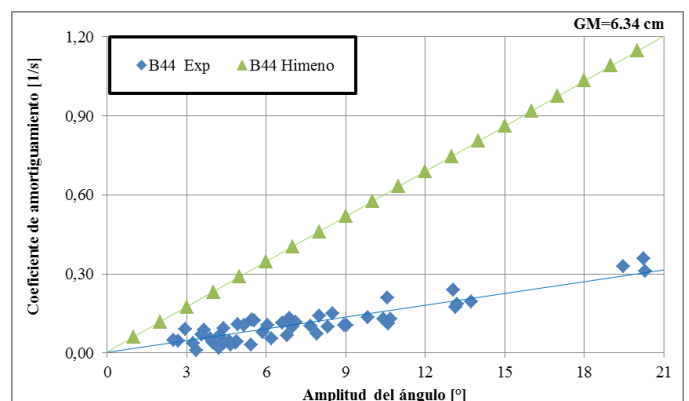
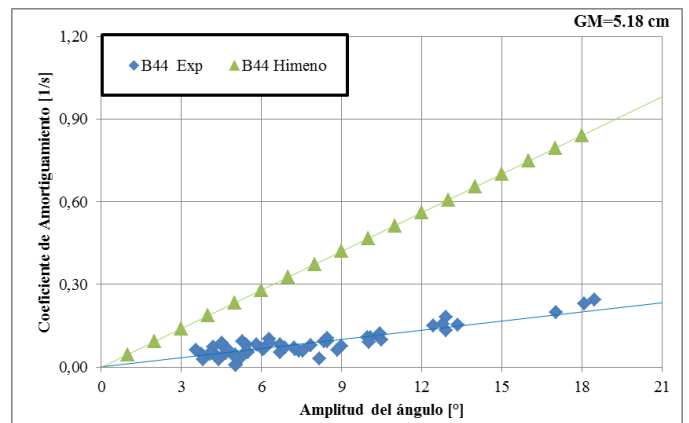
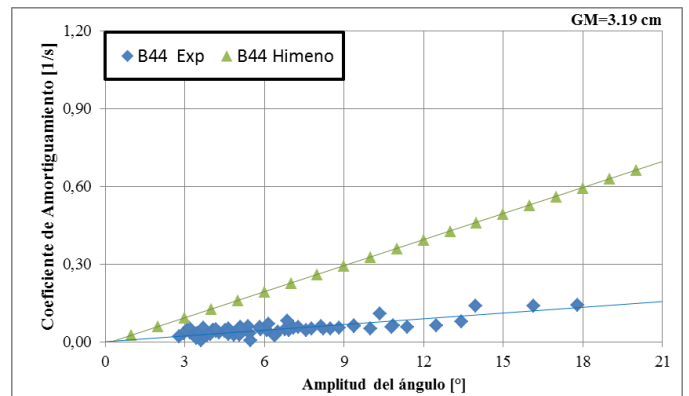
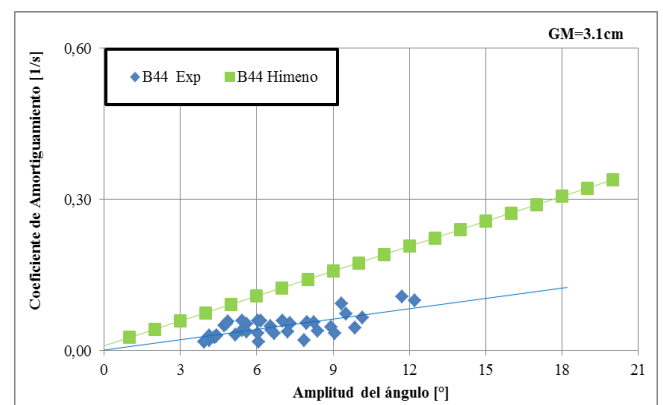


Fig. 16 Coeficiente de amortiguamiento para $\Delta=48$ kg.



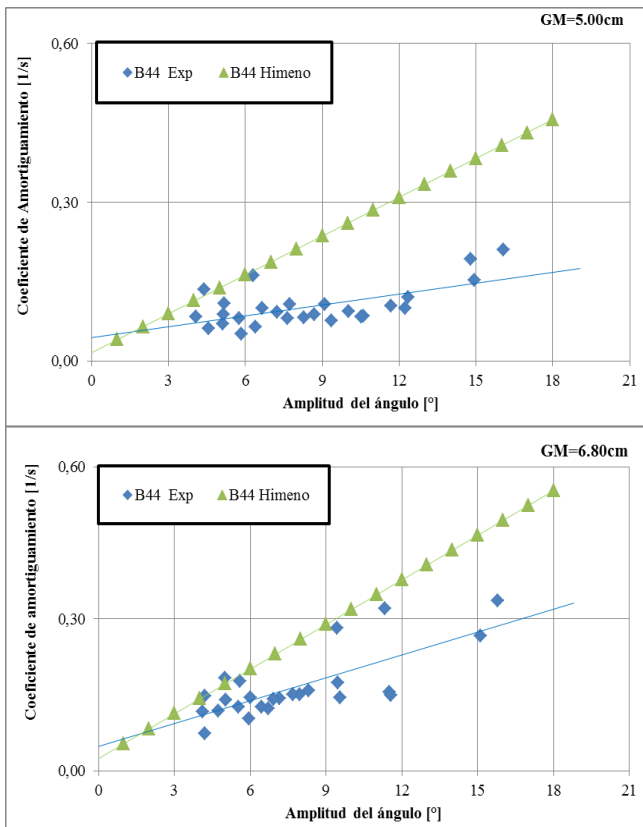


Fig. 17 Coeficiente de amortiguamiento para $\Delta=63$ kg.

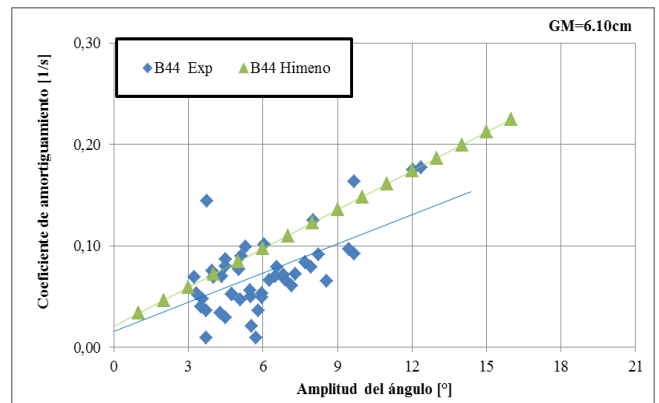
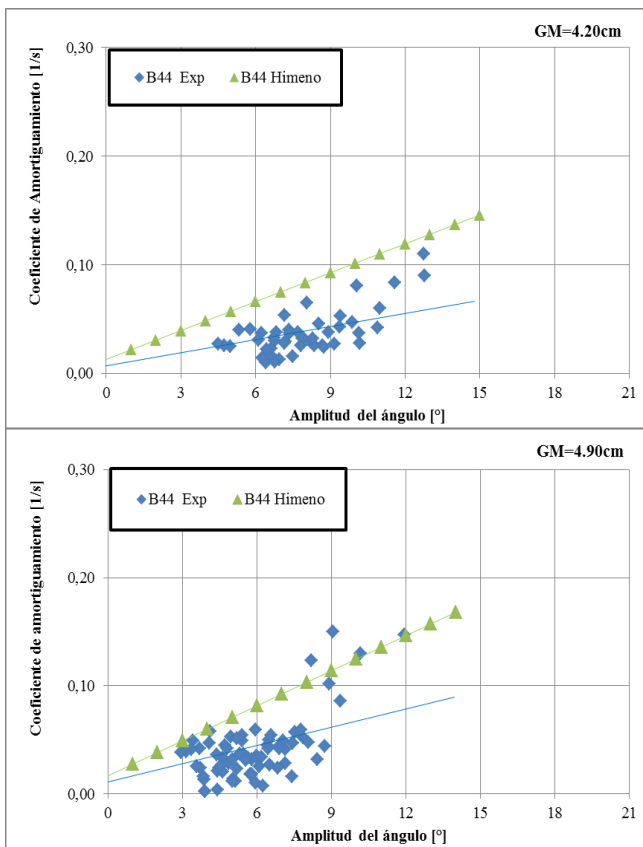
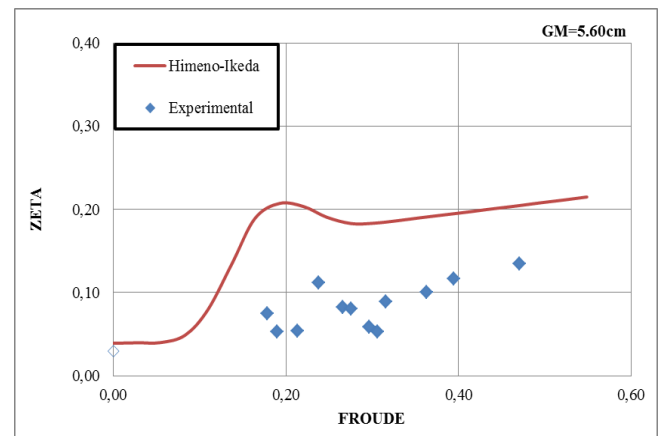
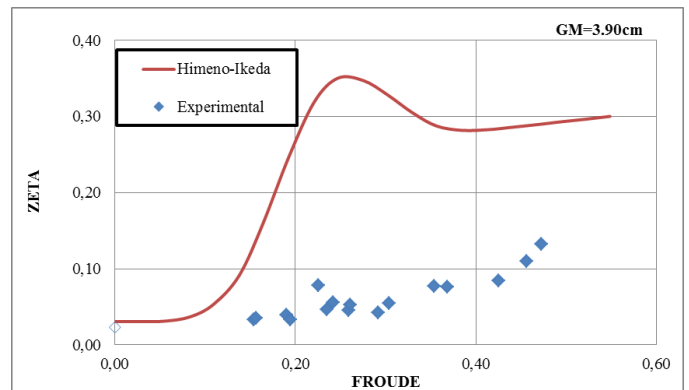


Fig. 18 Coeficiente de amortiguamiento para $\Delta=77$ kg.

Conforme se incrementa el peso del modelo, parece que la formulación de [10] predice muy cercanamente los resultados experimentales obtenidos en este trabajo.

C. Comparación de resultados con velocidad de avance

Ahora se compara el coeficiente de amortiguamiento adimensional, ζ , y los obtenidos con la formulación de [10], como función de la velocidad relativa, número de Froude.



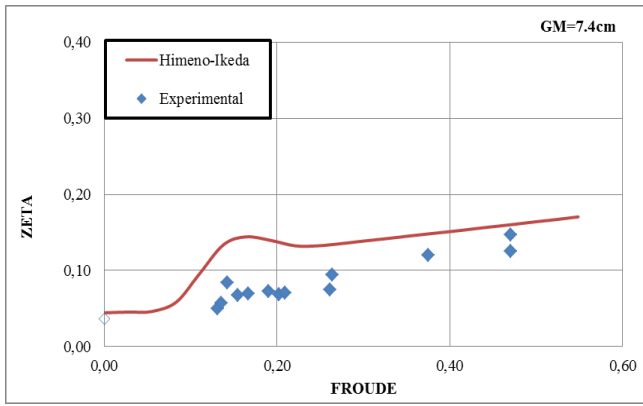


Fig. 19 Coeficiente de amortiguamiento para $\Delta=48$ kg.

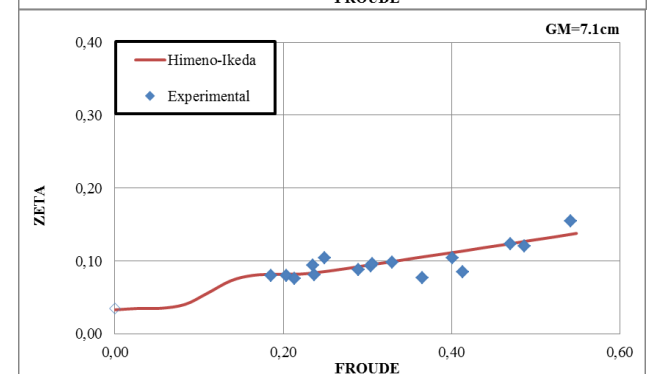
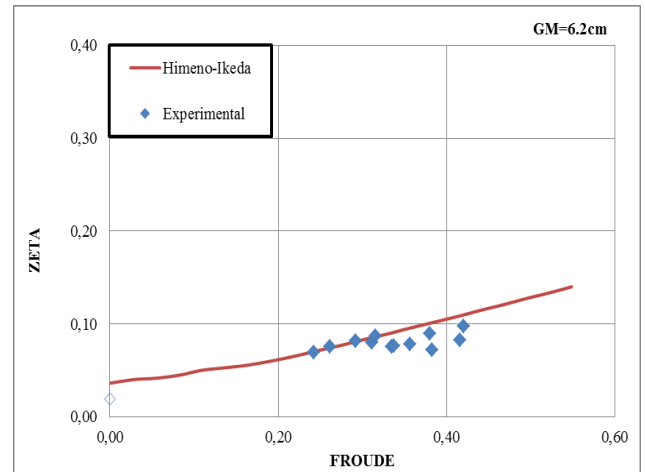
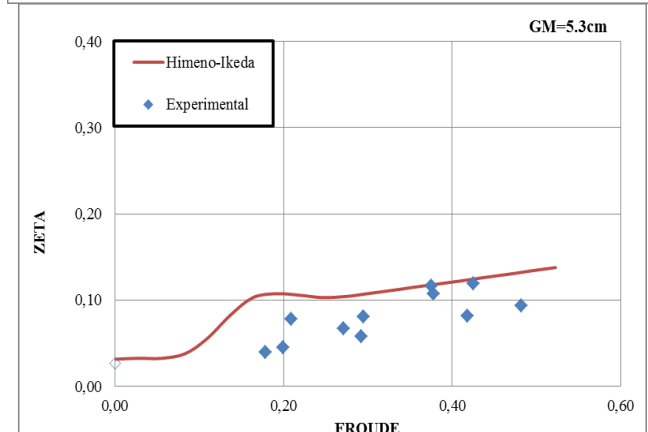
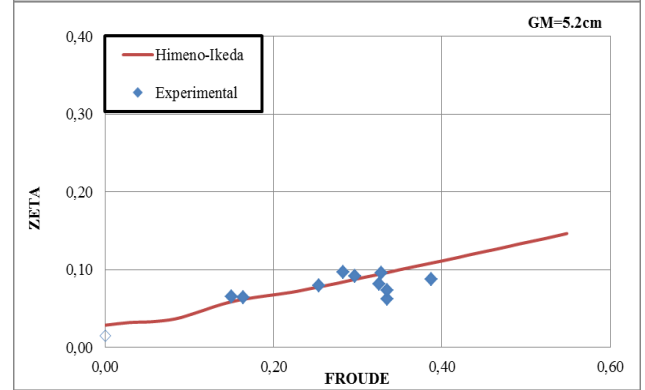
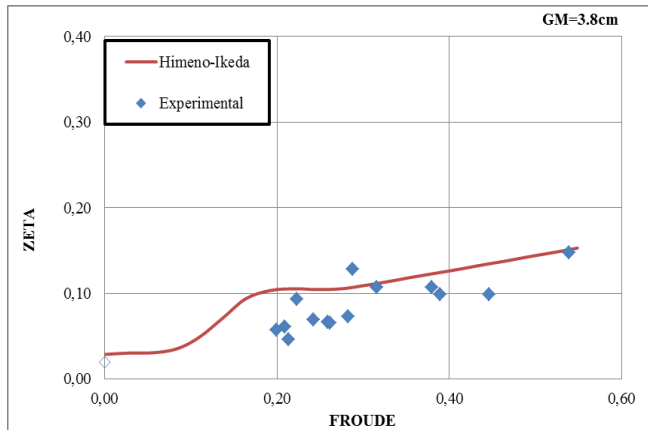
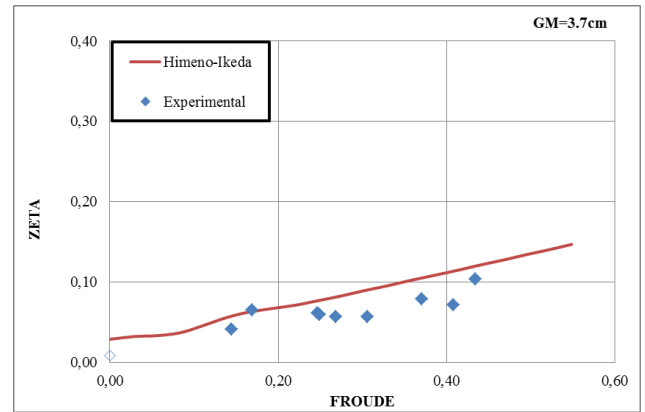


Fig. 20 Coeficiente de amortiguamiento para $\Delta=63$ kg.

Fig. 21 Coeficiente de amortiguamiento para $\Delta=77$ kg.

En la condición de mayor peso, la predicción del coeficiente de amortiguamiento con la formulación propuesta por Kawahra et al [10] para buques de carga general es bastante buena. Esto era de esperarse porque en esa condición las características del modelo se acercan al rango de aplicabilidad de la formulación. Inclusive las pruebas experimentales son capaces de recuperar el abultamiento para un número de Froude de alrededor de 0.18, que muestra la formulación mencionada.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se determina experimentalmente el coeficiente amortiguamiento en balance de un buque sardinero, para lo que se realizan ensayos de extinción en

oscilación libre con y sin velocidad de avance con un modelo de 2 m. Las pruebas de decaimiento sin velocidad de avance se realizan en una piscina y los resultados permiten también determinar las no linealidades cuadrática y cúbica del coeficiente de amortiguamiento. Los ensayos en un lago halando el modelo desde una lancha que avanza en forma estable, permiten determinar la influencia de la velocidad de avance. Finalmente se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con el método semiempírico de Himeno e Ikeda, con lo que se concluye:

Iniciando la oscilación en los experimentos sin velocidad de avance, con relativamente altas amplitudes permitió al modelo desplazarse soportando efectos no lineales. Estos efectos son importantes a partir de los 12° donde se observa claramente la influencia de este parámetro en el coeficiente de amortiguamiento. El coeficiente lineal se incrementa con la frecuencia de oscilación por la participación de los efectos viscosos. Los términos no lineales no tienen una tendencia definida, sin embargo a medida que uno aumenta el otro término disminuye. Los valores obtenidos para los términos cuadrático y cúbico son considerables, indicando que para analizar oscilaciones en balance con elevadas amplitudes, ambos deberían considerarse.

La amplitud media en las pruebas con velocidad de avance está por debajo de los 12° , por tanto la oscilación es lineal y el coeficiente de amortiguamiento puede considerarse como constante. Este coeficiente se incrementa con la frecuencia de oscilación y decrece con la condición de carga como consecuencia de la generación de olas. Para un número de Froude de 0.40 en la condición $\Delta = 77$ kg con $GM = 3.7$ cm alcanza relaciones de hasta 12 veces el valor de los resultados de las pruebas sin velocidad de avance. El valor obtenido para el coeficiente de amortiguamiento en balance refleja claramente que la velocidad de avance influye considerablemente sobre dicho coeficiente.

El método de Himeno e Ikeda es considerado como referente para el cálculo del coeficiente de amortiguamiento en balance de un buque. Dado que es un método semiempírico es muy importante que se compruebe su aplicabilidad. En condición ligera $\Delta = 48$ kg y con $GM = 6.34$ cm donde el coeficiente de bloque y el de sección media están fuera del rango de aplicación, los tres términos del amortiguamiento, lineal, cuadrático y cúbicos, muestran grandes diferencias con los determinados experimentalmente. Esta diferencia se reduce conforme se incrementa el calado alcanzando valores de hasta el 23% para el término cuadrático respecto a los resultados experimentales sin velocidad de avance. Similar comportamiento muestran la comparación del coeficiente de amortiguamiento determinado considerando la influencia de la velocidad de avance. Entonces la determinación del coeficiente de amortiguamiento empleando el método mencionado parece adecuada considerando los rangos de aplicación del coeficiente de sección media, coeficiente de bloque, razón manga/calado, y la posición relativa del CG respecto del calado.

REFERENCIAS

- [1] V. Belenky, C. Bassler, & K. Spyrou, "Development of Second Generation Intact Stability Criteria". Naval Surface Warfare Center, NSWCCD-50-TR-2011/065, 2011.
- [2] R. Battacharyya, Dynamics of Marine Vehicles. Wiley-Interscience, 1976
- [3] R. Beck, et al, Motion in Waves, Cap. VIII en *Principles of Naval Architecture, Vol. III*, SNAME, 1988.
- [4] Y. Himeno, "Prediction of Ship Roll Damping - State of the art". Departamento de Arquitectura Naval e Ingeniería Marina, Universidad de Michigan, Reporte N° 239, 1981
- [5] M. Haddara y S. Zhang, Experimental study of the effect of forward speed and following waves on roll damping of fishing vessels. Tesis de MSc. Memorial University of Newfoundland, 1993
- [6] O. Cevallos, I. Chica y E. Castillo, Análisis de Dinámica del buque: Movimiento (no acoplado) no lineal, Tesis de Grado de Ingeniero Naval, FIMCM-ESPOL, 1991
- [7] G. Bulian, Determination of Relevant Parameters for the Alternative Assessment of Intact Stability Weather Criterion on Experimental Basis. Project HYD-III-CEH-5. Rev: 1.0, 2009.
- [8] M. Pawlowski, Approximation of the non-linear roll damping. Proceedings 11th International Ship Stability Workshop, 2010.
- [9] J. C. Pinto, "Coeficiente de amortiguamiento experimental en balance con velocidad de avance del modelo de un buque pesquero ecuatoriano", Proyecto de Graduación de Ingeniero Naval, FIMCBOR-ESPOL, 2015.
- [10] Y. Kawahara, K. Maekawa, e. Y. Ikeda, "A Simple Prediction Formula of Roll Damping of Conventional Cargo Ships on the Basis of Ikeda's Method and Its Limitation". *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, Japón, 2008.