



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y Recursos
Naturales

**COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO EXPERIMENTAL EN BALANCE
CON VELOCIDAD DE AVANCE DEL MODELO DE UN BUQUE
PESQUERO ECUATORIANO.**

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO NAVAL

Presentado por:

Juan Carlos Pinto Loor.

Guayaquil-Ecuador

2015

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser siempre la luz, quien guía mi camino, por darme fortaleza, salud y sabiduría.

A mi madre, Fátima Loor quien ha sido mi sustento y por todos los días que no pude estar junto a ti por el único hecho de tener una mejor preparación académica, eres el ser más maravilloso, gracias.

A mis hermanos, que siempre han estado en las buenas y en las malas.

De manera muy especial también agradezco al Ph.D. José Rolando Marín López por su paciencia, dedicación y apoyo incondicional durante la elaboración de este trabajo, además por los conocimientos impartidos durante mi carrera profesional.

Y a todos los que de alguna manera colaboraron en mi formación.

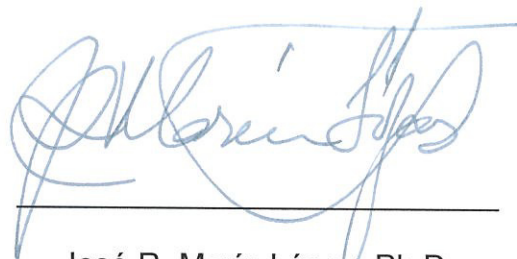
DEDICATORIA

A Dios que me brinda las fuerzas necesarias para seguir adelante. A mi madre porque ha sido un modelo a seguir para poder alcanzar mis metas; Mami, tu rectitud, perseverancia y valores me han servido para ser un hombre de bien, eres la motivación para superarme, y ser mejor cada día.

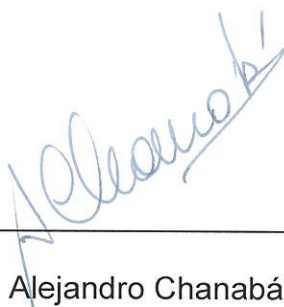
TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Eduardo Cervantes
Presidente del Tribunal



José R. Marín López, Ph.D.
Director de Tesis



Ing. Alejandro Chanabá Ruiz , M. Sc.
Miembro Principal



C.I.B.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamentos de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, positioned above a horizontal line.

Juan Carlos Pinto Loor

RESUMEN

En esta tesis se determinó experimentalmente el coeficiente de amortiguamiento en balance del modelo del buque pesquero sardinero B/P Fausto V que tiene una eslora total de 36.58 m. La sección transversal tiene dos chinas, coeficiente bloque de 0.60 y se empleó un modelo de 2 m de longitud. El coeficiente de amortiguamiento se lo determinó luego de adaptar los equipos disponibles para registrar la oscilación transiente del modelo, primero sin velocidad de avance, y luego arrastrándolo lateralmente desde un bote que avanza en forma estable. Las pruebas con velocidad de avance se realizaron empleando un esquema que permite al modelo oscilar libremente con pivote en el punto de intersección de la línea de flotación con el casco. Las pruebas incluyen variación de la condición de carga y la altura metacéntrica.

Las curvas obtenidas en cada condición ensayada fueron filtradas numéricamente con el algoritmo "*Sliding window*" del programa EasyPlot. Mediante una simulación de la ecuación diferencial ordinaria del balance libre desacoplado con el método de Runge-Kutta de cuarto orden se comprobó que los valores determinados de los coeficientes de amortiguamiento equivalentes son confiables. A partir de los resultados experimentales sin velocidad de avance iniciados con un ángulo de escora relativamente alto, se

establece que el coeficiente de amortiguamiento en balance se incrementa en forma aproximadamente cuadrática con la amplitud de oscilación. Además se concluyó que los efectos no lineales son relevantes a partir de los 12° , cuando se empieza a notar un comportamiento dependiente de la amplitud. Los resultados de las pruebas experimentales con velocidad de avance mostraron que el coeficiente de amortiguamiento en balance se incrementa considerablemente con dicho parámetro, por ejemplo para un número de Froude de 0.43, en condición de máxima carga, dicho incremento fue de 12 veces respecto de los resultados sin velocidad de avance.

Finalmente, empleando el método semiempírico de Himeno e Ikeda se determinó teóricamente el coeficiente de amortiguamiento en Balance. La aplicación de las expresiones para evaluar la influencia de varias componentes del fenómeno es laboriosa, por lo que fue necesario implementarlas en un programa de computación. Finalmente se compararon los resultados de las pruebas experimentales con los predichos por el método de Himeno e Ikeda. En la condición de máxima carga para las pruebas sin velocidad de avance se mostró una diferencia máxima del 23% para el término cuadrático. Esta diferencia se incrementó conforme disminuye la condición de carga alcanzando un valor de hasta el 74%, lo cual es esperable dado que los coeficientes de formas del modelo salen del rango de aplicación del método. Similar comportamiento se observó en los

resultados de las pruebas con velocidad de avance, esto es, buena correlación en la condición de máxima carga. Se puede decir entonces que el método de Himeno e Ikeda para determinar el coeficiente de Amortiguamiento en Balance del pesquero analizado, es aplicable para la condición de Cargado, mientras que sobreestima dicho parámetro en condición Ligera.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE ANEXOS	XIII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL:	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
CAPÍTULO 1	6
1.1 Ecuación de Balance con amortiguamiento	6
Decremento logarítmico	10
1.2 Características de la embarcación y del modelo	12
1.3 Descripción de pruebas experimentales	17
Pruebas sin velocidad de avance	19
Pruebas con velocidad de avance.....	21
1.4 Análisis dimensional del coeficiente de amortiguamiento	25
CAPÍTULO 2	30
2.1 Resultados de las pruebas experimentales	30
Resultados de las pruebas sin velocidad de avance.....	34
Resultados de las pruebas con velocidad de avance.....	40

2.2 Influencia de la amplitud del ángulo de balance.....	42
2.3 Influencia de la velocidad de avance	51
CAPÍTULO 3	55
3.1 Descripción general del método de Himeno e Ikeda	55
Componente friccional <i>B</i>	57
Componente por generación de vórtices <i>B</i>	58
Componente por formación de olas <i>BV</i>	59
Componente por sustentación <i>B</i>	61
3.2 Predicción del coeficiente de amortiguamiento	62
3.3 Comparación de resultados.....	71
CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Momentos que actúan en el movimiento de balance libre del Buque.....	8
Figura 2. Curva de extinción del movimiento en balance.	10
Figura 3. Plano de líneas de formas de la embarcación.....	14
Figura 4. Modelo utilizado para las pruebas.....	15
Figura 5. Codaste del modelo	15
Figura 6. Buque real Fausto V	16
Figura 7. Punto de referencia para la toma de calados	18
Figura 8. Sistema usado para variar la altura metacéntrica (GM).....	19
Figura 9. Lugar donde se efectúan las pruebas sin velocidad	20
Figura 10. Esquema empleado para las pruebas de oscilación.	23
Figura 11. Sistema empleado para dar la escora inicial del modelo.	24
Figura 12. Curvas de decaimiento original y suavizada.....	33
Figura 13. Periodos de oscilación y máximos locales.	33
Figura 14. Curvas de decaimiento oscilación libre S/V condición 1.1 ...	34
Figura 15. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 1.1	35

Figura 16. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 1.2	36
Figura 17. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 1.3	36
Figura 18. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 2.1	37
Figura 19. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 2.2	37
Figura 20. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 2.3	38
Figura 21. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 3.1	38
Figura 22. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 3.2	39
Figura 23. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 3.3	39
Figura 24. Curvas de decaimiento oscilación libre C/V condición 1.1 ...	40
Figura 25. Curvas de decaimiento oscilación libre C/V condición 2.1 ...	41
Figura 26. Curvas de decaimiento oscilación libre C/V condición 3.1 ...	41

Figura 27. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=48$ kg	43
Figura 28. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=63$ kg	44
Figura 29. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=77$ kg	44
Figura 30. Frecuencia de oscilación versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=48$ kg	45
Figura 31. Frecuencia de oscilación versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=63$ kg	46
Figura 32. Frecuencia de oscilación versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=77$ kg	46
Figura 33. Comparación de la curva experimental y la obtenida de la simulación (Condición 1, GM=5.18 cm).	47
Figura 34. Factor de amortiguamiento adimensional ξ, $\Delta=48$ kg.....	48
Figura 35. Factor de amortiguamiento adimensional ξ, $\Delta=63$ kg.....	49
Figura 36. Factor de amortiguamiento adimensional ξ, $\Delta=77$ kg.....	49
Figura 37. Coeficiente de amortiguamiento versus la Velocidad de avance $\Delta=48$ kg.....	52

Figura 38. Coeficiente de amortiguamiento versus la Velocidad de avance $\Delta=63$ kg	53
Figura 39. Coeficiente de amortiguamiento versus la Velocidad de avance $\Delta=77$ kg	53
Figura 40. Amortiguamiento por fricción en el casco.	58
Figura 41. Amortiguamiento por generación de vórtices.....	59
Figura 42. Amortiguamiento por formación de olas.	61
Figura 43. Diagrama de flujo del método de Himeno e Ikeda.....	64
Figura 44. Componentes del método de Himeno e Ikeda $\Delta=63$ kg GM=3.1 cm.....	67
Figura 45. Componentes del método de Himeno e Ikeda $\Delta=77$ kg GM=4.2 cm.....	67
Figura 46. Componentes del método de Himeno e Ikeda $\Delta=48$ kg GM=3.9 cm.....	69
Figura 47. Componentes del método de Himeno e Ikeda $\Delta=63$ kg GM=3.8 cm.....	70
Figura 48. Componentes del método de Himeno e Ikeda $\Delta=77$ kg GM=3.7 cm.....	70
Figura 49. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=48$ kg GM=3.19 cm.....	72

Figura 50. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=48$ kg GM=5.18	
cm.....	73
Figura 51. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=48$ kg GM=6.34	
cm.....	73
Figura 52. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=63$ kg GM=3.1	
cm.....	74
Figura 53. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=63$ kg GM=5.00	
cm.....	74
Figura 54. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=63$ kg GM=6.80	
cm.....	75
Figura 55. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=77$ kg GM=4.20	
cm.....	75
Figura 56. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=77$ kg GM=4.90	
cm.....	76
Figura 57. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=77$ kg GM=6.10	
cm.....	76
Figura 58. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=48$ kg GM=3.90	
cm.....	77
Figura 59. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=48$ kg GM=5.60	
cm.....	78

Figura 60. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=48$ kg GM=7.4 cm.....	78
Figura 61. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=63$ kg GM=3.8 cm.....	79
Figura 62. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=63$ kg GM=5.3 cm.....	79
Figura 63. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=63$ kg GM=7.1 cm.....	80
Figura 64. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=77$ kg GM=3.7 cm.....	80
Figura 65. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=77$ kg GM=5.2 cm.....	81
Figura 66. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=77$ kg GM=6.2 cm.....	81
Figura 67. Esquema empleado para la prueba de inclinación	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Características principales de la embarcación y el modelo (condición cargado).....	13
Tabla II. Condiciones de los ensayos de extinción sin velocidad de avance.....	21
Tabla III. Condiciones de los ensayos de extinción con velocidad de avance.....	22
Tabla IV. Resumen de resultados experimentales S/V	50
Tabla V. Resumen de resultados con velocidad de avance.....	54
Tabla VI. Características de las condiciones ensayadas S/V.....	65
Tabla VII. Características de las condiciones ensayadas C/V.	68
Tabla VIII. Resultados de la prueba de inclinación S/V.	94
Tabla IX. Resultados de la prueba de inclinación C/V.	95
Tabla X. Organización de los resultados de las pruebas S/V	97
Tabla XI. Organización de los resultados de las pruebas C/V	99

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A	89
ANEXO B	92
ANEXO C	95
ANEXO D	97

INTRODUCCIÓN

Durante sus faenas las embarcaciones pesqueras puede encontrarse expuestas a condiciones de mar elevado, lo cual puede llevar a oscilaciones severas en Balance y en ocasiones a la zozobra del buque, [4]. La amplitud de este movimiento 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, quilla de balance, condiciones de carga, entre otros. Para el cálculo de la respuesta dinámica se debe resolver la ecuación diferencial de Balance que incluye efectos hidrostáticos e hidrodinámicos. La teoría de Flujo Potencial combinada con la de Fajas es utilizada para determinar algunos coeficientes hidrodinámicos causados por el movimiento del buque, sin embargo no es adecuada cuando se trata del coeficiente de amortiguamiento en balance por no considerar los efectos viscosos, [2]. Además debido a la complejidad de los efectos viscosos propios del fluido, a la formación de olas y a la fuerte dependencia de la velocidad de avance, dicho coeficiente no puede ser determinado en forma analítica, [3].

El análisis cuasiestático de estabilidad de un buque actualmente en aplicación es limitado porque no incluye la dinámica del fenómeno, lo que se evidencia fuertemente en los accidentes producidos en embarcaciones

donde se cumplieran con amplio margen estos criterios. La zozobra de un buque intacto en la mayoría de los casos está precedida por movimientos excesivos los cuales son provocados por varios fenómenos dinámicos tal y como los está estudiando actualmente la OMI, [4]: Pérdida pura de estabilidad, Guiñada brusca, Resonancia paramétrica y Condición del buque quieto. Por lo tanto siendo el coeficiente de amortiguamiento un factor que reduce la amplitud de la respuesta del buque en balance es necesario determinarlo para predecir la posibilidad de zozobras por los fenómenos antes mencionados, [1].

La obtención analítica del coeficiente de amortiguamiento en Balance de Pesqueros es imposible debido a los efectos viscosos propios del fluido y a la complejidad cinemática por las olas que se generan. Una alternativa es el uso de herramientas de CFD ("Computational Fluid Dynamics") pero la experiencia local en esta técnica es muy limitada. Por ello otra opción es determinarlo experimentalmente, incluyendo la influencia de la velocidad de avance, que se ha identificado como un parámetro que lo puede incrementar en órdenes de magnitud, [5]. Esto se logra arrastrando el modelo a varias velocidades y registrando la curva de extinción de su oscilación desde un ángulo de balance pronunciado. Finalmente se podría comparar los resultados con los obtenidos mediante el método Himeno e Ikeda el cual

emplea formulaciones deducidas a partir de resultados experimentales desarrollados en Japón, [3].

Algunos autores tales como Haddara y Zhang, [1] han realizado estudios experimentales para la determinación del coeficiente de amortiguamiento en Balance de buques pesqueros 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. En nuestro medio se efectuaron pruebas sin velocidad de avance, en aguas tranquilas y en condición de máxima carga, para determinar el efecto de quillas de balance, [6]. Las pruebas experimentales se realizaron con tres modelos de formas diferentes de buques pesqueros y el coeficiente de amortiguamiento fue determinado mediante curvas de extinción. Al igual que en la primera referencia se comparó los resultados obtenidos con los predichos con el método Himeno e Ikeda y se confirmó su aplicabilidad para este tipo de embarcaciones. Los resultados de las investigaciones con pesqueros japoneses resultan poco útiles para nuestro medio por las diferencias en formas (esbeltas y afinadas, propias para altas velocidades) por lo que se hace necesario determinarlo experimentalmente con velocidad de avance.

OBJETIVO GENERAL:

Se pretende determinar experimentalmente el coeficiente de amortiguamiento en Balance de un Pesquero Ecuatoriano incluyendo el efecto de la velocidad de avance.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar experimentalmente el coeficiente de amortiguamiento en Balance del modelo de un buque pesquero ecuatoriano con velocidad de avance, empleando registros de extinción del movimiento.
- Analizar la influencia de la velocidad de avance y las no linealidades cuadrática y cúbica en el coeficiente de amortiguamiento en Balance de un buque pesquero ecuatoriano.
- Comparar los resultados experimentales del coeficiente de amortiguamiento en Balance de un buque pesquero con velocidad de avance, con el método de Himeno e Ikeda.

BENEFICIOS

Actualmente en el país no se ha realizado investigación alguna sobre la influencia de la velocidad de avance en el coeficiente de amortiguamiento en Balance de buques. Con el presente trabajo mediante pruebas experimentales se pretende obtener dicho coeficiente para con estos resultados poder analizar la respuesta de buques pesqueros en olas y finalmente garantizar la estabilidad dinámica de la embarcación.

HIPÓTESIS

El coeficiente de amortiguamiento en balance de un Buque con elevada amplitud puede determinarse mediante pruebas de extinción halando el modelo desde una lancha.

CAPÍTULO 1

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO EN BALANCE

1.1 Ecuación de Balance con amortiguamiento

La ecuación para analizar el balance con amortiguamiento de un buque se obtiene al aplicar la segunda ley de Newton, considerándolo como un cuerpo rígido que experimenta oscilación libre amortiguada desacoplada. Aplicando la mencionada ley se obtiene una ecuación diferencial ordinaria homogénea de segundo orden para el ángulo de balance, la cual consta de tres términos: los momentos Inercial, Restaurador y Amortiguador. El presente trabajo se enfoca en el término de amortiguamiento, el cual es considerado como no lineal, es decir depende de la amplitud del ángulo de balance. La ecuación de movimiento tiene solución transiente, por tanto la razón de decaimiento permite evaluar el coeficiente de amortiguamiento.

Un buque se encuentra sometido a varias fuerzas y momentos, que se desarrollan cuando está fuera de su posición de equilibrio. Para el presente trabajo se considera que la embarcación, como resultado de los momentos actuantes, experimenta balance libre amortiguado y desacoplado. Los momentos que actúan sobre esta son determinados alrededor del eje longitudinal. Luego de aplicar la sumatoria de momentos alrededor del eje x se obtiene siguiente ecuación.

$$-M_A - M_R = M_I \quad (1)$$

donde:

M_I , es el momento Inercial, el cual se expresa como el producto de la inercia virtual por la aceleración angular.

M_R , es el momento de Restauración que se obtiene al multiplicar el desplazamiento Δ por el brazo adrizante GZ .

M_A , es el momento Amortiguador, que viene dado como el producto del coeficiente de amortiguamiento N por la velocidad angular $\dot{\phi}$.

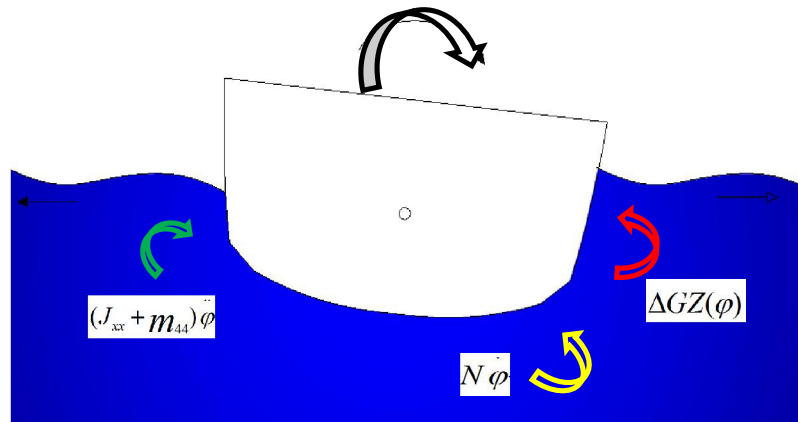


Figura 1. Momentos que actúan en el movimiento de balance libre del Buque.

Considerando la explicación anterior la ecuación (1) se expresa de la siguiente forma:

$$(J_{xx} + m_{44})\ddot{\varphi} + N\dot{\varphi} + \Delta GZ(\varphi) = 0 \quad (2)$$

El término de amortiguamiento, el cual se analiza en esta tesis se lo considera como no lineal respecto a la velocidad angular. La no linealidad de este coeficiente se puede representar primero con un equivalente lineal, [5], esto es tomando un coeficiente constante. Un análisis similar se realiza para el momento restaurador para lo que se considera una frecuencia natural de oscilación equivalente, proceso que simplifica la complejidad de este término, [5]. Bajo estas consideraciones la ecuación (2) puede ser representada mediante un modelo lineal como se muestra a continuación, es decir una

ecuación diferencial ordinaria homogénea de segundo orden para el ángulo de balance.

$$\ddot{\varphi} + \frac{N}{J_{xx} + m_{44}} \dot{\varphi} + \frac{\Delta GZ(\varphi)}{J_{xx} + m_{44}} = 0 \Rightarrow \ddot{\varphi} + 2\nu_{eq} \dot{\varphi} + \omega_{0,eq}^2 \varphi = 0 \quad (3)$$

Cuya solución es

$$\varphi(t) = e^{-\nu_{eq}t} \cos(\omega_d t + \vartheta) \quad (4)$$

donde:

α , ángulo inicial del movimiento.

ω_d , frecuencia amortiguada de oscilación.

ϑ , ángulo de desfase.

ν_{eq} , coeficiente de amortiguamiento equivalente.

La frecuencia amortiguada al igual que el coeficiente de amortiguamiento equivalente varía en cada ciclo y se los asocia a la amplitud media correspondiente, [5] y [8].

La Figura 2 muestra como disminuye la amplitud del ángulo de balance en el tiempo, lo que es propio de sistemas en oscilación libre con amortiguamiento.

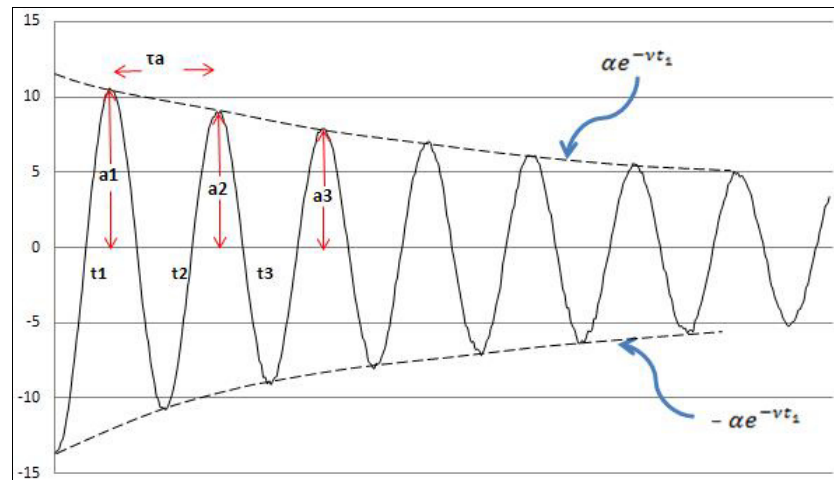


Figura 2. Curva de extinción del movimiento en balance.

La solución del modelo lineal de la ecuación (3) es transiente, esto es que decrece con el tiempo, y la razón de decaimiento permite mediante el Decremento logarítmico evaluar el coeficiente de amortiguamiento.

Decremento logarítmico

En el caso de un buque, el origen del amortiguamiento está relacionado con las características del fluido viscoso, lo que hace virtualmente imposible encontrar dicho coeficiente en forma analítica. Por lo expuesto anteriormente es posible aplicar el denominado Decremento logarítmico para determinar el coeficiente de amortiguamiento en forma experimental, según lo explicado en [5] y [8]. Tomando el logaritmo del cociente de dos amplitudes consecutivas

en la señal Transiente se puede, aplicando la solución (4), obtener la siguiente expresión para el coeficiente de amortiguamiento equivalente.

$$v_{eq} = \frac{1}{\tau_a} \ln \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} \right), \text{ con una amplitud de } \frac{1}{2}(a_n + a_{n+1})$$

Mientras que tomando dos amplitudes consecutivas de signo opuesto en la señal transiente:

$$v_{eq} = \frac{2}{\tau_a} \ln \left(\frac{a_n}{a_{n+\frac{1}{2}}} \right), \text{ con una amplitud de } \frac{1}{2} \left(a_n + a_{n+\frac{1}{2}} \right)$$

donde:

τ_a , periodo amortiguado.

$\frac{a_n}{a_{n+1}}$, razón de dos amplitudes consecutivas del mismo signo.

$\frac{a_{n+\frac{1}{2}}}{a_n}$, razón de dos amplitudes consecutivas de signo contrario.

1.2 Características de la embarcación y del modelo

La embarcación que se analiza experimentalmente en esta tesis es el pesquero sardinero en acero B/P Fausto V con una eslora total de 36.58 m y se emplea un modelo geoméricamente similar de 2 m de longitud. El buque desplaza 649 ton en condición de máxima carga, tiene coeficiente Bloque de 0.61 y una velocidad de acuerdo al armador de 14 nudos. El modelo es construido con el plano de líneas de formas del buque y aplicando un factor de escala de 18.00. En las líneas de formas se puede apreciar que el buque posee doble china, presenta un casco con fondo en V, carece de quillas de balance y no tiene bulbo de proa ni de popa o algún otro apéndice. Las formas del modelo que se analiza en este trabajo corresponden a las del buque, por lo tanto el coeficiente de amortiguamiento del buque puede ser determinado a partir del obtenido para el modelo.

En el presente trabajo se pretende determinar el coeficiente de amortiguamiento en balance de un buque pesquero local a partir de los resultados obtenidos de las pruebas de oscilación libre con un modelo geoméricamente similar. Las características principales del buque y del modelo en la condición cargado se presentan en la Tabla I.

Característica		Buque	Modelo	Unidades
Eslora	L	36.58	2.013	[m]
Eslora entre perpendiculares	Lpp	32.76	1.803	[m]
Manga	B	8.5	0.468	[m]
Puntal	D	4.33	0.238	[m]
Calado	d	3.42	0.188	[m]
Desplazamiento	Δ	649	0.108	[ton]
Coefficiente block	Cb	0.61	0.61	-----
Velocidad	V	14	3.28	[nudos]

Tabla I. Características principales de la embarcación y el modelo (condición cargado).

En las Figuras 3, 4 y 5 se observa que el buque posee doble china, codaste en popa tiene casco con fondo en V, carece de quillas de balance, no tiene bulbos de proa y popa. El ángulo de astilla muerta es de 10°. Como los pesqueros locales, tiene quilla con inclinación, lo que permite instalar hélices de mayor diámetro.

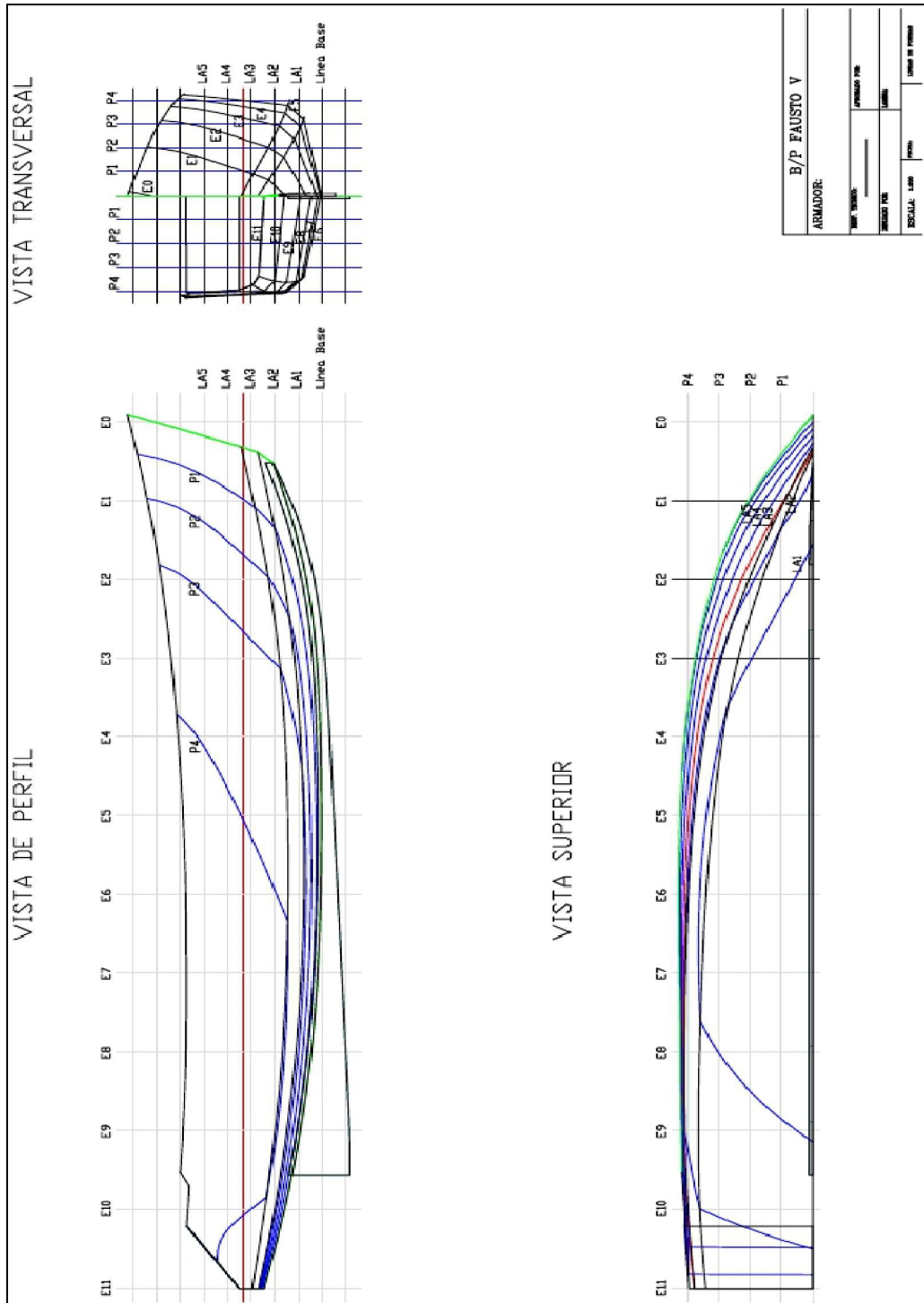


Figura 3. Plano de líneas de formas de la embarcación.



Figura 4. Modelo utilizado para las pruebas

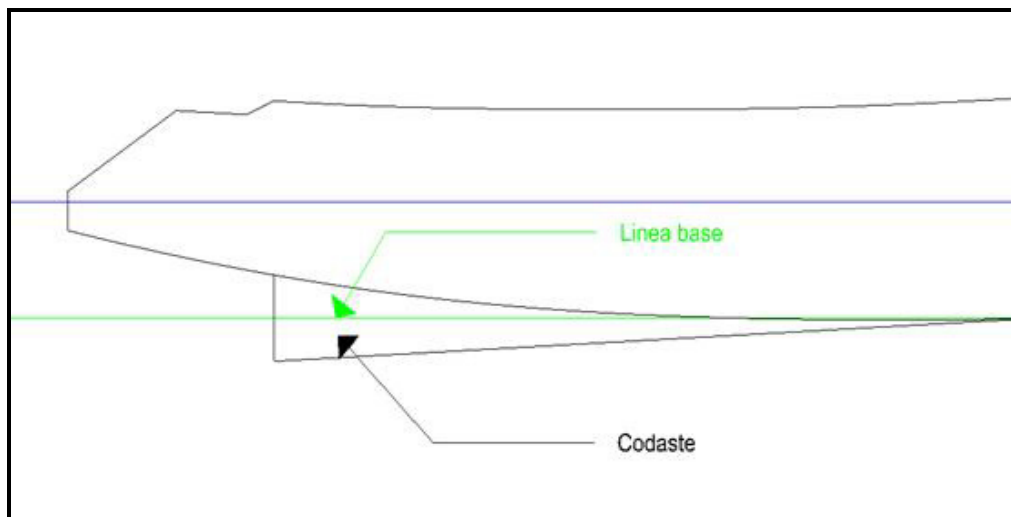


Figura 5. Codaste del modelo



Figura 6. Buque real Fausto V

[Fuente: JUNSA]

Las formas del casco con dos chinas son típicas de nuestro medio debido al bajo costo y facilidad de construcción, a diferencia de las formas con pantoque redondeado. El modelo es construido en base al plano de líneas de formas del buque, de manera que existe similitud geométrica entre ambos.

1.3 Descripción de pruebas experimentales

El coeficiente de amortiguamiento en balance de un buque se determina registrando la oscilación transiente del modelo, primero sin velocidad de avance, y luego arrastrándolo lateralmente desde un bote que avanza en forma estable. En la primera parte se efectúan pruebas de decaimiento con velocidad de avance nula, para lo cual se da al modelo un ángulo de escora inicial dejándolo luego oscilar libremente. Luego se desarrollan similares ensayos de extinción arrastrando el modelo desde una lancha que tiene un brazo lateral a distintas velocidades. El esquema experimental empleado para arrastrar el modelo permite que oscile libremente con pivote en el punto de intersección de la línea de flotación con el casco. Las pruebas incluyen variación de la condición de carga y la altura metacéntrica. Procesando las curvas de extinción, una vez filtradas y aplicando el concepto de decaimiento logarítmico se determina la razón de decaimiento y finalmente el coeficiente de amortiguamiento.

Una vez inclinado inicialmente la oscilación transiente del modelo se registra utilizando un inclinómetro digital ubicado sobre el modelo. Este proceso se aplica con diferentes condiciones de carga y alturas metacéntricas (GM). La condición de carga se define tomando los calados de proa y popa Figura 7, con el modelo adrizado; para variar el GM se utiliza un sistema que permite

desplazar un peso vertical tal como se muestra en la Figura 8, y luego se desarrolla un experimento de inclinación.

La línea base se traza tangente al punto más bajo del alefriz. Los calados reportados en este trabajo se miden respecto de dicha referencia como se muestra en la Figura 7.

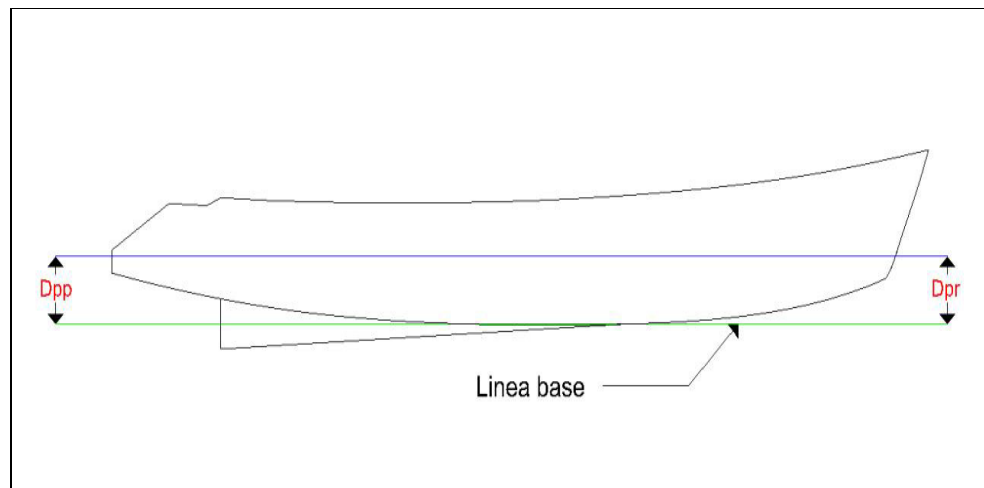


Figura 7. Punto de referencia para la toma de calados

La Figura 8 muestra el peso que se desplaza verticalmente por las barras para variar la altura metacéntrica, además se pueden ver dos pernos los cuales fijan el peso a la estructura y al mismo tiempo la base que la soporta sobre el modelo.



Figura 8. Sistema usado para variar la altura metacéntrica (GM)

Pruebas sin velocidad de avance

Las pruebas sin velocidad de avance se realizan en una piscina del área de Acuicultura de la FIMCBOR de 10x4x0.7 m, colocando el modelo en el centro, en dirección transversal tal como se muestra en la Figura 9 para evitar perturbaciones debido a las olas generadas por su movimiento. Las condiciones a ser ensayadas se resumen en la Tabla II. Estos ensayos se efectúan como sigue: se empieza el registro de la señal, luego se da al modelo una escora inicial y finalmente se lo suelta dejándolo que oscile libremente. Las curvas de decaimiento se almacenan a una razón de 50 puntos/segundos, durante 40 segundos aproximadamente.

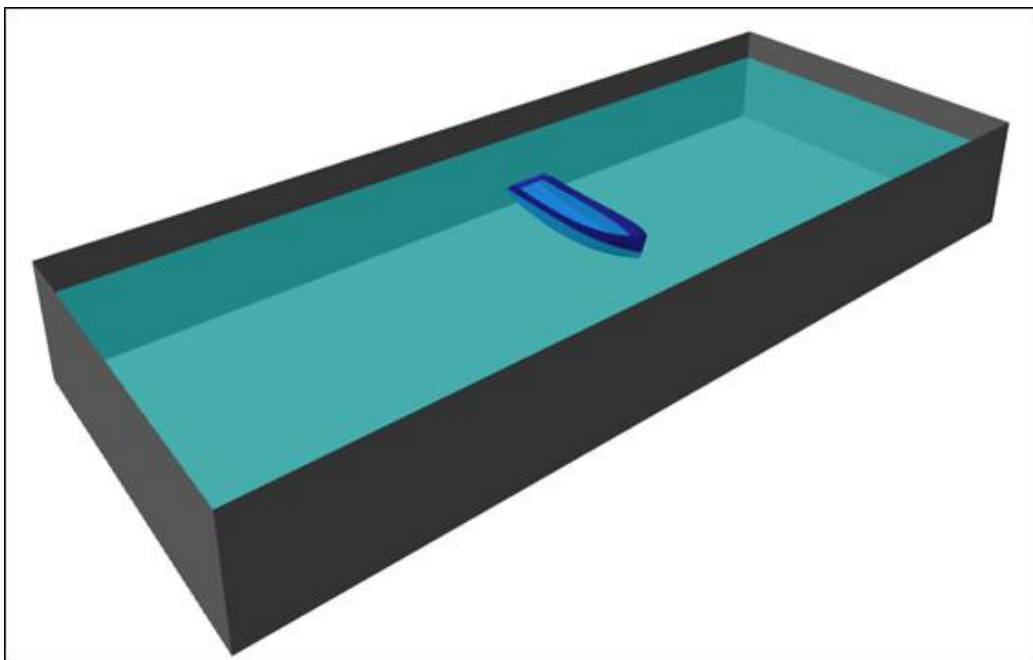


Figura 9. Lugar donde se efectúan las pruebas sin velocidad

COND. CARGA	GM [cm]	PRUEBAS
Regreso a Puerto T=11.2 cm:	6.34	(7)
	5.18	(7)
	3.19	(7)
Salida de Puerto T= 13.2 cm:	6.80	(7)
	5.00	(7)
	3.09	(7)
Cargado T=15.2 cm:	6.10	(7)
	4.93	(7)
	4.20	(7)

Tabla II. Condiciones de los ensayos de extinción sin velocidad de avance.

Pruebas con velocidad de avance

Las pruebas con velocidad de avance se realizan en el lago de la ESPOL para lo cual se emplea una lancha de 5 m de eslora, arrastrando al modelo mediante un brazo lateral de 3.2 m de longitud, Figura 10; esta distancia es suficiente para evitar que la estela de la lancha afecte el movimiento del modelo. Las condiciones a ser ensayadas se resumen en la Tabla III. Estos ensayos se efectúan a varias velocidades de avance y se procede como

sigue: Se arrastra el modelo hasta que la velocidad deseada se estabilice y se le da una escora inicial Figura 10 , luego se lo suelta dejándolo que oscile libremente. Luego del inicio de la oscilación, el dispositivo empleado no interfiere en el movimiento subsiguiente. Las curvas de decaimiento se registran una vez que la velocidad se estabiliza y se almacenan a una razón de 100 puntos/segundos durante 40 segundos.

COND. CARGA	GM [cm]	PRUEBAS
Regreso a Puerto T=11.2 cm:	7.45	(20 ensayos) 0.55-1.98
	5.64	(20 ensayos) 0.75-1.98
	3.96	(20 ensayos) 0.65-1.99
Salida de Puerto T= 13.2 cm:	7.16	(20 ensayos) 0.78-2.28
	5.37	(20 ensayos) 0.75-2.28
	3.80	(20 ensayos) 0.84-2.27
Cargado T=15.2 cm:	6.21	(20 ensayos) 0.81-1.77
	5.24	(20 ensayos) 0.63-1.63
	3.70	(20 ensayos) 0.63 -1.83

Tabla III. Condiciones de los ensayos de extinción con velocidad de avance.

La Figura 10 muestra el esquema empleado para los ensayos de extinción con velocidad de avance. El modelo es halado desde los extremos de Proa, en un punto cercano a la correspondiente línea de flotación. Algo similar es empleado en la popa instalando dos tensiones para evitar que el modelo se mueva lateralmente. Este sistema permite que el modelo oscile libremente con pivote en el punto de intersección de la línea de flotación con el casco.



Figura 10. Esquema empleado para las pruebas de oscilación.

En la Figura 11 se observa el sistema empleado para dar la escora inicial al modelo desde la lancha. Esto es halando simultáneamente babor y estribor hacia abajo y arriba respectivamente y así la sumatoria de fuerzas verticales se cancele, para evitar el movimiento de Levantamiento acoplado al Balance.

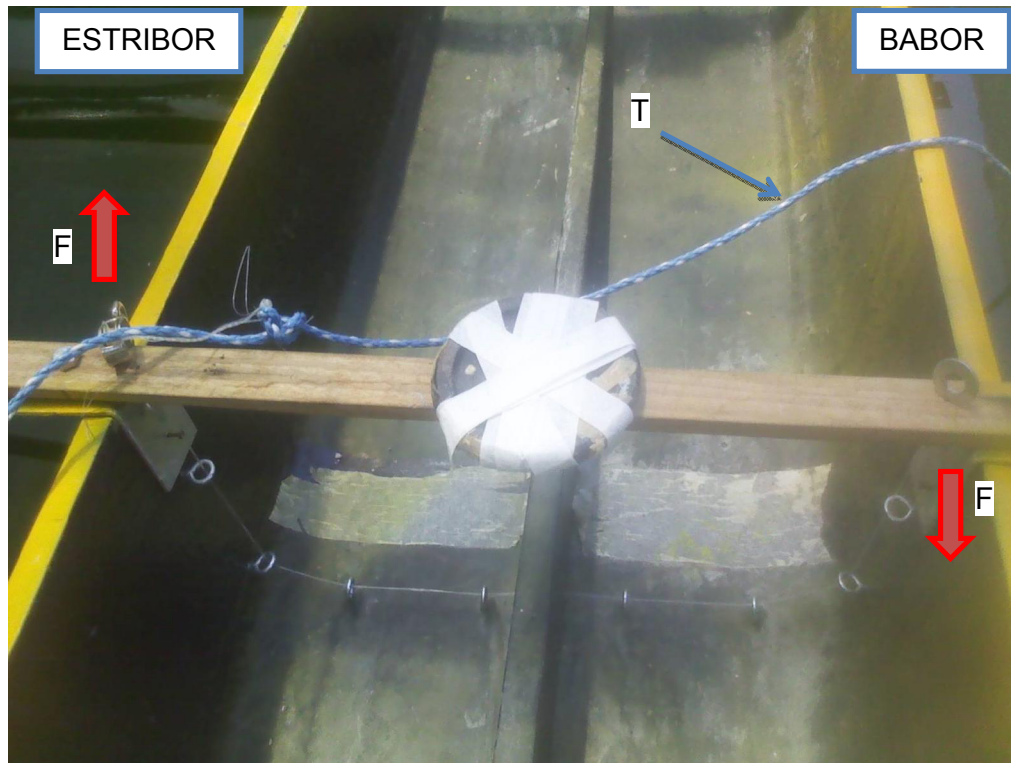


Figura 11. Sistema empleado para dar la escora inicial del modelo.

1.4 Análisis dimensional del coeficiente de amortiguamiento

El coeficiente de amortiguamiento en balance de un buque se obtiene a partir del obtenido para el modelo mediante el correspondiente análisis dimensional; sin embargo las unidades de los términos no lineales merecen una atención especial. Considerando no linealidades cuadrática y cúbica respecto a la velocidad angular, la dependencia del coeficiente de amortiguamiento para la amplitud del ángulo de balance incluye tres términos según Bulian [5] y Pawlowski [8]: lineal, cuadrático y cúbico. El término cuadrático es proporcional al producto de la velocidad angular multiplicando por su valor absoluto; el coeficiente tendrá unidades de $[FLT^2]$. El momento amortiguador tiene como unidades $[FL]$, por lo tanto para mantener las mismas unidades al coeficiente de amortiguamiento lineal le corresponde $[FLT]$, al cuadrático $[FLT^2]$, y al cúbico $[FLT^3]$. En el análisis de la influencia de la velocidad de avance al trabajar a amplitudes relativamente pequeñas se considera únicamente el término lineal. Finalmente los coeficientes de amortiguamiento en balance de un buque se pueden obtener adimensionando los del modelo que al carecer de dimensiones no dependen del factor de escala, [12].

Entre prototipo y modelo existe similitud estática y dinámica, por tanto el coeficiente de amortiguamiento del buque puede ser obtenido a partir de los ensayos con modelo.

Los coeficientes de amortiguamiento del modelo son obtenidos considerando lo siguiente:

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

$$b \equiv 2v_{eq}, [8]$$

$$v_{eq} = \frac{1}{2} b_1 + \frac{4}{3\pi} b_2 (\omega_n a) + \frac{3}{8} b_3 (\omega_n a)^2 \quad (5)$$

La deducción de la ecuación (5) se presenta en el Anexo A, donde los coeficiente b_1 , b_2 y b_3 son determinados a partir de las constantes de la ecuación polinómica de segundo grado, la cual es obtenida de la gráfica del coeficiente de amortiguamiento equivalente por ciclo v versus la amplitud media del ángulo de balance.

Las unidades de los coeficientes b_1 , b_2 y b_3 son fácilmente identificables considerando que las de v_{eq} son $[1/T]$, por lo tanto al coeficiente Lineal le corresponde $[1/T]$, al cuadrático $[AD]$, y al cúbico $[T]$.

Las dimensiones del momento amortiguador $N\dot{\phi}$ son [FL] y las de la velocidad angular $\dot{\phi}$, [1/T], entonces la del coeficiente de amortiguamiento N vienen dada por [FLT]. La ecuación para el análisis de la no linealidad está definida de la siguiente forma:

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

0

Recordando que las dimensiones de la velocidad angular [1/T] las unidades de los diferentes coeficientes de amortiguamiento vienen dadas de la siguiente forma:

N_1 , [FLT] término Lineal

N_2 , [FLT²] término Cuadrático

N_3 , [FLT³] término Cúbico

Los coeficientes de amortiguamiento se pueden adimensionalizar utilizando las siguientes expresiones, [12]:

El término lineal [FLT].

$$N_{1a} = \frac{N_1}{\rho \nabla B^2} \sqrt{\frac{B}{2g}}$$

$$\frac{[FLT]}{[FL^{-4}T^2][L^3][L^2]} \sqrt{\frac{[L]}{[LT^{-2}]}} = \frac{[FLT][T]}{[FT^2][L]} = [ad]$$

El término cuadrático [FLT²].

$$N_{2a} = \frac{N_2}{\rho \nabla B^2}$$

$$\frac{[FLT^2]}{[FL^{-4}T^2][L^3][L^2]} = \frac{[FLT^2]}{[FT^2][L]} = [ad]$$

El término cúbico [FLT³].

$$N_{3a} = \frac{N_3}{\rho \nabla B^2} \sqrt{\frac{2g}{B}}$$

$$\frac{[FLT^3]}{[FL^{-4}T^2][L^3][L^2]} \sqrt{\frac{[LT^{-2}]}{[L]}} = \frac{[FLT^3][T^{-1}]}{[FT^2][L]} = [ad]$$

Los coeficientes adimensionales de amortiguamiento del modelo y del prototipo pueden ser comparados por no depender del factor de escala.

$$N_{1s} = N_{1m}$$

$$\left(\frac{N_1}{\rho \nabla B^2} \sqrt{\frac{B}{\lambda g}} \right)_s = \left(\frac{N_1}{\rho \nabla B^2} \sqrt{\frac{B}{\lambda g}} \right)_m$$

$$\frac{N_{1s}}{\rho_s \nabla_s B_s^2} \sqrt{\frac{B_s}{2g}} = \frac{N_{1m}}{\rho_m \nabla_m B_m^2} \sqrt{\frac{B_m}{2g}}$$

$$N_{1s} = \frac{\rho_s \nabla_s B_s^2}{\rho_m \nabla_m B_m^2} \sqrt{\frac{B_m}{2g}} \sqrt{\frac{2g}{B_s}} N_{1m}$$

$$N_{1s} = \frac{\rho_s \nabla_s B_s^2}{\rho_m \nabla_m B_m^2} \sqrt{\frac{B_m}{2g}} \sqrt{\frac{2g}{B_s}} N_{1m}$$

$$N_{1s} = c \lambda^3 \lambda^2 \lambda^{-1/2} N_{1m}$$

$$N_{1s} = c \lambda^{9/2} N_{1m}$$

En la relación anterior la constante c es la relación de las densidades del fluido en el que opera el Buque y en el que se realizan los ensayos con el modelo. Los términos cuadrático y cúbico obedecen las siguientes expresiones:

$$N_{2s} = c \lambda^5 N_{2m}$$

$$N_{3s} = c \lambda^{11/2} N_{3m}$$

CAPÍTULO 2

INFLUENCIA DE LA NO LINEALIDAD Y LA VELOCIDAD DE AVANCE EN EL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO

2.1 Resultados de las pruebas experimentales

Los resultados obtenidos de los ensayos de extinción realizados con (C/V) y sin (S/V) velocidad de avance se analizan por separado para determinar el coeficiente de amortiguamiento en cada condición analizada. El proceso para analizar estas curvas es el siguiente: primero se alisa (filtra) el registro, después se obtienen los máximos locales y los periodos, y, luego aplicando el concepto del decremento logarítmico se determina la razón de decaimiento y finalmente se obtiene el coeficiente de amortiguamiento equivalente por ciclo. La relación del coeficiente de amortiguamiento con la amplitud y la velocidad de avance, permiten analizar dichas influencias.

La obtención del coeficiente de amortiguamiento de un modelo es posible a partir de las curvas de decaimiento en balance libre, las cuales siguen el proceso detallado a continuación:

- i. Primero se alisan las curvas con la finalidad de eliminar perturbaciones externas a lo largo del registro para esto se utiliza el programa de graficación Easy Plot.

El inicio de la oscilación en cada prueba se realiza al inclinar el modelo, tratando de no alterar su calado medio y asiento; sin embargo dado que este proceso era manual, muy posiblemente se introducía algún cambio en dichos parámetros. Por ello, el primer ciclo de la oscilación libre del modelo no es considerado en la determinación del coeficiente de amortiguamiento.

El número de puntos del alisado de las curvas de decaimiento está relacionado con el número de segmentos necesarios para describir un ciclo (aproximadamente 10). Los registros de las pruebas sin velocidad de avance se realizan a una razón de 50 puntos/segundos, y si el periodo de oscilación es de 2 segundos aproximadamente, se tiene un total de 80 puntos para describir un ciclo. De manera que el número de puntos por segmento para el filtrado es alrededor de 8. En el caso de

las pruebas con velocidad de avance se registran con una razón de 100 puntos/segundos, de manera que número de puntos por segmento en este caso se duplica.

- ii. Considerando que el inclinómetro no está en posición totalmente horizontal y además que es prácticamente imposible que el modelo esté completamente adrizado, la curva de decaimiento oscila alrededor de un punto diferente de cero. Entonces esta curva se debe desplazar verticalmente hasta que el ángulo final sea nulo. Luego se determinan los periodos de oscilación y los máximos locales.
- iii. Finalmente se obtiene el coeficiente de amortiguamiento equivalente por ciclo asociado a la amplitud media correspondiente.

La Figura 12, compara la curva registrada en las pruebas experimentales y que se obtiene luego de ser suavizada con el método "*sliding data window*" utilizando el programa Easy Plot. Dicho método luego de desarrollar el alisamiento mantiene el mismo número de puntos en ambas curvas. Una vez filtrada la señal los periodos de oscilación y los máximos locales se obtienen mediante interpolación lineal y cuadrática respectivamente.

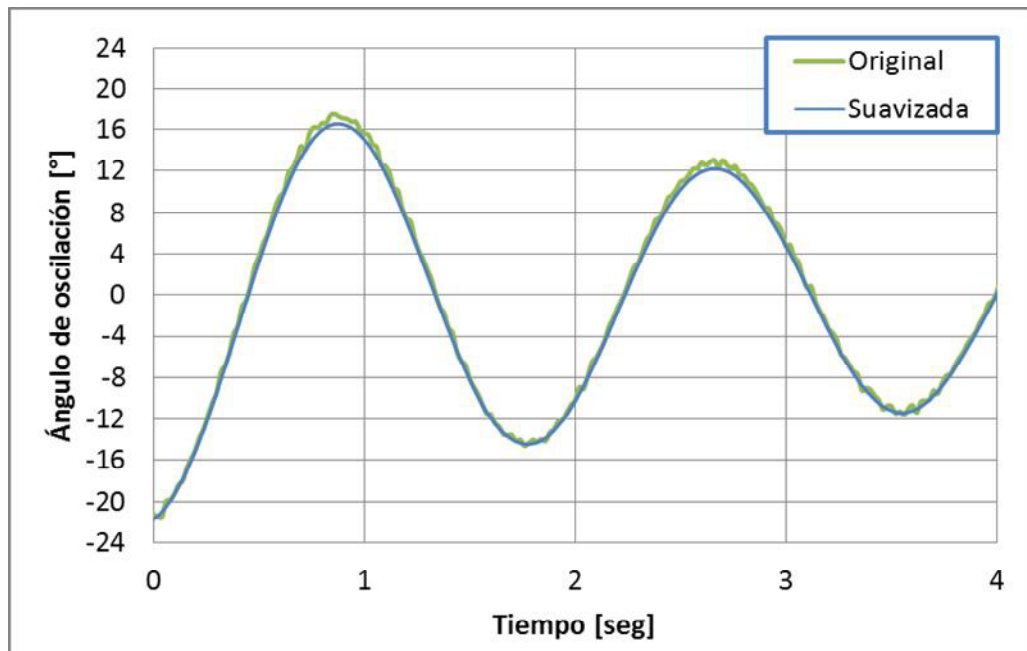


Figura 12. Curvas de decaimento original e suavizada.

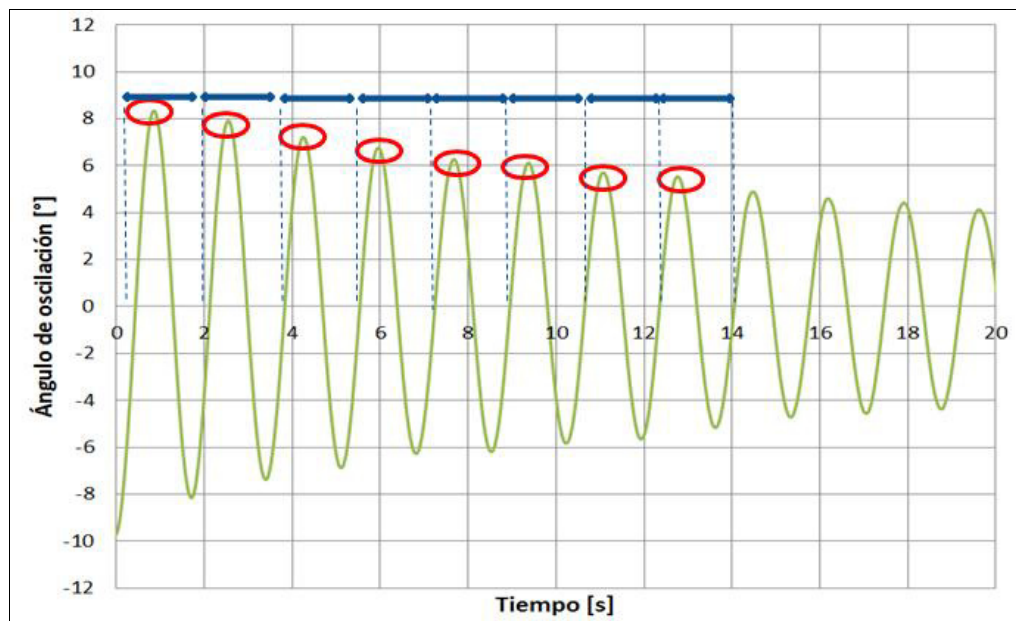


Figura 13. Períodos de oscilação e máximos locais.

Resultados de las pruebas sin velocidad de avance

En la Figura 14 se muestran las curvas de decaimiento obtenidas luego de procesar los resultados de las pruebas sin velocidad de avance para la condición 1.1, $\Delta=48\text{kg}$.

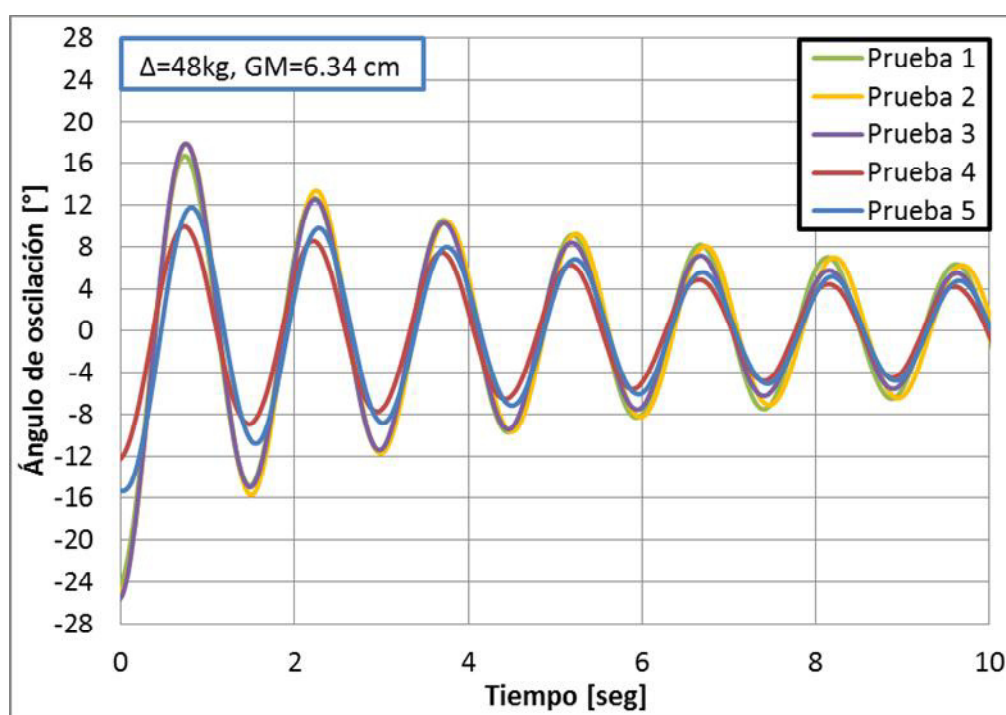


Figura 14. Curvas de decaimiento oscilación libre S/V condición 1.1

Desde la Figura 15 hasta la Figura 23 se observa el coeficiente de amortiguamiento por ciclo versus la amplitud media de los resultados de las curvas de decaimiento de una condición ensayada. La tendencia que muestran las curvas permite seleccionar cuales ensayos considerar para el

análisis de la influencia del ángulo de balance sobre el coeficiente de amortiguamiento. Estas curvas muestran tendencia cuadrática creciente, además para ángulos pequeños el coeficiente de amortiguamiento es prácticamente constante. En el siguiente subcapítulo empleando las ecuaciones de regresión se determinarán los factores Lineal, Cuadrático y Cúbico del coeficiente de Amortiguamiento.

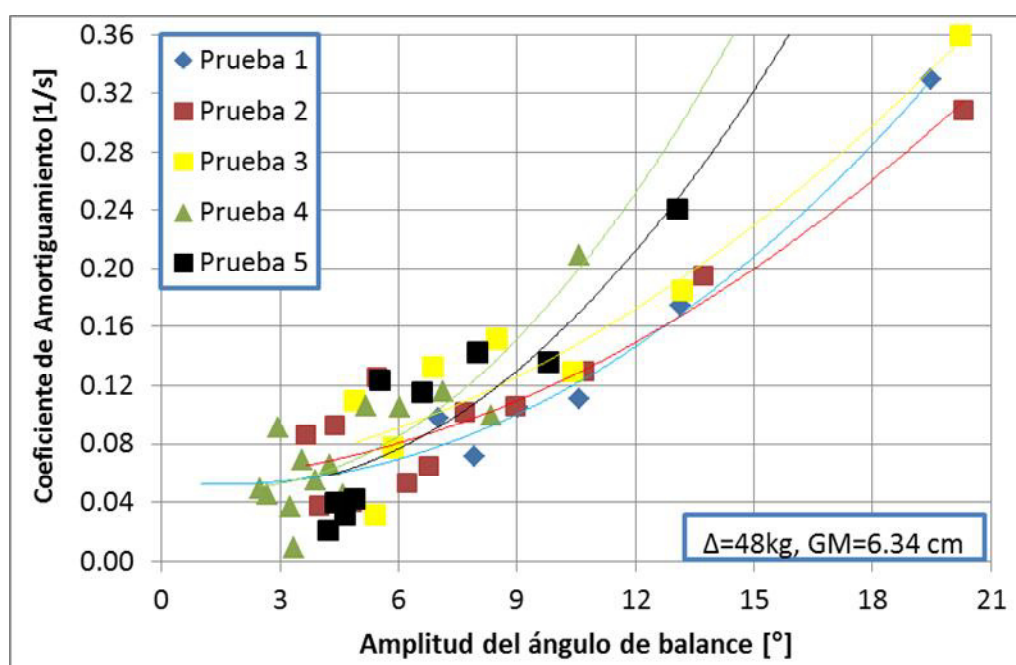


Figura 15. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 1.1

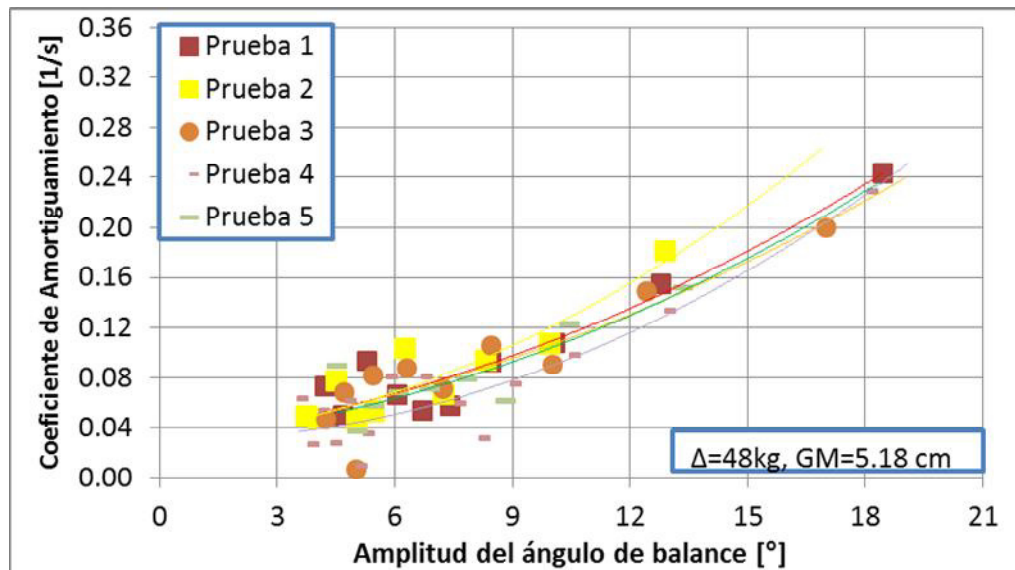


Figura 16. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 1.2

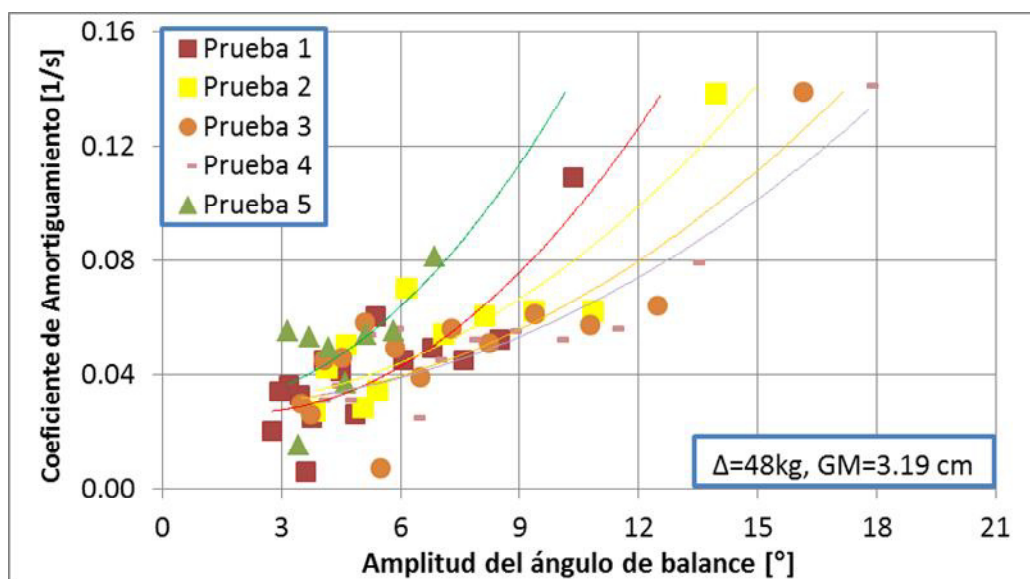


Figura 17. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 1.3

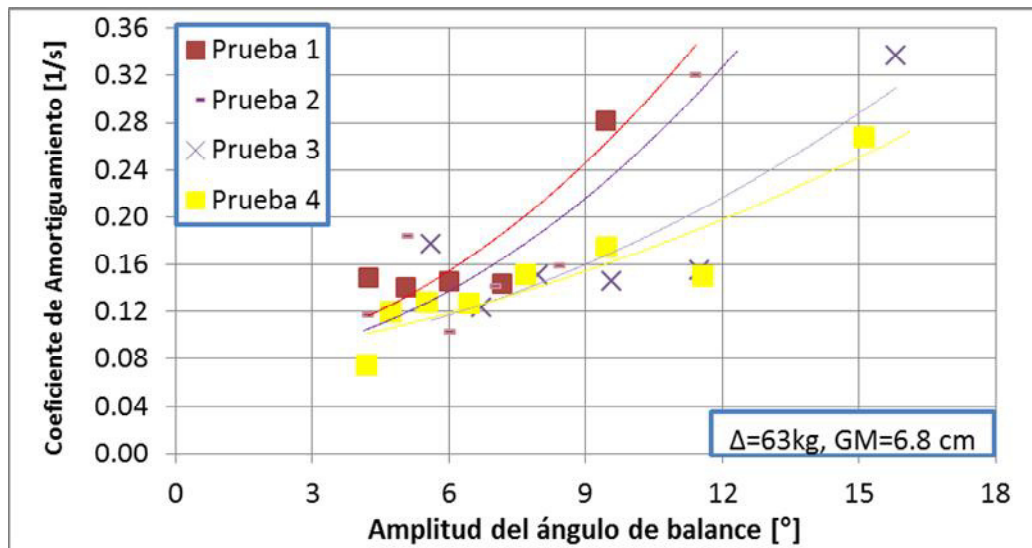


Figura 18. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 2.1

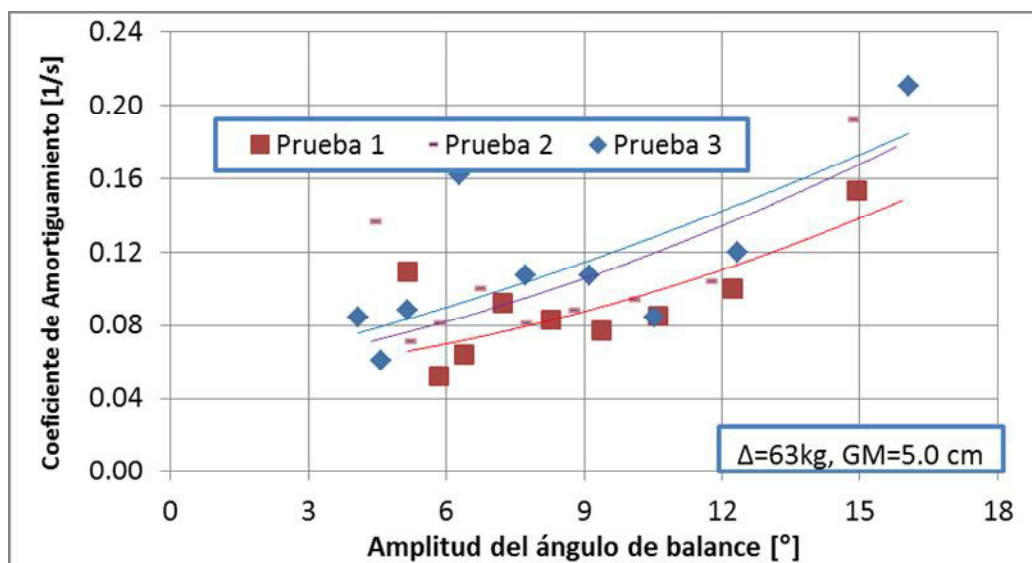


Figura 19. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 2.2

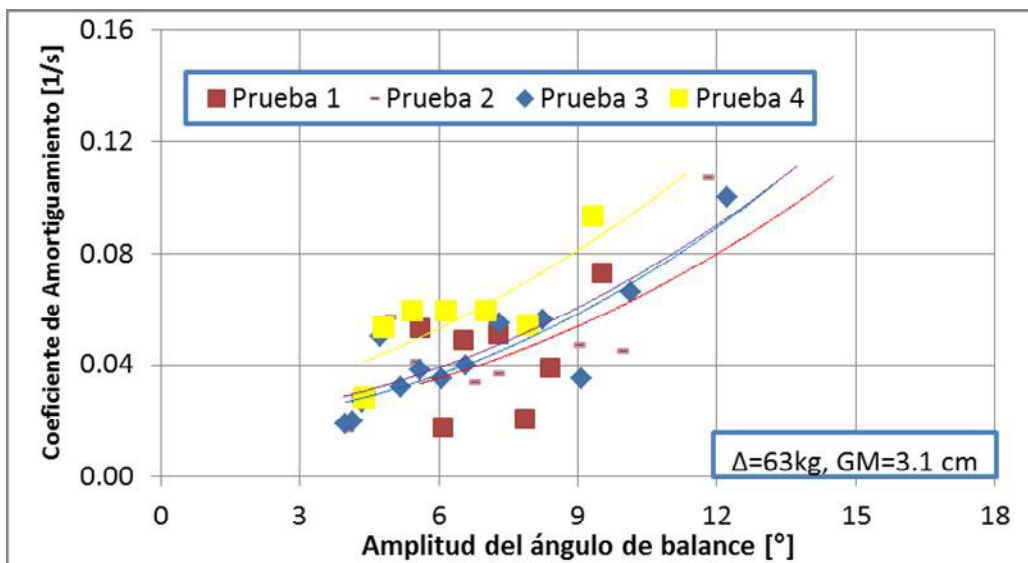


Figura 20. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 2.3

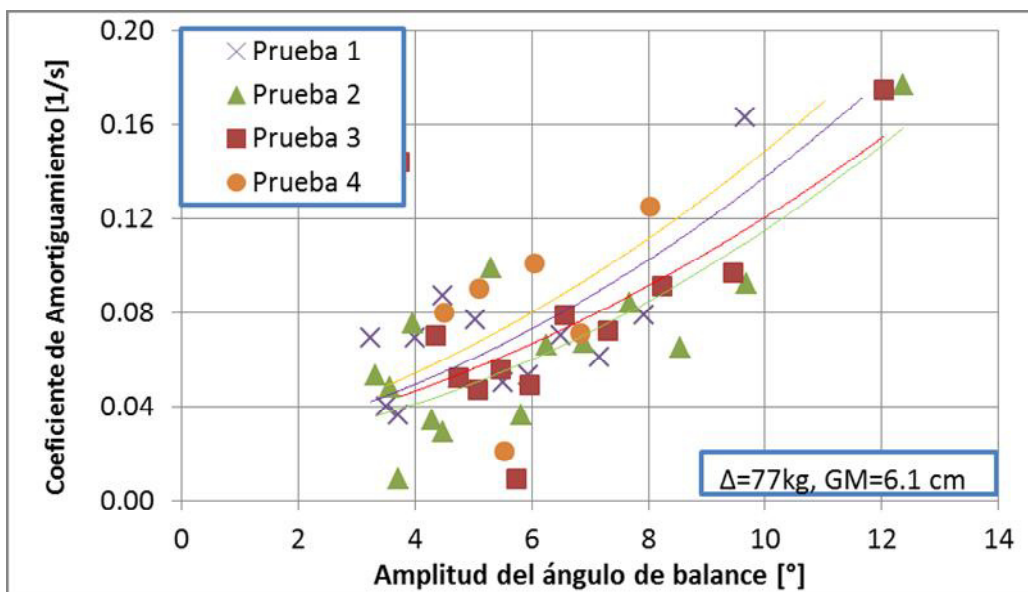


Figura 21. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 3.1

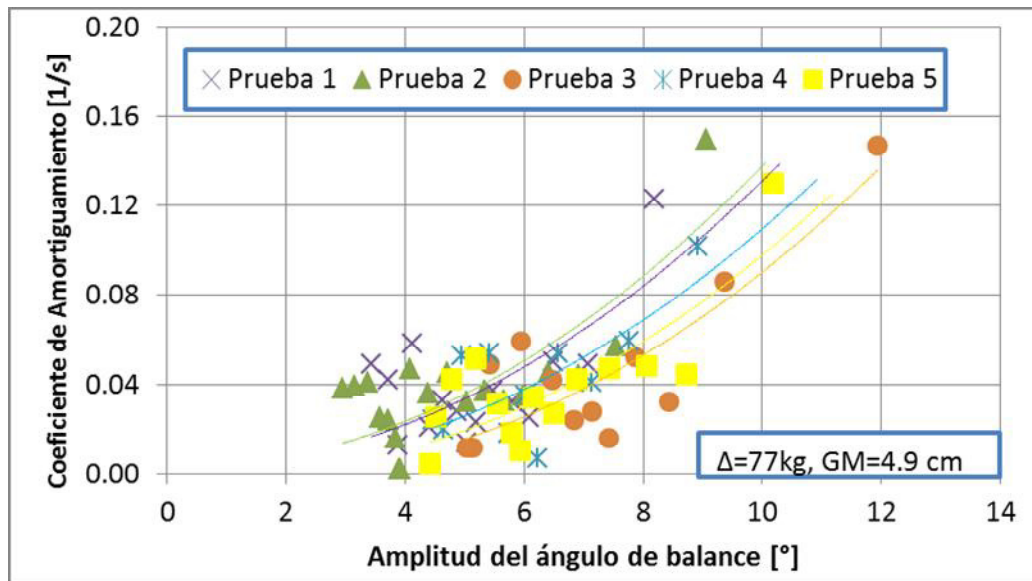


Figura 22. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 3.2

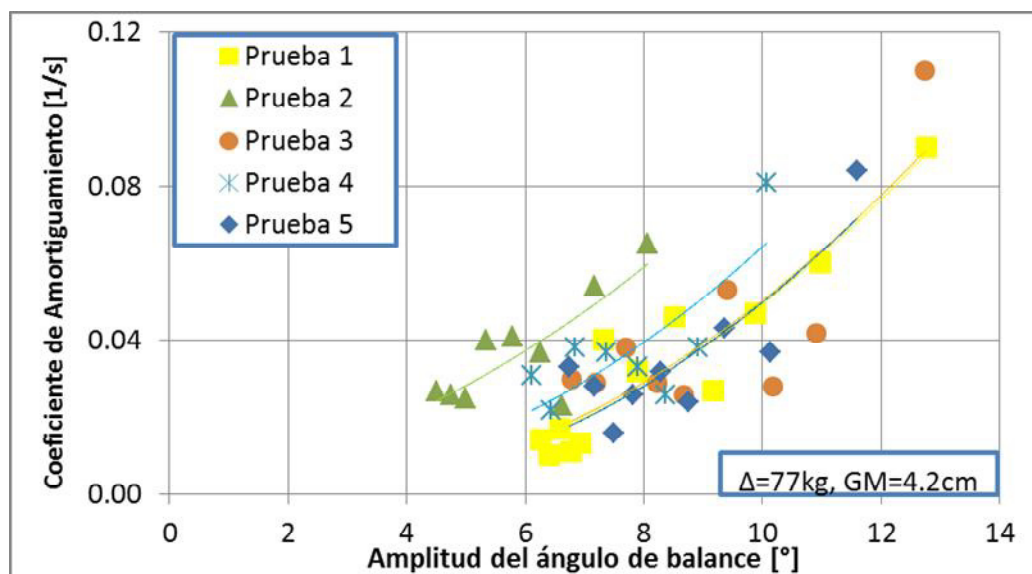


Figura 23. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance condición 3.3

Resultados de las pruebas con velocidad de avance

Los resultados de las pruebas de Decaimiento realizadas arrastrando el modelo en el lago con varias velocidades de avance permiten evaluar la influencia de dicho parámetro sobre el coeficiente de amortiguamiento en Balance. Las curvas de decaimiento en oscilación libre que se seleccionan para la evaluación de este parámetro cubren solamente tres ciclos, dado que la disipación de energía es bien elevada y por seguridad del equipo, el ángulo de escora inicial está limitado. En las Figuras 24, 25 y 26 que presenta registros con varias velocidades de avance [m/s], se observa que la amplitud del ángulo de balance de las curvas de decaimiento decrece más rápido a mayor velocidad. Esto es indicativo que el coeficiente de amortiguamiento en balance se incrementa con dicho parámetro.

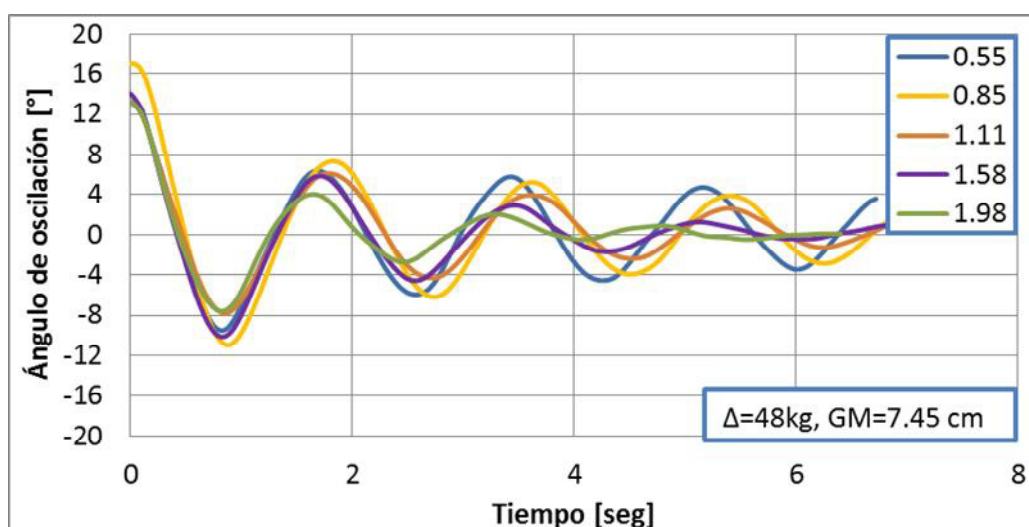


Figura 24. Curvas de decaimiento oscilación libre C/V condición 1.1

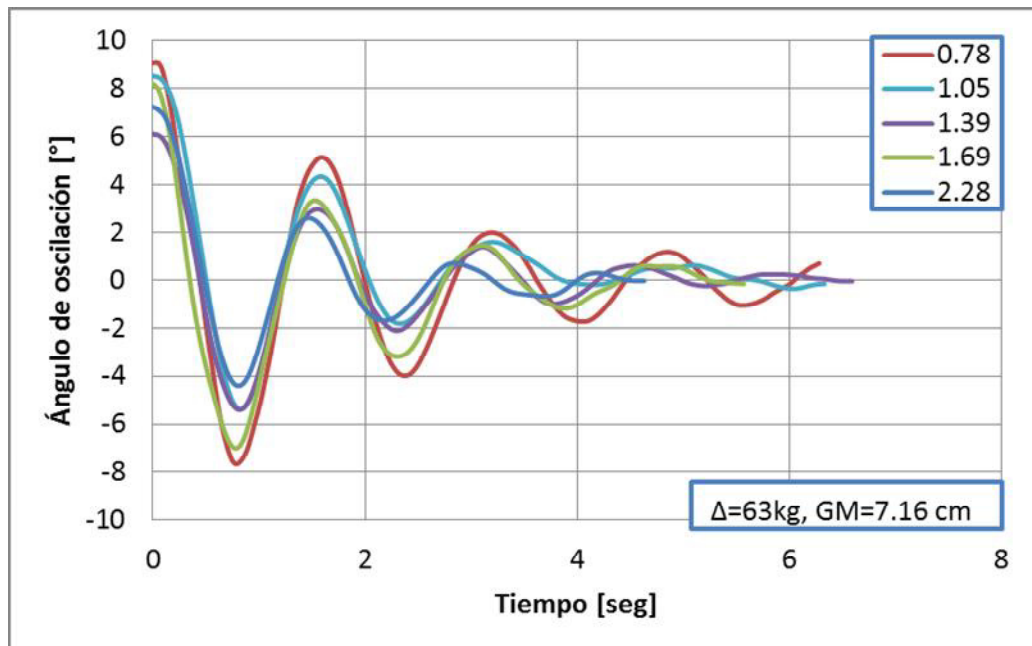


Figura 25. Curvas de decaimiento oscilación libre C/V condición 2.1

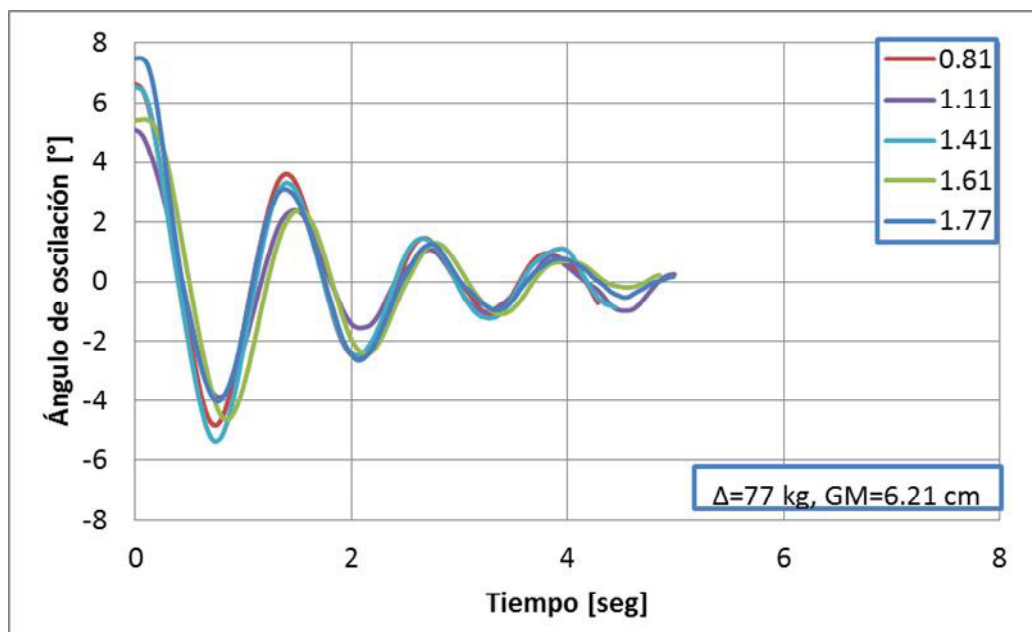


Figura 26. Curvas de decaimiento oscilación libre C/V condición 3.1

2.2 Influencia de la amplitud del ángulo de balance

A partir de los resultados experimentales sin velocidad de avance, el coeficiente de amortiguamiento en balance se incrementa en forma aproximadamente cuadrática con la amplitud de oscilación. La influencia de la amplitud se estudia graficando el coeficiente de amortiguamiento versus la amplitud media en cada ciclo. Para este análisis se ha considerado no linealidades cuadrática y cúbica en el coeficiente de amortiguamiento respecto a la velocidad angular. Una simulación numérica de la ecuación diferencial ordinaria del balance libre desacoplado con el método de Runge-Kutta de cuarto orden permite comprobar que los valores determinados de los coeficientes de amortiguamiento son confiables. El término lineal se incrementa con la frecuencia de oscilación, mientras que el término cuadrático se incrementa cuando el término cúbico decrece y viceversa. El factor de amortiguamiento adimensional ξ disminuye conforme se incrementan la condición de carga y el periodo de oscilación.

Graficando el coeficiente de amortiguamiento versus la amplitud media en cada ciclo, y desarrollando una regresión, permite determinar los coeficientes no lineales de dicha relación. Las Figuras 27, 28, 29 permiten determinar los coeficientes de amortiguamiento b_1 , b_2 y b_3 igualando las constantes obtenidas de la regresión cuadrática con los términos de la ecuación del coeficiente equivalente. Estos coeficientes son independientes de la

amplitud media del ángulo de balance. En la ecuación del coeficiente equivalente, la amplitud del ángulo de balance está en radianes y en la ecuación de regresión en grados, esto debe ser considerado al momento de determinar cada término.

$$v_{\text{eq}} = \frac{1}{2} b_1 + \frac{4}{3\pi} b_2 (\omega_n a) + \frac{3}{8} b_3 (\omega_n a)^2$$

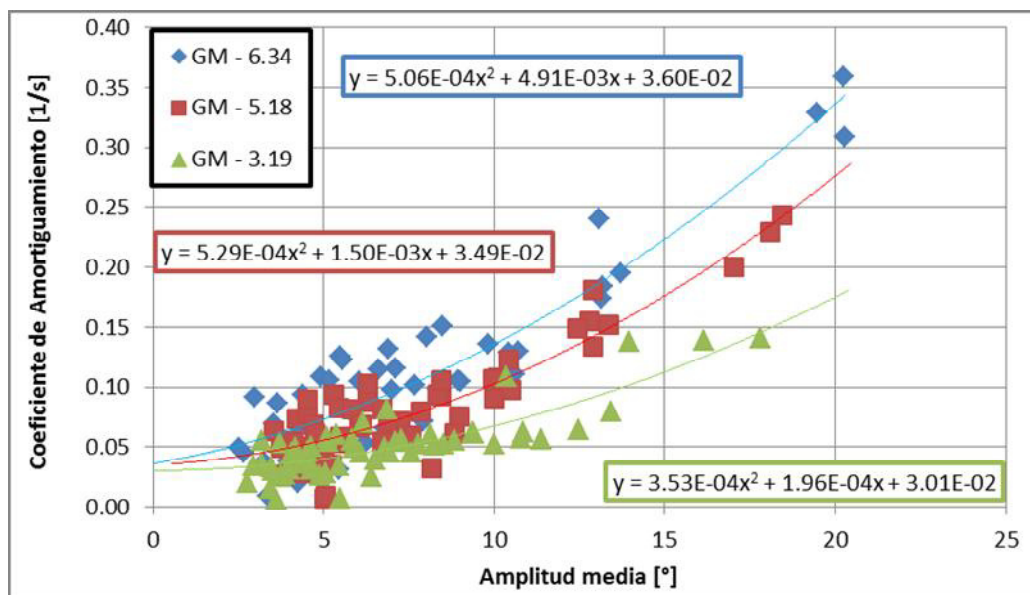


Figura 27. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=48$ kg

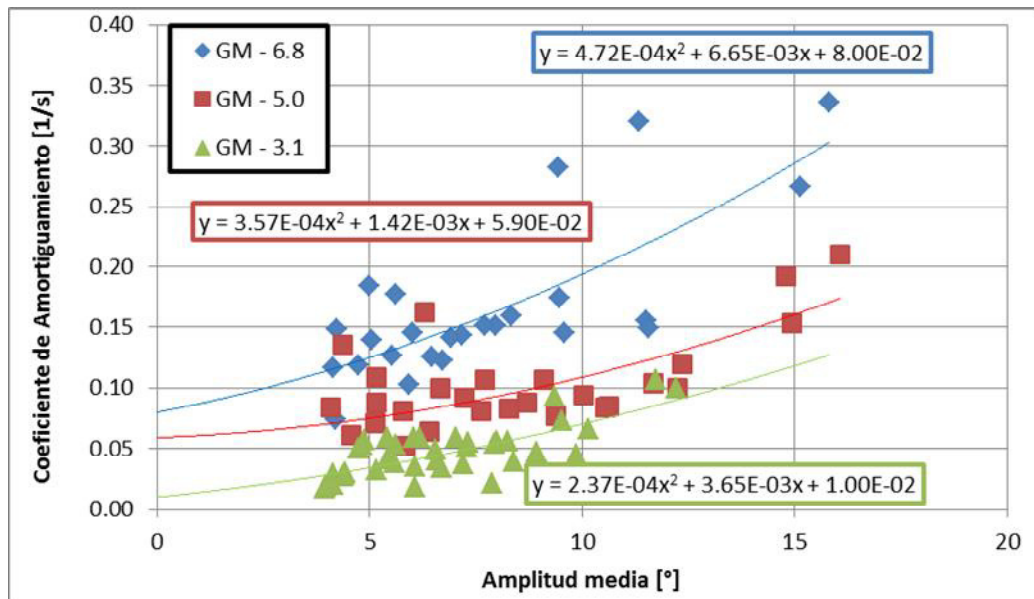


Figura 28. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=63$ kg

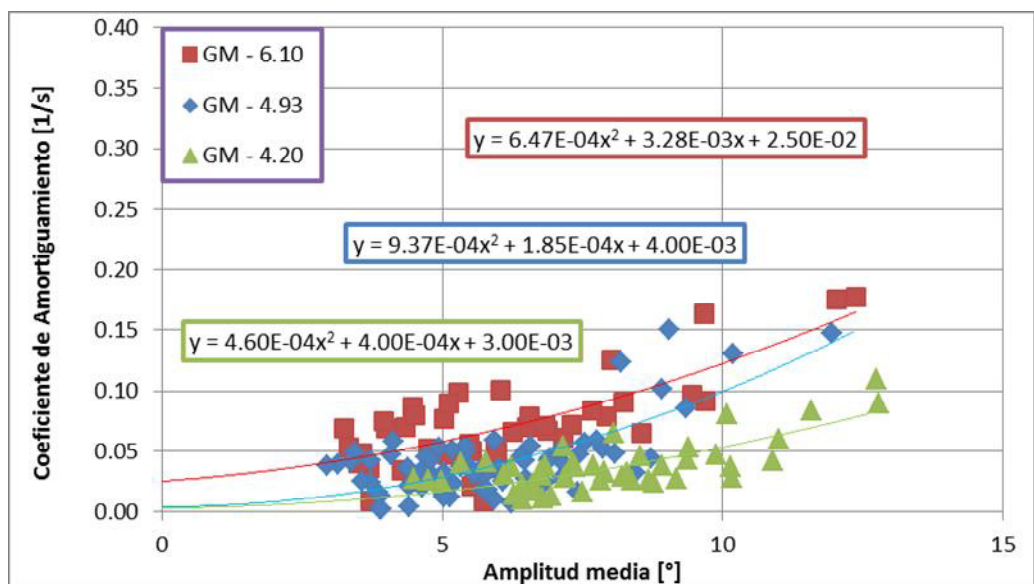


Figura 29. Coeficiente de amortiguamiento versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=77$ kg

Otro parámetro de interés es la frecuencia de oscilación que se determina a partir de los resultados de las pruebas experimentales. Las Figuras 30, 31, 32 muestran la frecuencia de oscilación versus la amplitud media del ángulo de balance. A ángulos de gran amplitud se muestra que la frecuencia de oscilación se incrementa para una altura metacéntrica alta y decrece para una baja. Mientras que para ángulos pequeños la frecuencia de oscilación es constante.

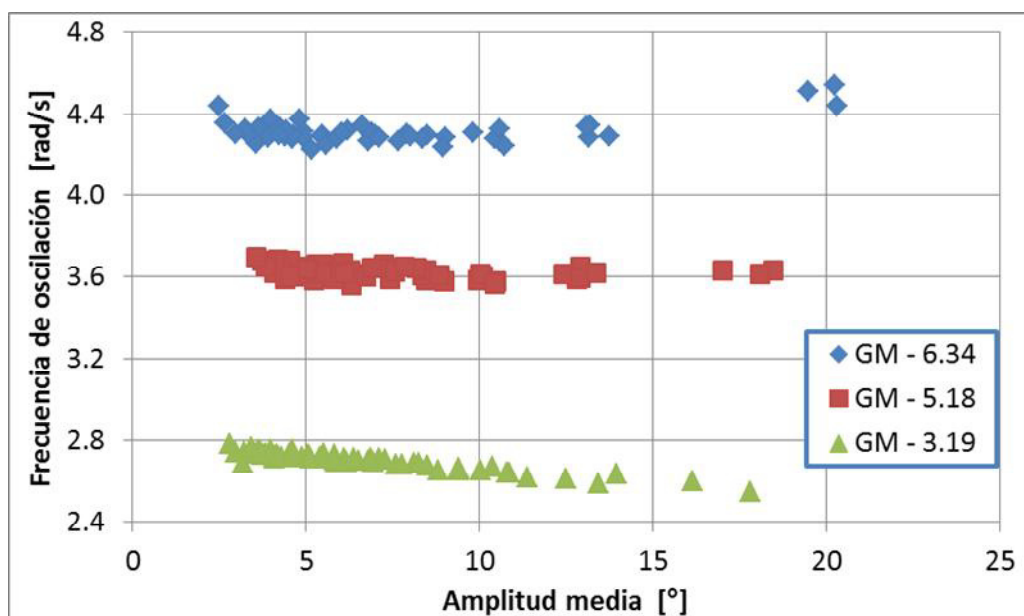


Figura 30. Frecuencia de oscilación versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=48$ kg

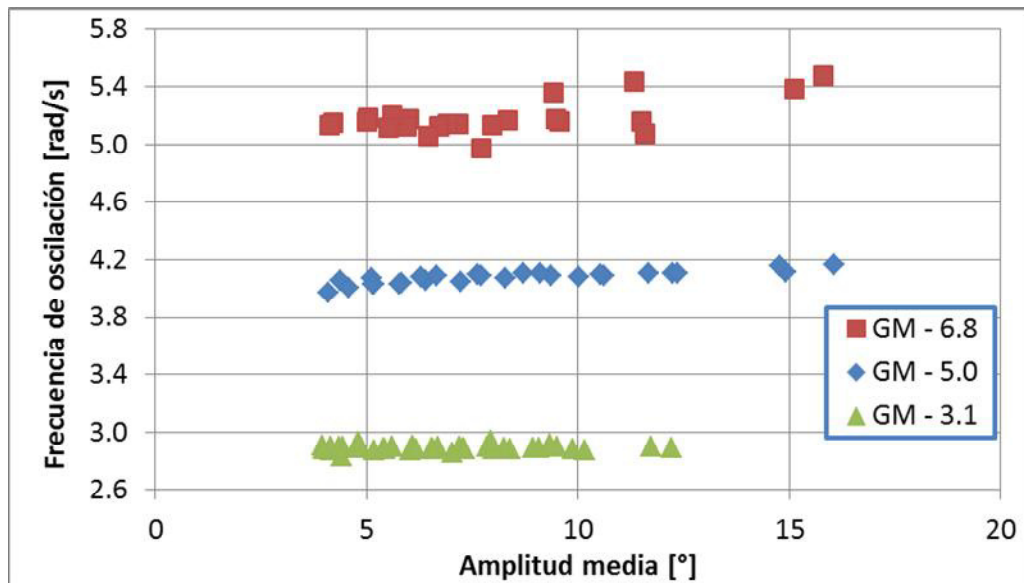


Figura 31. Frecuencia de oscilación versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=63$ kg

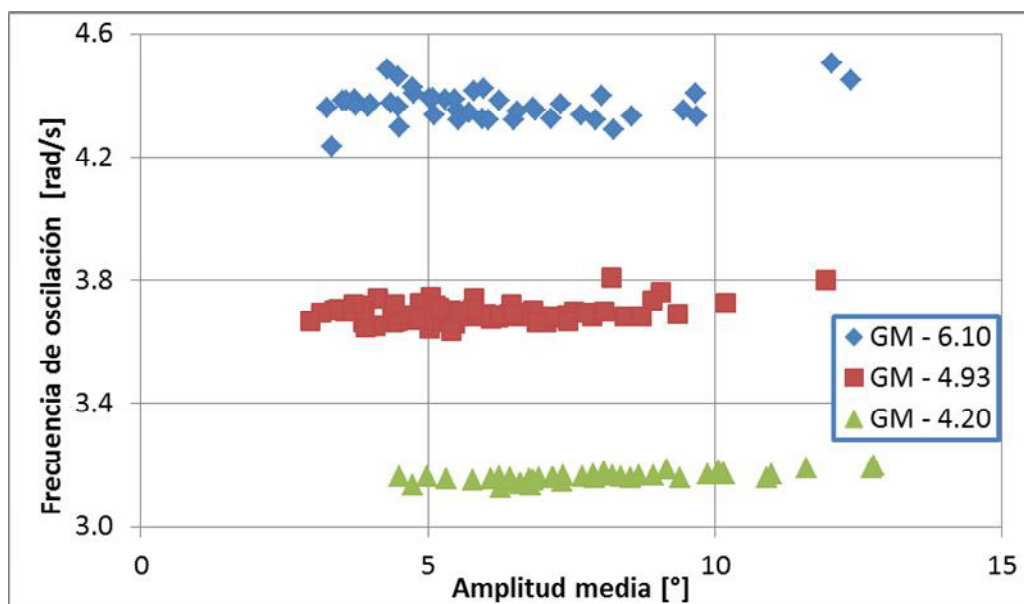


Figura 32. Frecuencia de oscilación versus la Amplitud media del ángulo de Balance, $\Delta=77$ kg

La validez de los valores de los coeficientes de amortiguamiento obtenidos experimentalmente se evalúa con una simulación numérica de la ecuación diferencial ordinaria del balance libre desacoplado con el método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden, [9]; se emplea un incremento en tiempo de 0.02 segundos correspondientes al intervalo de los datos de la curva experimental. En la Figura 33 se muestra la curva de decaimiento experimental junto con la numérica para una de las pruebas con la condición de carga 1 y GM de 5.18 cm, notándose bastante similitud entre ellas. Comparando la amplitud del séptimo ciclo, la experimental tiene un decaimiento de 0.260, mientras que la numérica tiene un valor de 0.235; se estima que esta diferencia se produce porque el brazo adrizante fue linealizado: $GM\varphi$.

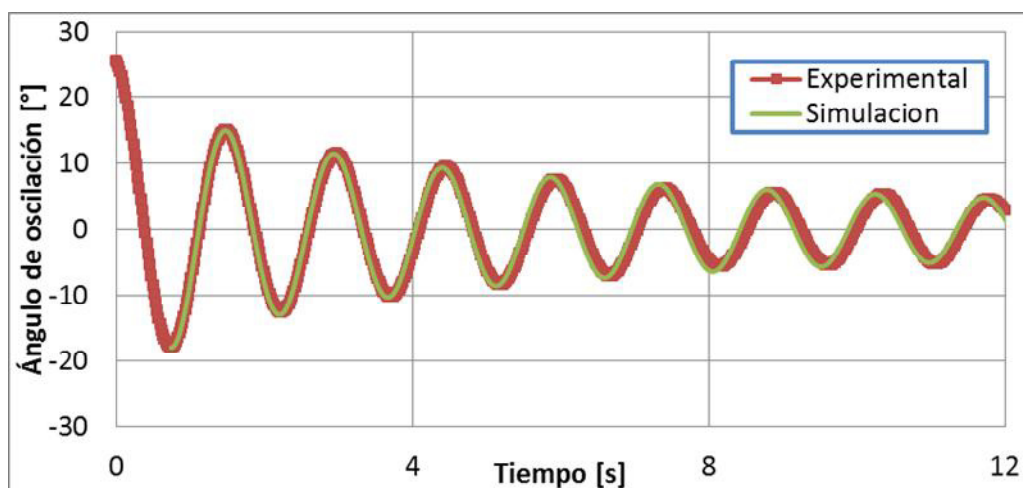


Figura 33. Comparación de la curva experimental y la obtenida de la simulación (Condición 1, GM=5.18 cm).

El factor de amortiguamiento adimensional es la relación que existe entre el coeficiente de amortiguamiento del sistema y el Crítico, que a su vez es el producto de dos veces la inercia virtual por la frecuencia. En las Figuras 34, 35, 36 se grafica el factor de amortiguamiento versus la amplitud del ángulo de balance, las cuales muestran que el factor de amortiguamiento adimensional ξ decrece al incrementar la condición de carga, y se incrementa con la frecuencia de oscilación, esto es de esperarse por lo expuesto anteriormente. De los resultados de las pruebas experimentales se determinó también el radio virtual de giro, que se presenta en forma adimensional respecto de la manga en la tabla IV. Los resultados muestran que dicho parámetro se incrementa cuando se reduce la frecuencia.

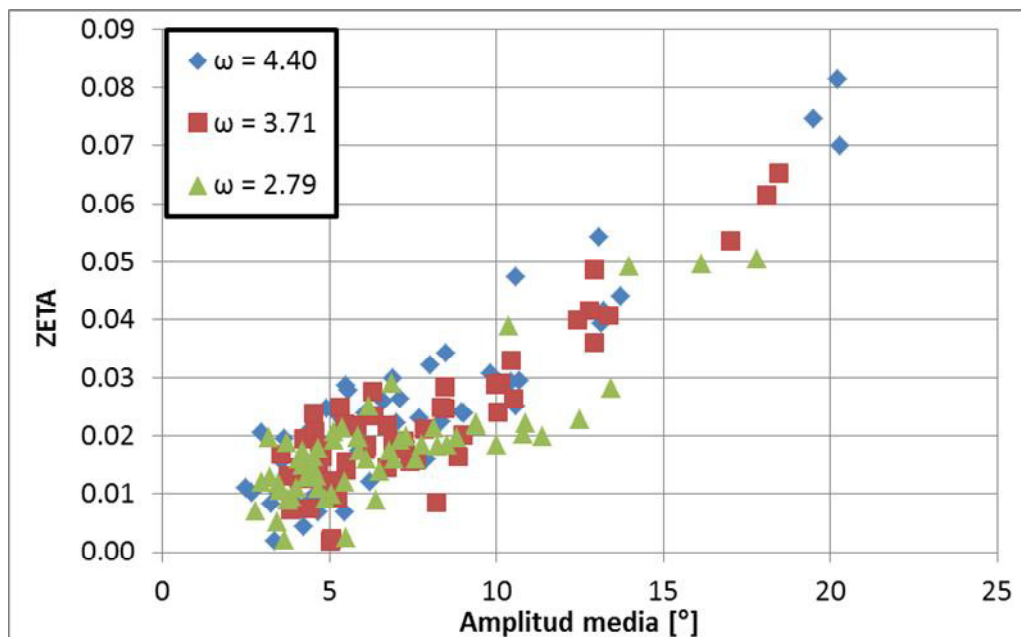


Figura 34. Factor de amortiguamiento adimensional ξ , $\Delta=48$ kg

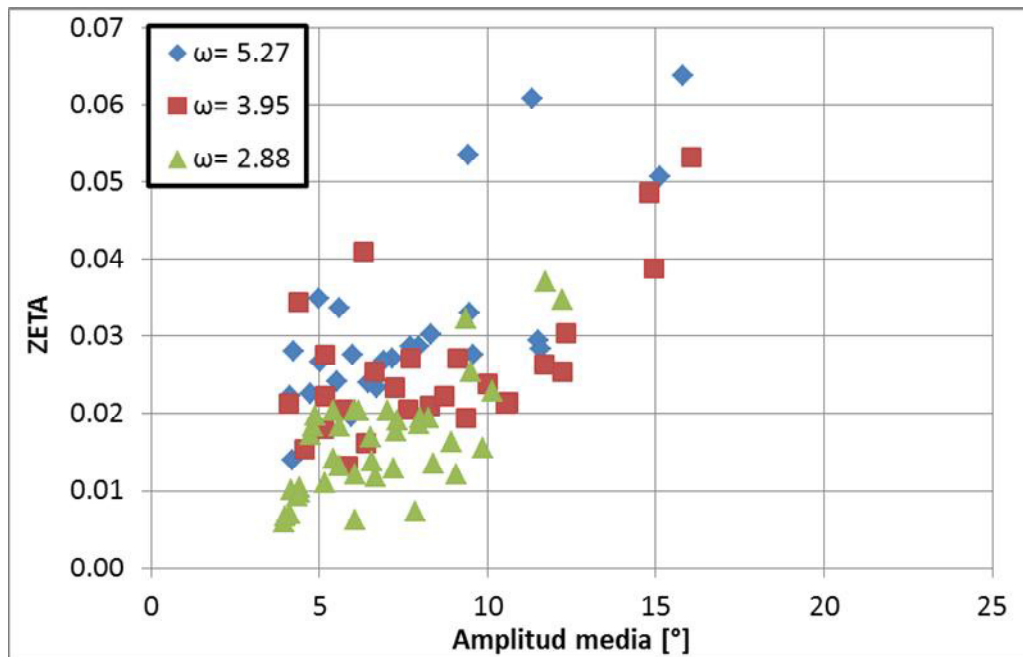


Figura 35. Factor de amortiguamiento adimensional ξ , $\Delta=63$ kg

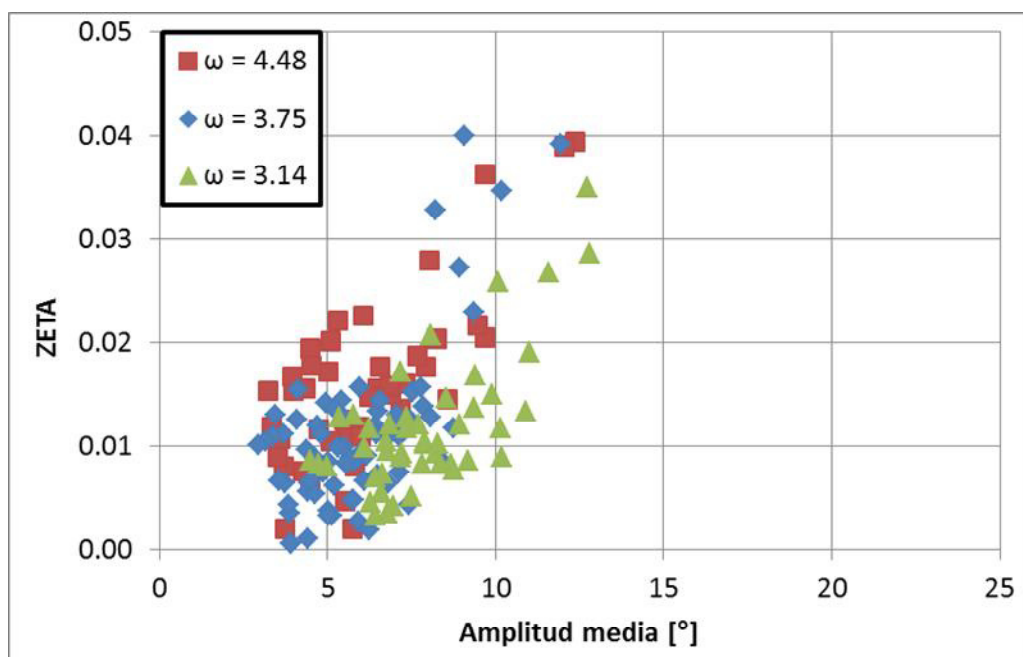


Figura 36. Factor de amortiguamiento adimensional ξ , $\Delta=77$ kg

La Tabla IV muestra un resumen de los coeficientes de amortiguamiento luego de analizar las curvas de decaimiento de los ensayos de extinción S/V. El coeficiente lineal se incrementa con la frecuencia de oscilación, mientras que el término cuadrático se incrementa cuando el cúbico disminuye, y, viceversa. Se nota una elevada variación entre resultados de las diferentes pruebas.

Condición	GM	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	6.34	4.407	0.072	0.1504	0.2280	0.853	0.391
Puerto	5.18	3.716	0.069	0.0543	0.3353	0.833	0.420
$\Delta=48$ [kg]	3.19	2.791	0.060	0.0095	0.3967	0.685	0.439
Manga del modelo: 46 cm							
Salida de	6.80	5.196	0.160	0.1750	0.1630	0.573	0.338
Puerto	5.00	4.084	0.118	0.0464	0.2107	0.449	0.385
$\Delta=63$ [kg]	3.10	2.897	0.020	0.1726	0.2090	0.505	0.416
Manga del modelo: 46 cm							
Cargado	6.10	4.489	0.050	0.0669	0.3512	0.473	0.375
$\Delta=77$ [kg]	4.93	3.756	0.008	0.0068	0.6010	0.522	0.402
	4.20	3.145	0.006	0.0171	0.4029	0.547	0.444

Tabla IV. Resumen de resultados experimentales S/V

2.3 Influencia de la velocidad de avance

Los resultados de las pruebas experimentales muestran que el coeficiente de amortiguamiento en balance se incrementa considerablemente con la velocidad de avance del modelo. Para este análisis se toman los 3 primeros ciclos en todas las pruebas, para calcular el coeficiente de amortiguamiento promedio a partir de la curva de decaimiento. En estas pruebas el ángulo de escora inicial fue pequeño, y se considera que se trabajó en el rango lineal del fenómeno; además por la velocidad de avance, según Himeno, el flujo de remolinos se separa del casco y como resultado de esto el término no lineal del amortiguamiento decrece. Se observa que conforme se incrementa la frecuencia de oscilación también lo hace el factor de amortiguamiento adimensional ξ . Los resultados muestran un máximo local alrededor de un número de Froude de 0.20 y a partir de este punto la curva presenta una tendencia cuadrática creciente; este comportamiento es similar al obtenido por otros autores, [1].

Para analizar la influencia de la velocidad de avance se va a graficar el coeficiente de amortiguamiento: $\xi \omega_0$, que corresponde al doble del equivalente, ν , y tiene unidades [1/s]. En las Figuras 37, 38 y 39 se grafica el coeficiente de amortiguamiento versus el número de Froude en las cuales se observa que la influencia de la velocidad de avance sobre el coeficiente de amortiguamiento es notoria. El coeficiente de amortiguamiento se

incrementa conforme lo hace la velocidad de avance, mostrando una tendencia cuadrática aproximadamente. La frecuencia de oscilación (dependiente del GM) y la condición de carga influyen también directamente en el coeficiente de amortiguamiento, incrementándolo.

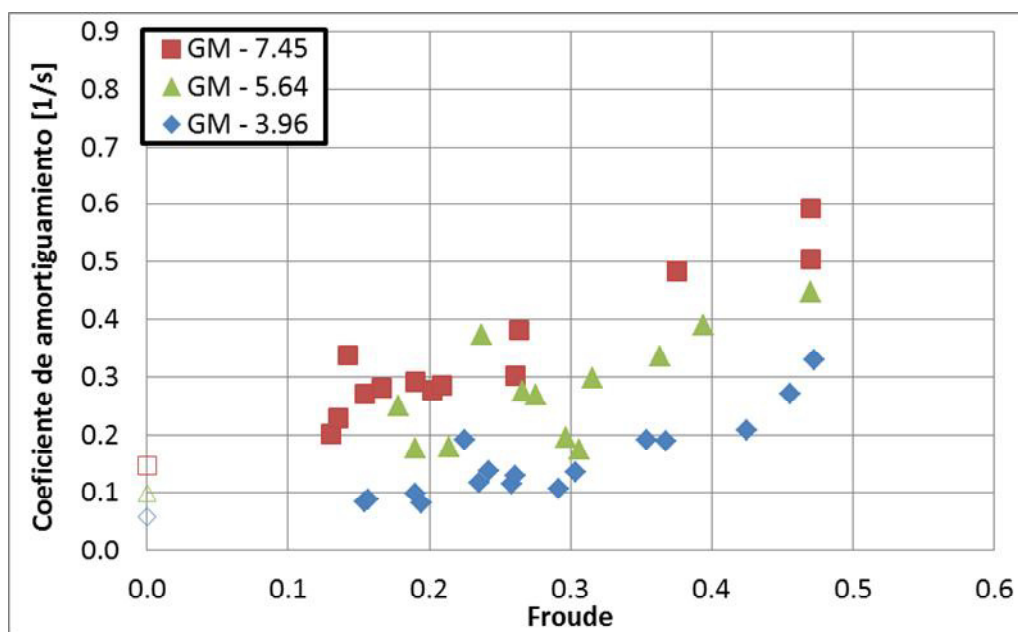


Figura 37. Coeficiente de amortiguamiento versus la Velocidad de avance

$$\Delta=48 \text{ kg}$$

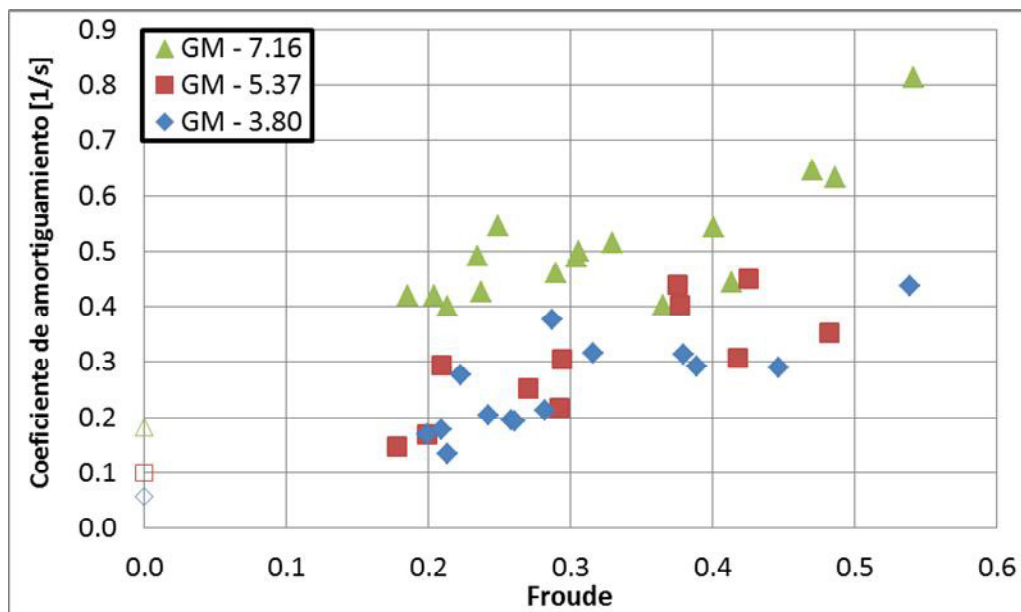


Figura 38. Coeficiente de amortiguamiento versus la Velocidad de avance

$\Delta=63$ kg

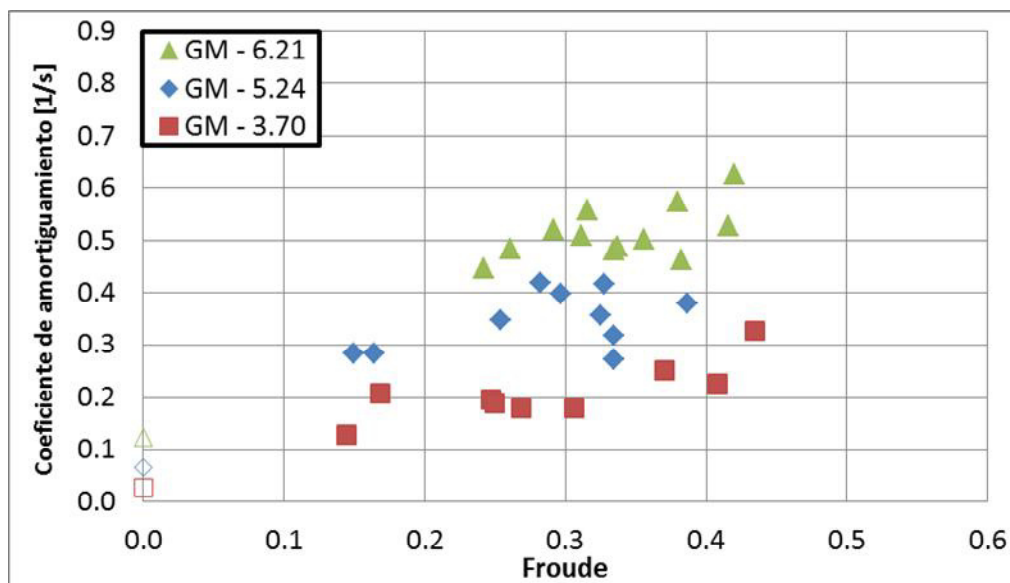


Figura 39. Coeficiente de amortiguamiento versus la Velocidad de avance

$\Delta=77$ kg

Los resultados que se muestra en la Tabla V corresponden a una velocidad de 1.7 [m/s]. Esta tabla muestra un resumen de los resultados luego de analizar las curvas de decaimiento de los ensayos de extinción con velocidad de avance. Se nota que el coeficiente de amortiguamiento equivalente ν , se incrementa con la frecuencia de oscilación y la condición de carga. En la quinta columna de esta tabla se muestra también la relación entre el radio virtual de giro alrededor del punto de rotación y la manga. Dicho parámetro fue calculado con la frecuencia de oscilación y el GM en cada prueba, y con el eje de rotación a la altura de la flotación.

Velocidad de avance 1.7 [m/s]					
Condición	GM [cm]	ω_0 [rad/s]	ν [1/s]	b_1 [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

Tabla V. Resumen de resultados con velocidad de avance

CAPÍTULO 3

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

3.1 Descripción general del método de Himeno e Ikeda

El método semiempírico de Himeno e Ikeda determina el coeficiente de amortiguamiento en Balance de un buque, a partir de resultados experimentales. Según este método el coeficiente de amortiguamiento en balance depende de la influencia de varios fenómenos del fluido: el efecto de la fricción sobre la superficie del casco, la generación de vórtices, la energía absorbida por las olas, además de la resistencia de ciertos apéndices, como quillas de balance. También incluye un término denominado de Sustentación que depende de la velocidad de avance del buque. El método propone expresiones para evaluar la influencia de cada una de estas componentes. Finalmente el coeficiente de amortiguamiento se determina como la suma de

cinco componentes: Friccional B_F , Vórtices B_V , Sustentación B_L , Formación de olas B_W , y el efecto de quillas de balance B_{BK} .

El método empleado en este trabajo es nombrado como de Himeno e Ikeda debido a la aportación que ambos autores han hecho con sus investigaciones, además de las modificaciones que han realizado en los últimos treinta años. Este método, [3] y [11], propone que el coeficiente de amortiguamiento en Balance es determinado como la suma de cinco componentes:

$$B_\epsilon = B_F + B_E + B_W + B_L + B_{BK} \quad (6)$$

El efecto de quillas de balance viene dado por; la fuerza normal de amortiguamiento B_{BKN} , la presión sobre el casco B_{BKH} , y la formación de olas B_{BKW} debido a la presencia de estas y a su iteración con el casco.

$$B_{BK} = B_{BKN} + B_{BKH} + B_{BKW}$$

La descripción de cada una de las componentes del método de Himeno al igual que las expresiones para el cálculo del coeficiente de amortiguamiento se presenta a continuación, tomadas de [1] y [6].

Componente friccional B_F : Es causada por el esfuerzo de fricción sobre la superficie del casco, véase la Figura 40. En la predicción de dicho valor se desprecia el efecto de las olas. Una fórmula para estimar la energía disipada por el amortiguamiento friccional durante un periodo de balance fue obtenida por Kato, modificada por Himeno e Ikeda después de analizar los resultados de experimentos de oscilación de cilindros suspendidos completamente sumergidos en el agua, [3], [11]. Presentando finalmente la ecuación (7) para la componente friccional a velocidad de avance nula.

$$B_{F0} = \frac{2}{3\pi} \rho S C_f \omega r_f^3 \varphi \quad (7)$$

Considerando la influencia de la velocidad de avance de acuerdo al estudio realizado por Tamiya, un factor empírico debe ser añadido obteniendo la ecuación (8).

$$B_F = B_{F0} \left[1 + 4.1 \left(\frac{V}{L\omega} \right) \right] \quad (8)$$

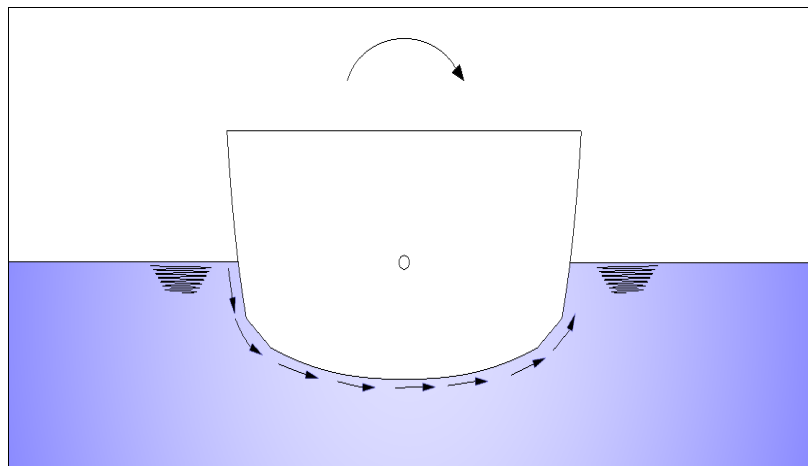


Figura 40. Amortiguamiento por fricción en el casco.

Componente por generación de vórtices B_R : En ausencia de la velocidad de avance esta componente es originada por la variación de presión debido a la separación del flujo y a la generación de vórtices sobre la superficie del casco Figura 41, además, representa la parte no lineal del amortiguamiento. Mientras que en presencia de la velocidad de avance el flujo de remolinos se separa del casco, lo cual produce que el amortiguamiento no lineal disminuya rápidamente. El valor de esta componente a velocidad de avance cero puede ser determinado con la ecuación (9), planteada por Watanabe-Inoue que fue obtenida de pruebas experimentales con cilindros de varias secciones, [3], [11].

$$B_{E0} = \frac{4 \zeta}{3 \mathcal{X}_2 \mathcal{X}_1^3} C_R \quad (9)$$

En presencia de la velocidad de avance el amortiguamiento debe aplicarse cierta corrección que viene definida por la siguiente fórmula empírica.

$$B_E = B_{E0} \frac{(0.04K)^2}{1 + (0.04K)^2} \quad (10)$$

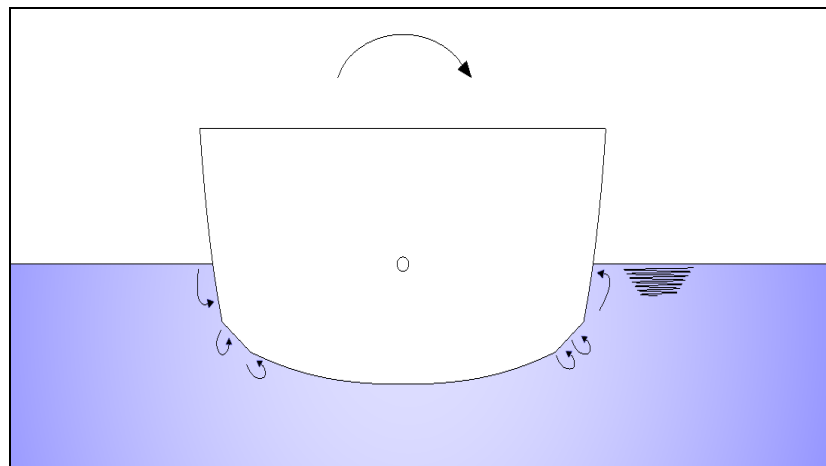


Figura 41. Amortiguamiento por generación de vórtices.

Componente por formación de olas B_W : Representa la energía absorbida por la generación de olas durante la oscilación del buque Figura 42; este término también incluye la interacción entre las olas y vórtices, sin embargo,

al ser esta interacción muy pequeña se la puede despreciar y por lo tanto se considera esta componente como lineal. El amortiguamiento debido a la generación de olas a un número de Froude igual a cero puede ser obtenido mediante la teoría de Flujo Potencial asociada a la de Fajas la misma que se resumen en la ecuación (11).

$$B_{w0} = \frac{A_1}{X_5} \exp\left[-A_2(\text{LOG}(X_5) - A_3)^2 / 1.44\right] \quad (11)$$

En presencia de la velocidad de avance Ikeda propone una formula empírica para el amortiguamiento por olas.

$$B_w = 0.5B_{w0} \{[(A_2 + 1) + (A_2 - 1) \tanh 20(\tau - 0.3)] + (2A_1 - A_2 + 1) \exp[150(\tau - 0.25)^2]\} \quad (12)$$

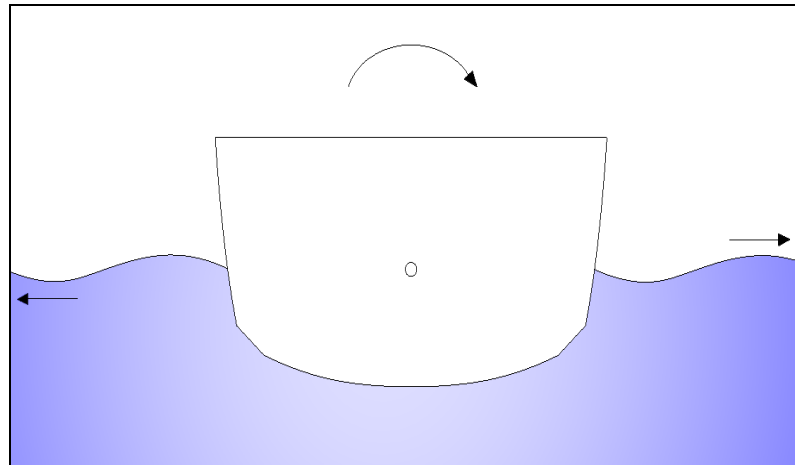


Figura 42. Amortiguamiento por formación de olas.

Componente por sustentación B_L : Como se mencionó previamente a medida que la velocidad de avance se incrementa la componente por formación de remolinos decrece rápidamente y la de sustentación se incrementa considerablemente. Por tanto dicha componente resulta ser la de mayor importancia en el estudio del coeficiente de amortiguamiento en balance de buques cuando se incluye el efecto de la velocidad de avance. Una fórmula para estimar esta componente fue propuesta por Yumuro, la cual fue modificada por Himeno e Ikeda. Esta componente es independiente de la amplitud en Balance.

$$B_L = 0.5 \rho U L d k_{N_o} l_o l_R \left(1 + 1.4 (OG / l_R) + 0.7 (OG^2 / l_o l_R) \right) \quad (13)$$

La variable OG es la distancia desde el centro de gravedad hasta la línea de flotación.

3.2 Predicción del coeficiente de amortiguamiento

Debido a la laboriosidad de las fórmulas del método de Himeno e Ikeda es recomendable su implementación en un programa de computación. Para aplicar el método se requiere de las dimensiones principales, coeficientes de formas, altura metacéntrica y frecuencia de oscilación del buque. Con este proceso, el coeficiente de amortiguamiento se puede calcular considerando las influencias de la amplitud del ángulo de balance y la velocidad de avance. Luego de aplicar el método al modelo del buque pesquero ecuatoriano se encuentra que: La componente por generación de vórtices es la más importante en el análisis de la influencia de la amplitud del ángulo de balance. Al incrementar la velocidad de avance la componente por

generación de vórtices decrece rápidamente y las de formación de olas y sustentación tienen mayor contribución en el coeficiente de amortiguamiento.

La implementación del método de Himeno e Ikeda se la realiza desarrollando un programa en lenguaje VFortran el cual sigue el esquema de la Figura 43. La formulación para la componente por generación de vórtices en este método semiempírico es aplicable dentro de los siguientes rangos:

$$0.5 \leq C_b \leq 0.85$$

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

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

$$0.9 \leq C_m \leq 0.99$$

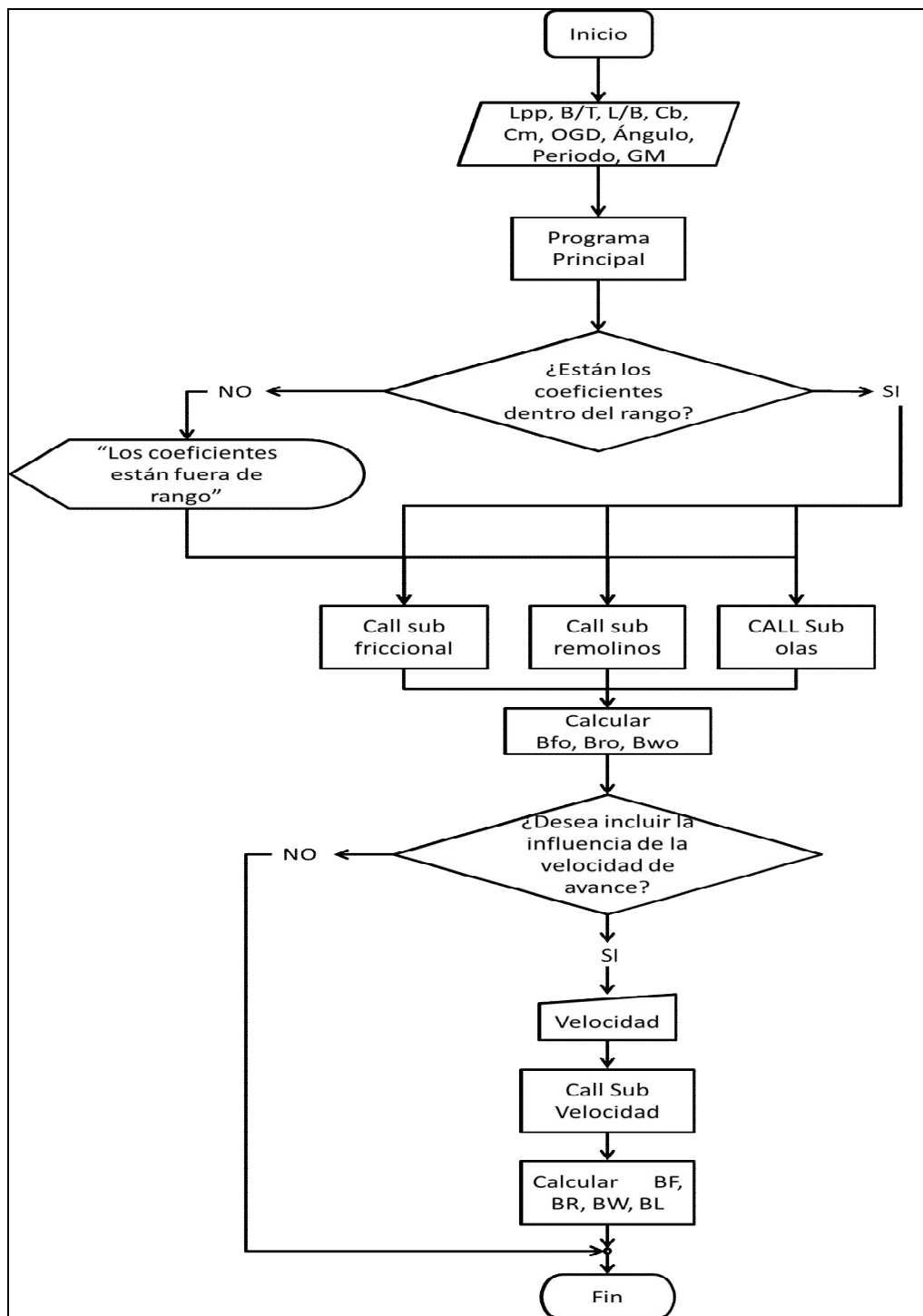


Figura 43. Diagrama de flujo del método de Himeno e Ikeda.

Pruebas sin velocidad de avance

La Tabla VI muestra las características del modelo de las condiciones ensayadas sin velocidad e avance para comprobar la aplicabilidad del método de Himeno e Ikeda. Se presentan las dimensiones principales, coeficientes de formas, altura metacéntrica, periodo de oscilación y relación de la distancia OG para el calado de cada condición. Recordando que la distancia OG es medida desde el centro de gravedad a la línea de flotación (T-KG).

Característica	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	-0.9	-1.0	-1.2	-0.3	-0.5	-0.6	-0.1	-0.2	-0.2	-1.5-0.2
T [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	-

Tabla VI. Características de las condiciones ensayadas S/V.

El método no es aplicable para las condiciones de carga descritas, dado que el coeficiente de sección media no está dentro del rango de aplicación, esto se refleja claramente en el amortiguamiento no lineal, el cual se incrementa rápidamente con el ángulo de balance. En la condición más ligera, el Coeficiente Bloque sale también del rango de aplicación.

Las Figuras 44 y 45 muestran la contribución de cada una de las componentes del método de Himeno e Ikeda sobre el factor de amortiguamiento de cada una de las componentes con velocidad de avance nula para el modelo analizado. En estas se observa que en la condición de carga 2 $GM=3.1$ cm la componente por generación de vórtices crece más rápido que en la condición de carga 3 $GM=4.2$ cm, debido a que la variable OG es más negativa en la condición 2.

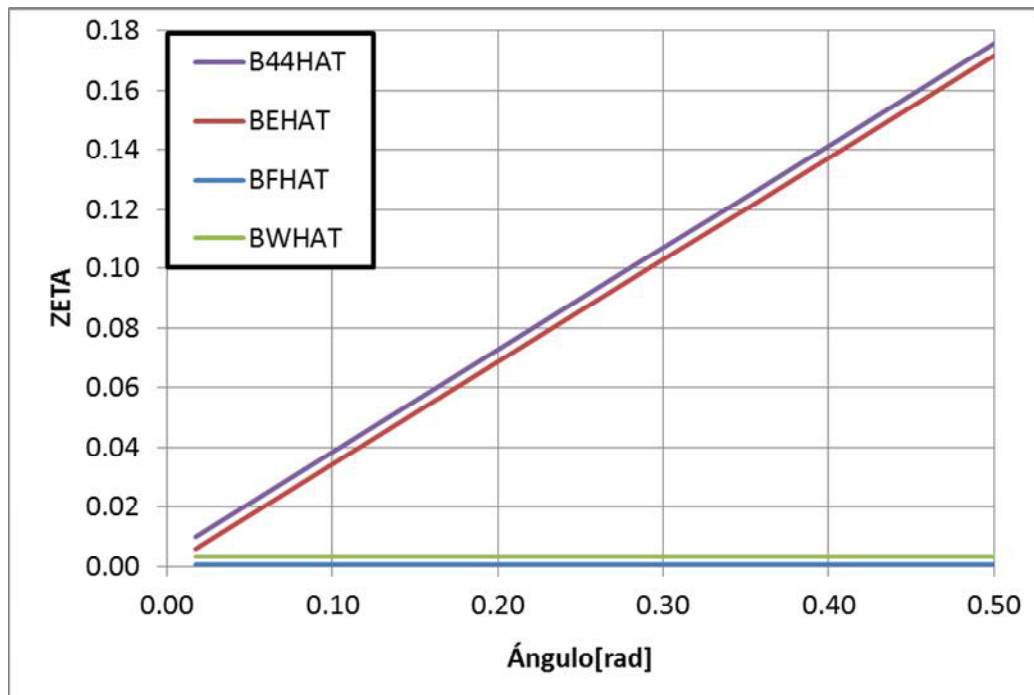


Figura 44. Componentes del método de Himeno e Ikeda $\Delta=63$ kg $GM=3.1$ cm

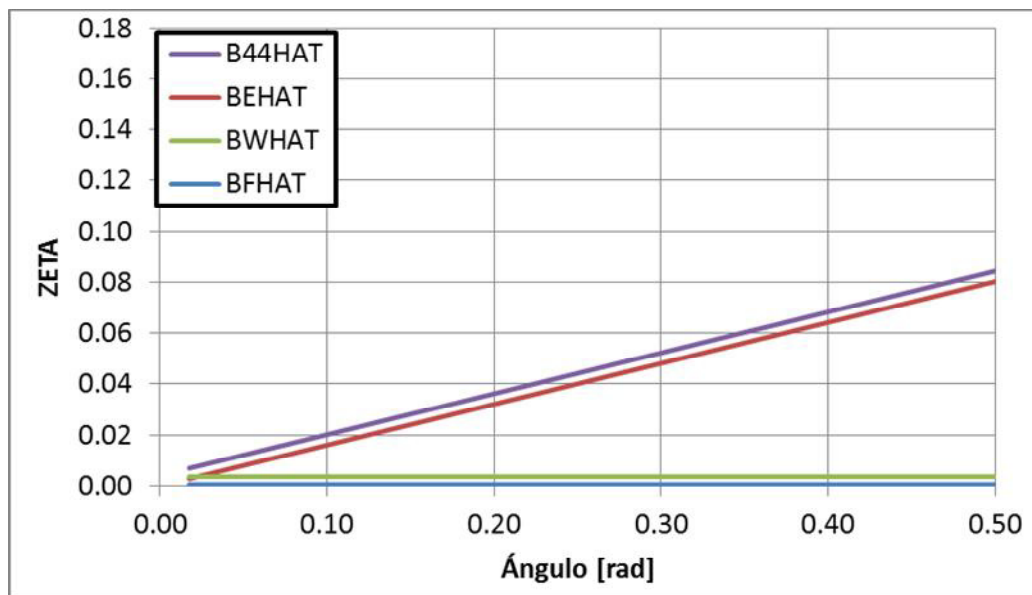


Figura 45. Componentes del método de Himeno e Ikeda $\Delta=77$ kg $GM=4.2$ cm

Pruebas con velocidad de avance

La Tabla VII muestra las características del modelo en las condiciones ensayadas con velocidad de avance para comprobar la aplicabilidad del método de Himeno e Ikeda. Se presentan las dimensiones principales, coeficientes de formas, altura metacéntrica, periodo de oscilación y relación de la distancia OG para el calado de cada condición. Debe recordarse que debido a la configuración de las pruebas con velocidad de avance la línea de flotación y el centro de rotación coinciden, por tanto la distancia OG es cero.

Característica	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			0			0			-1.5-0.2
T [s]	1.55	1.88	2.53	1.57	1.75	1.86	1.21	1.57	1.58	-
GM [cm]	7.4	5.6	3.9	7.1	5.3	3.8	6.2	5.2	3.7	-
Fn	0.13- 0.47	0.17- 0.47	0.15- 0.47	0.18- 0.54	0.18- 0.48	0.20- 0.53	0.24- 0.42	0.14- 0.38	0.14- 0.43	-

Tabla VII. Características de las condiciones ensayadas C/V.

Las Figuras 46, 47 y 48 muestran la contribución de cada una de las componentes del método de Himeno e Ikeda sobre el factor de amortiguamiento incluyendo la velocidad e avance. En estas se observa que las componentes que más contribuyen en el factor de amortiguamiento son la de Generación de olas y sustentación, además la componente por generación de vórtices decrece rápidamente conforme se incrementa la velocidad de avance.

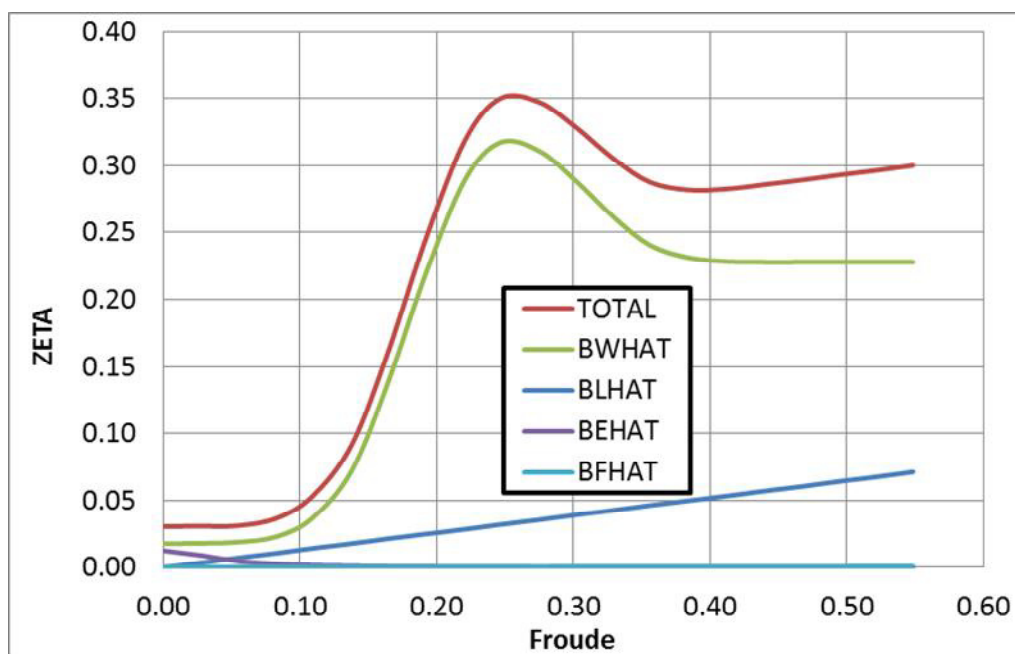


Figura 46. Componentes del método de Himeno e Ikeda $\Delta=48\text{kg}$ $GM=3.9\text{ cm}$

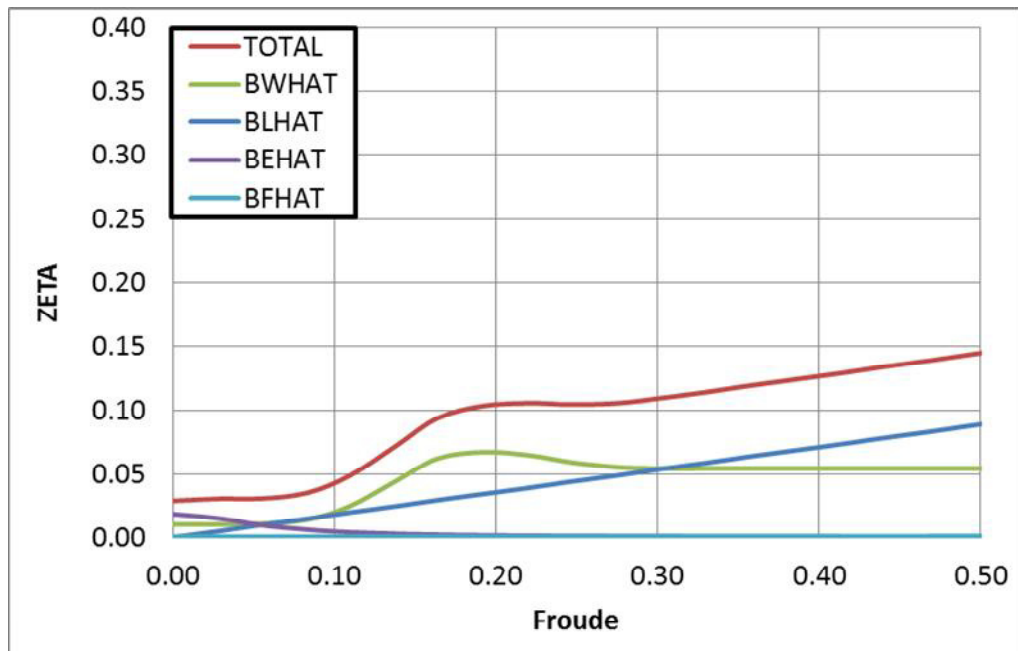


Figura 47. Componentes del método de Himeno e Ikeda $\Delta=63$ kg $GM=3.8$ cm

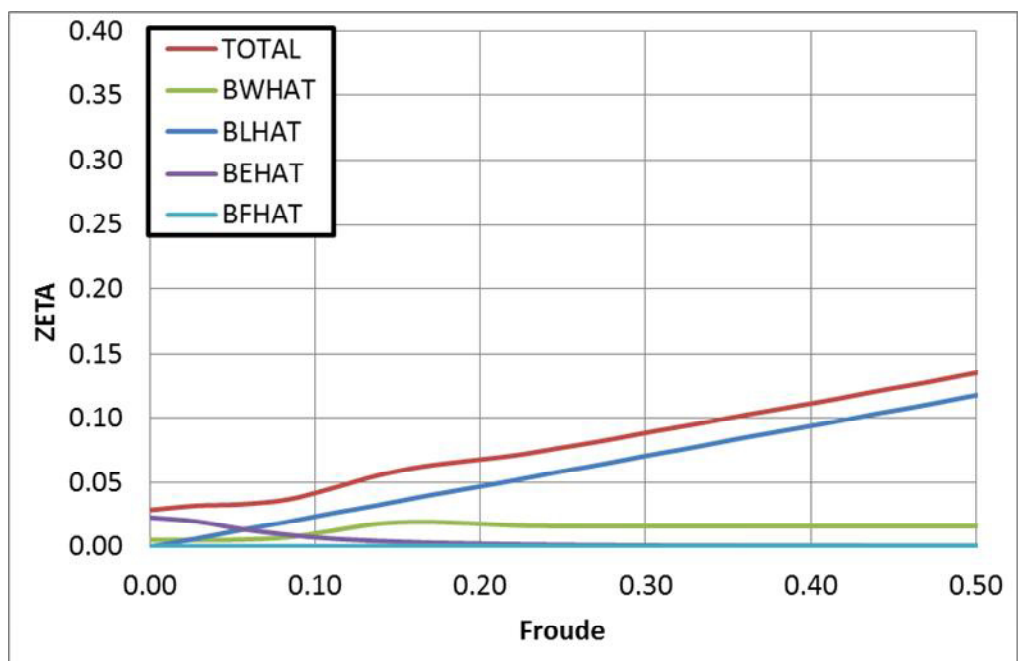


Figura 48. Componentes del método de Himeno e Ikeda $\Delta=77$ kg $GM=3.7$ cm

3.3 Comparación de resultados

Finalmente se pueden comparar los resultados para el coeficiente de amortiguamiento en balance obtenidos de las pruebas experimentales con los predichos por el método de Himeno e Ikeda. En la condición de máxima carga los resultados de las pruebas con y sin velocidad de avance se muestran cercanos a los determinados con el método mencionado con una diferencia máxima del 20 %. Esta diferencia se incrementa conforme se reduce la condición de carga, lo cual es esperable dado que los coeficientes de formas salen del rango de aplicación del método. A bajas frecuencias de oscilación el método de predicción sobreestima el coeficiente de amortiguamiento, lo que es más visible en la condición de carga más ligera. Finalmente se puede decir que el método de Himeno e Ikeda para el coeficiente de Amortiguamiento en Balance es adecuado cuando por sus características la condición de carga cae dentro del rango de aplicación (cargado), mientras que sobreestima dicho parámetro cuando estas características están fuera de dicho rango (ligera).

Comparación de los resultados sin velocidad de avance

En las Figuras 49-57 se grafica el coeficiente de amortiguamiento versus la amplitud del ángulo de balance; en estas figuras se muestran las curvas obtenidas experimentalmente y las determinadas con el método de Himeno e

Ikeda. Se puede decir que en la condición de carga ligera, Figuras 49-51 el método sobrestima el coeficiente de amortiguamiento con una diferencia de hasta 4 a 1 en la condición $\Delta=48$ kg GM=6.34 cm. En la condición Cargado, véase Figuras 55-57, este método produce una buena aproximación del coeficiente de amortiguamiento. Lo anteriormente expuesto se atribuye al hecho de que en condición ligera los coeficientes de formas están fuera del rango de aplicación.

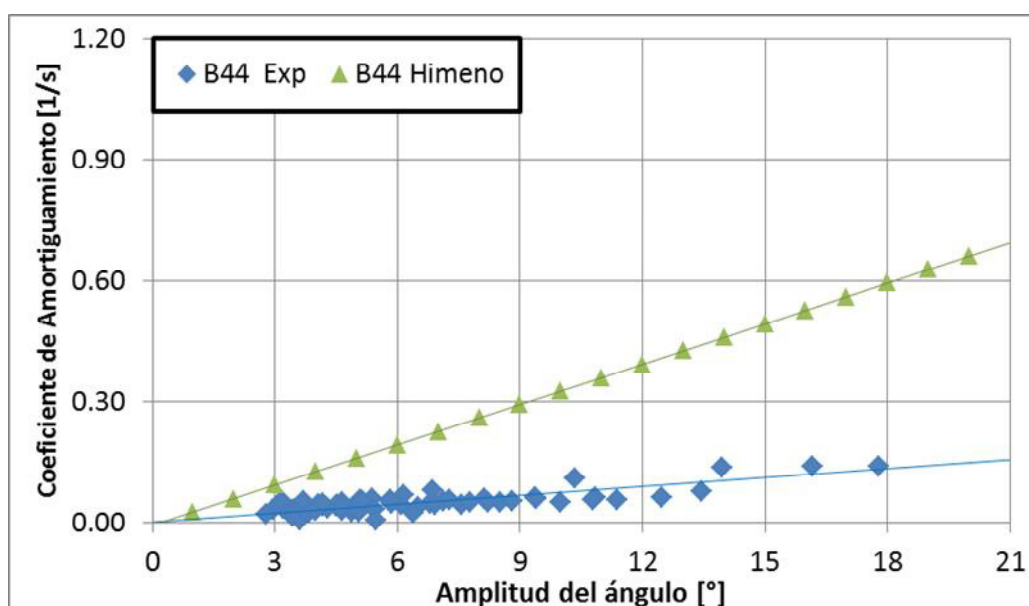


Figura 49. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=48$ kg GM=3.19 cm

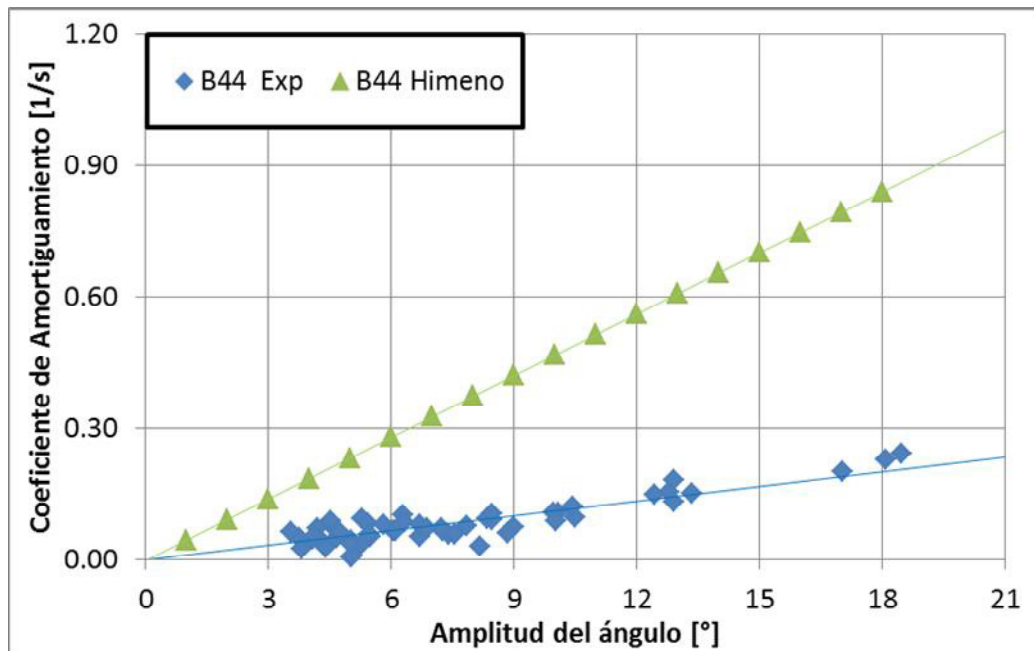


Figura 50. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=48$ kg $GM=5.18$ cm

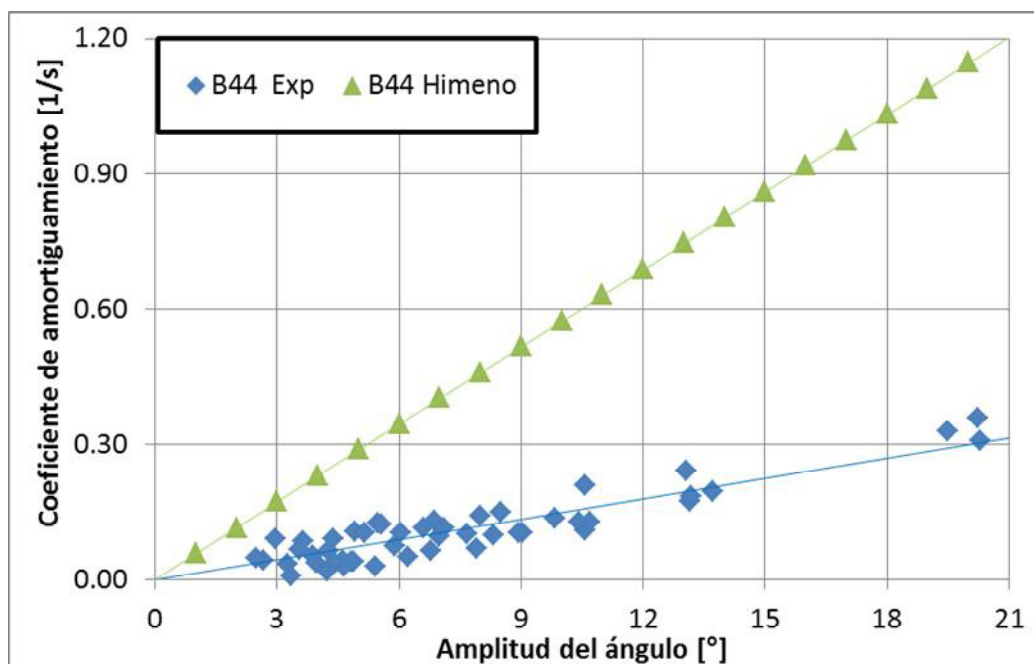


Figura 51. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=48$ kg $GM=6.34$ cm

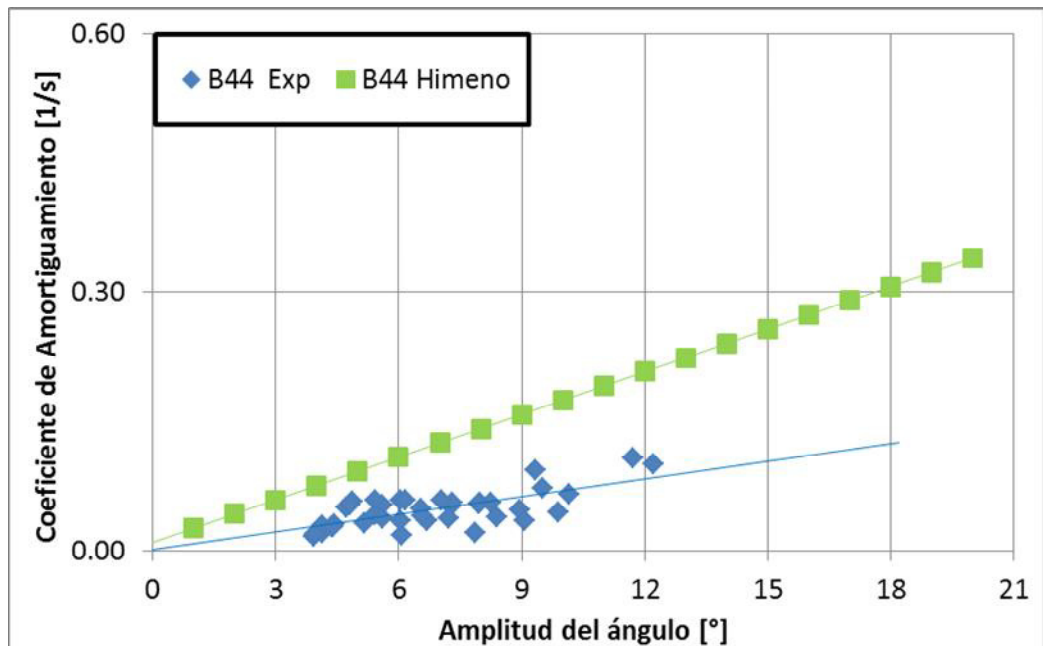


Figura 52. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=63$ kg $GM=3.1$ cm

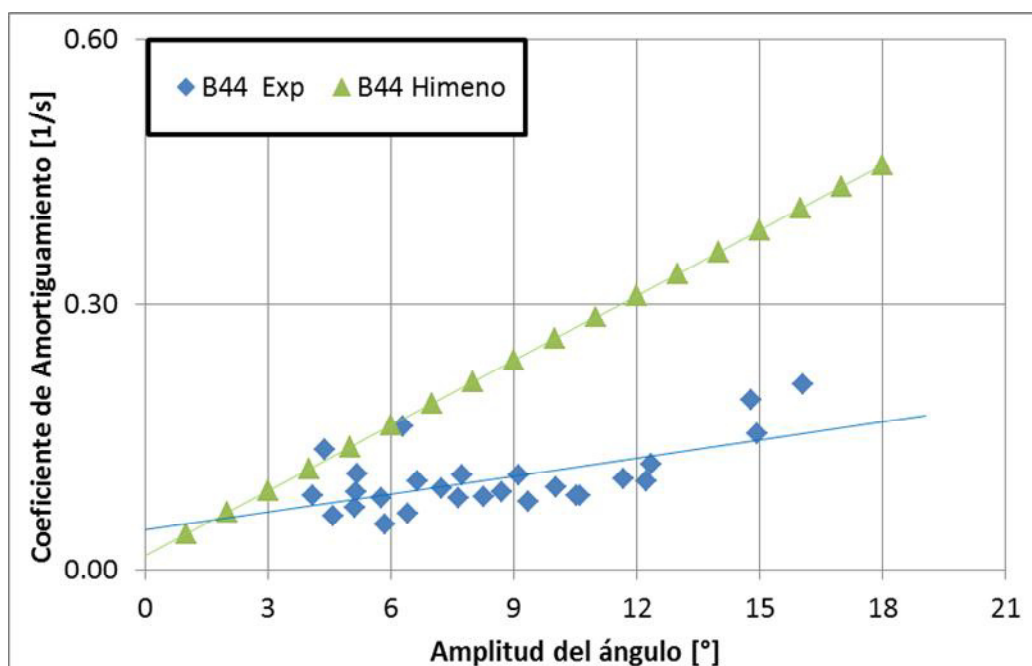


Figura 53. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=63$ kg $GM=5.00$ cm

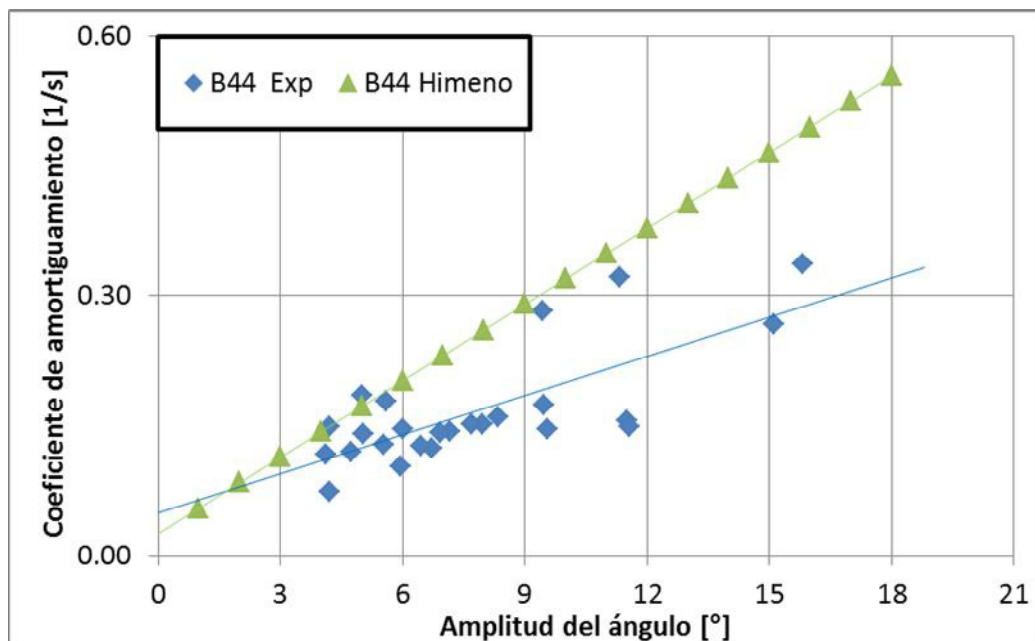


Figura 54. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=63$ kg GM=6.80 cm

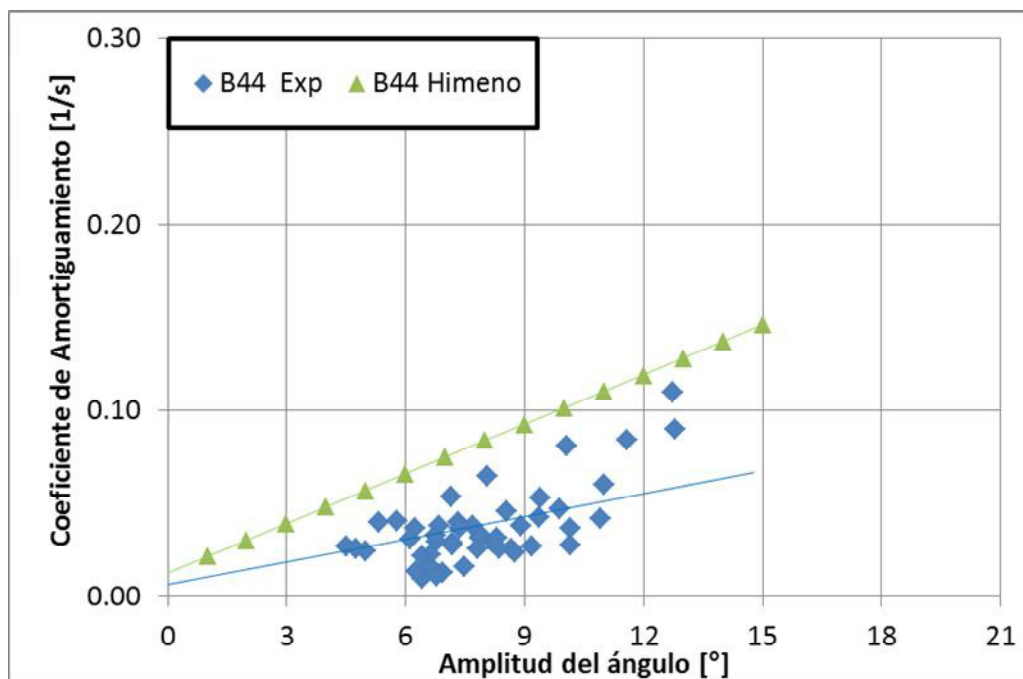


Figura 55. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=77$ kg GM=4.20 cm

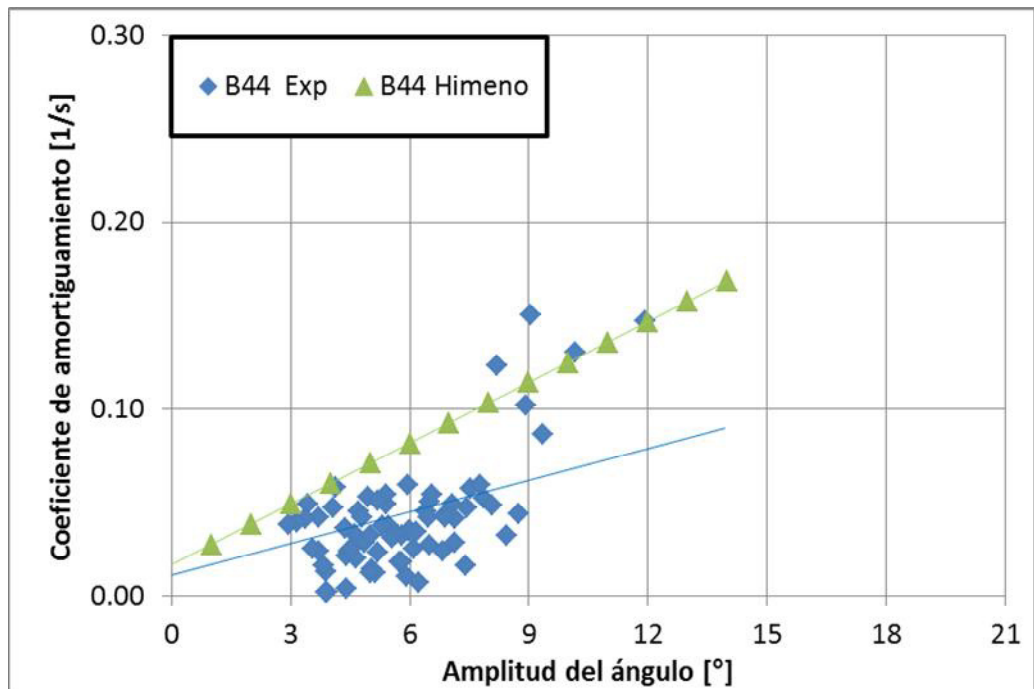


Figura 56. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=77$ kg GM=4.90 cm

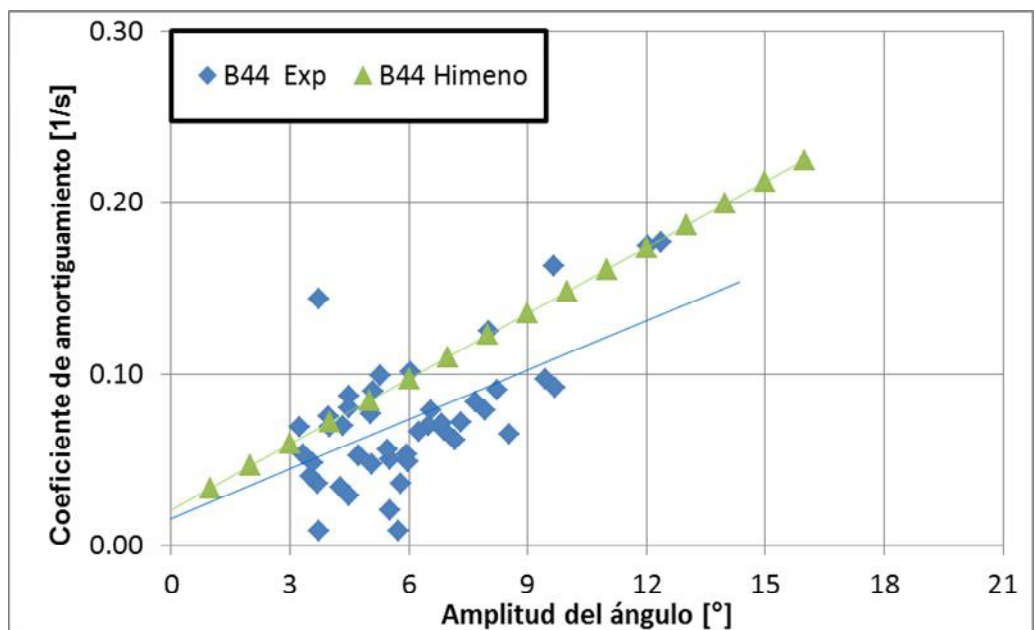


Figura 57. Comparación de resultados S/V condición $\Delta=77$ kg GM=6.10 cm

Comparación de los resultados con velocidad de avance

En las Figuras 58-66 se presenta el coeficiente de amortiguamiento del modelo de un buque pesquero versus el número de Froude, en estas gráficas se muestran las curvas obtenidas de los resultados experimentales y la determinada con el método de Himeno e Ikeda. Se puede decir que en condición cargado el método determina con gran precisión el coeficiente de amortiguamiento teniendo una diferencia máxima de hasta un 20 %. En la condición ligera $\Delta=48$ kg y $GM=3.90$ cm, el método empleado sobrestima el coeficiente de amortiguamiento. Lo anteriormente expuesto se atribuya al hecho de que en condición ligera los coeficientes de formas están fuera del rango de aplicación. Es importante resaltar el máximo local que muestran ambos tipos de resultados para un número de Froude de alrededor de 0.20.

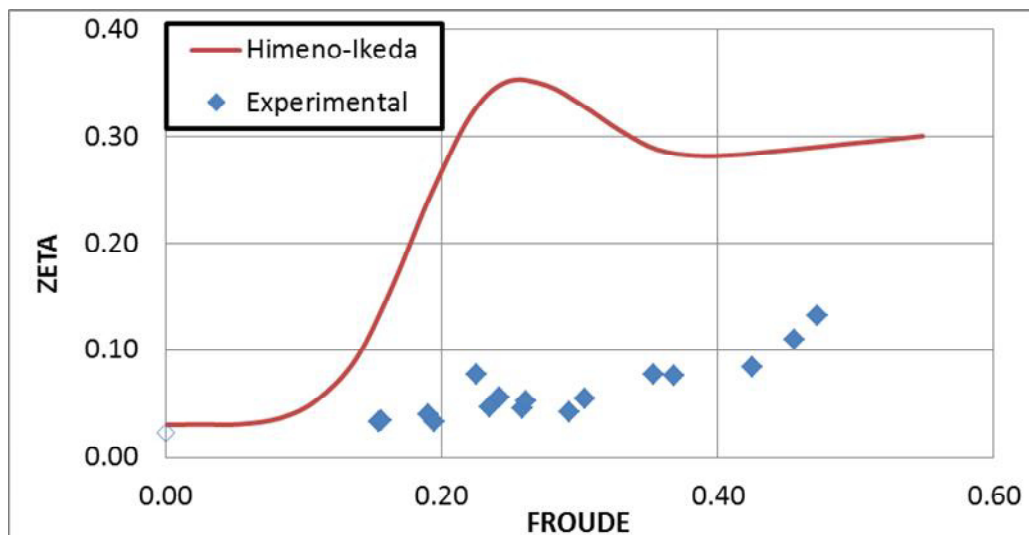


Figura 58. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=48$ kg $GM=3.90$ cm

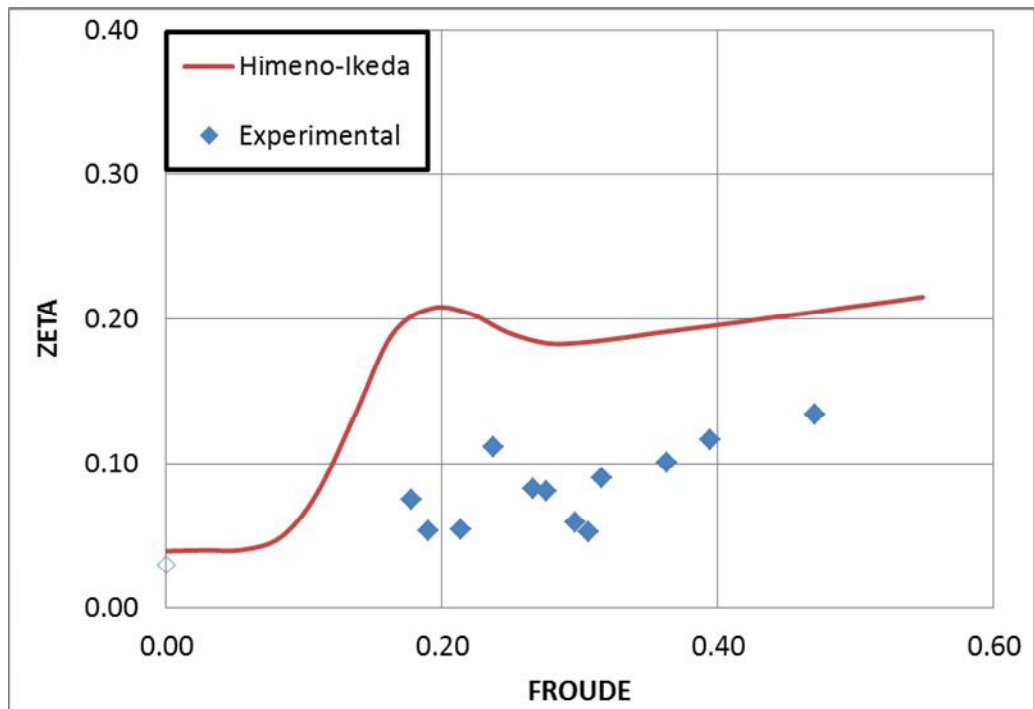


Figura 59. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=48$ kg GM=5.60 cm

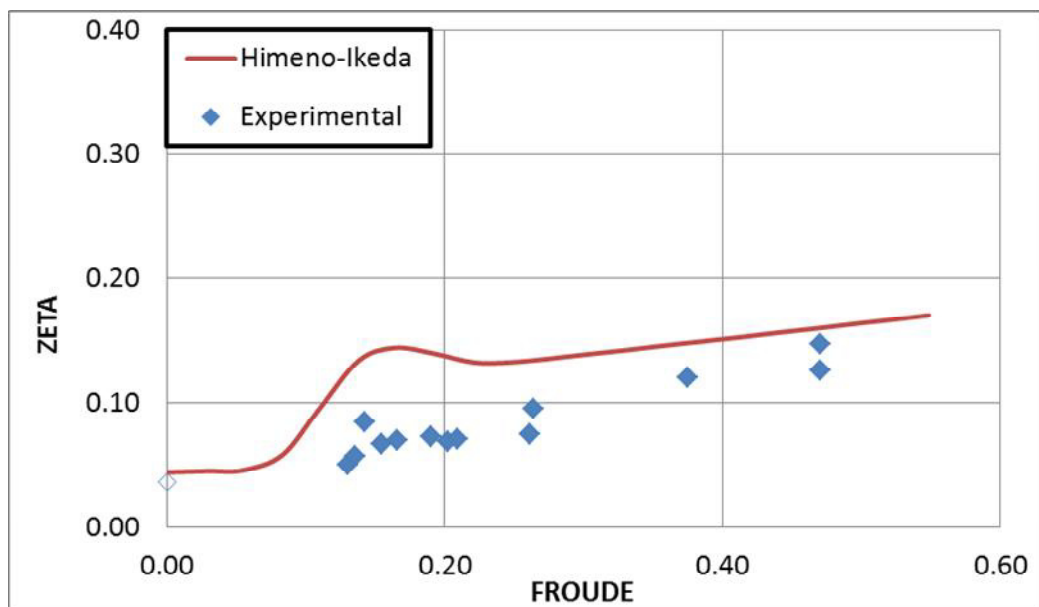


Figura 60. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=48$ kg GM=7.4 cm

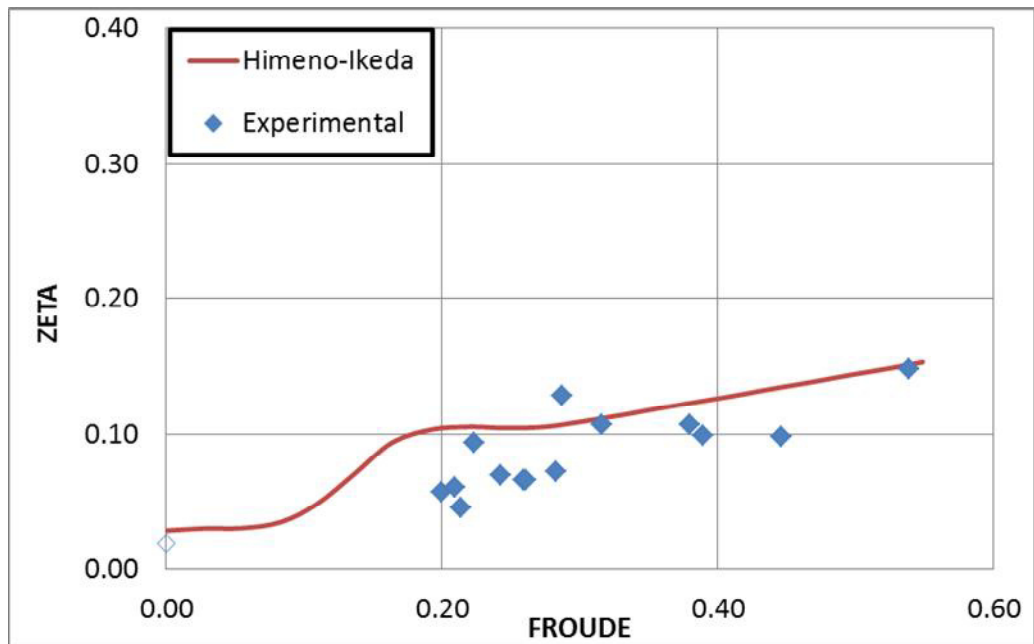


Figura 61. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=63$ kg GM=3.8 cm

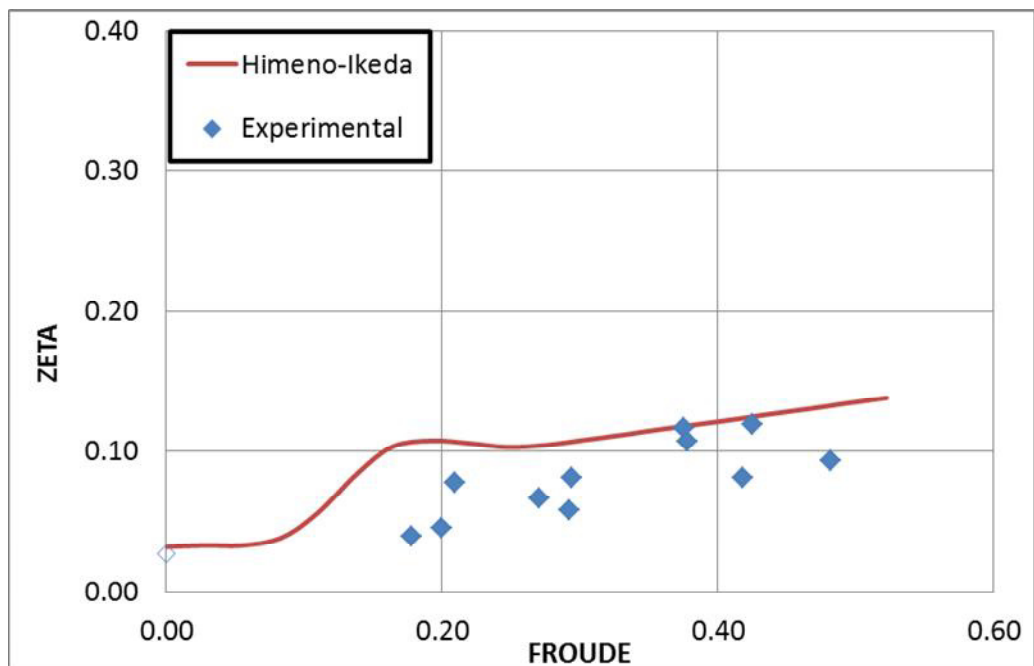


Figura 62. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=63$ kg GM=5.3 cm

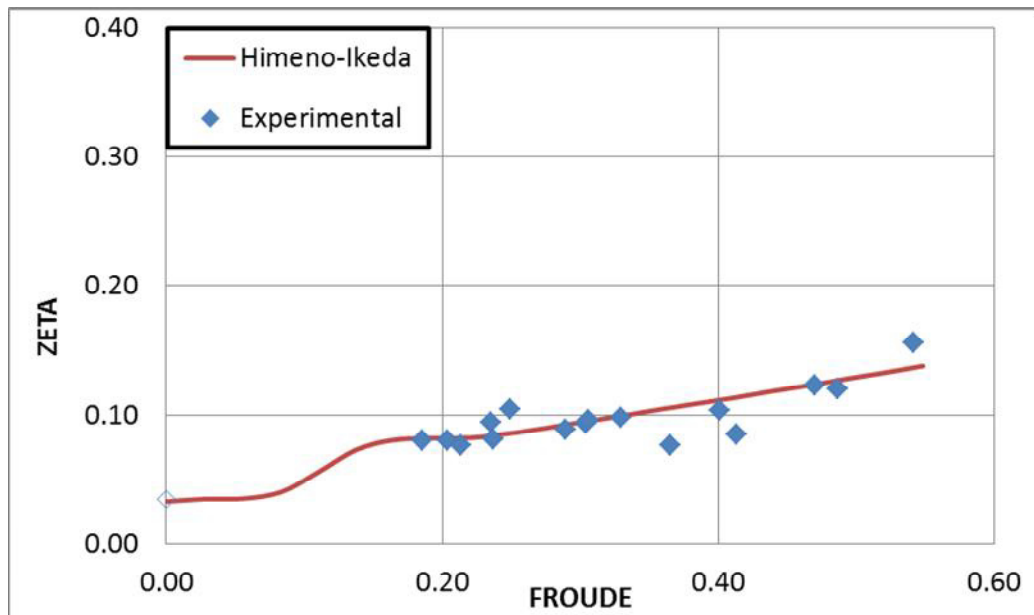


Figura 63. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=63$ kg GM=7.1 cm

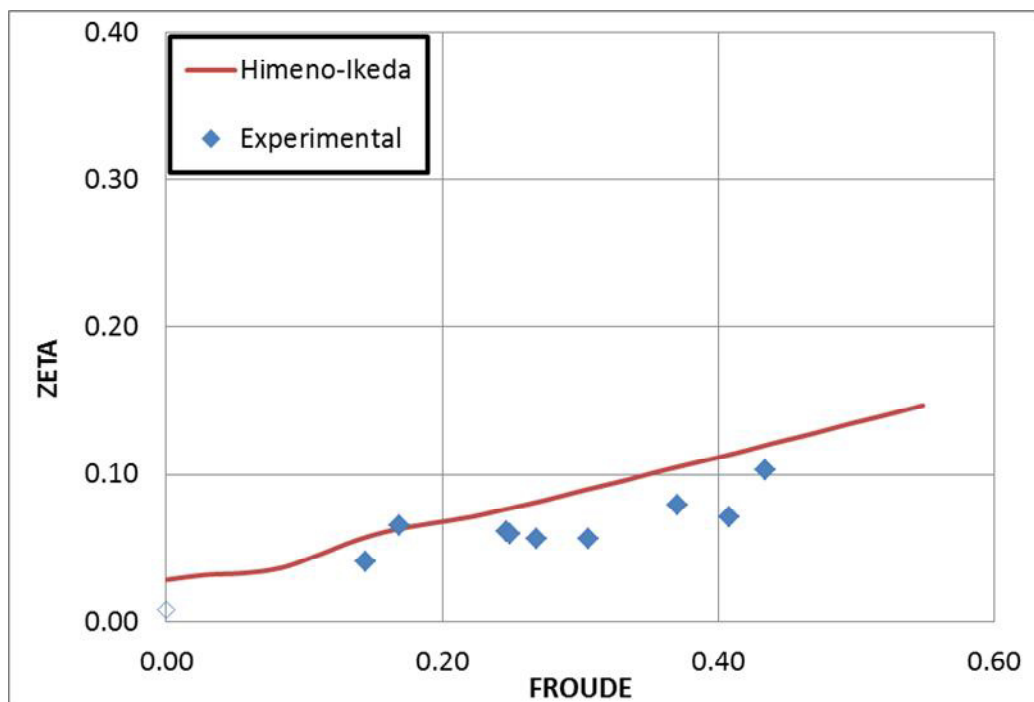


Figura 64. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=77$ kg GM=3.7 cm

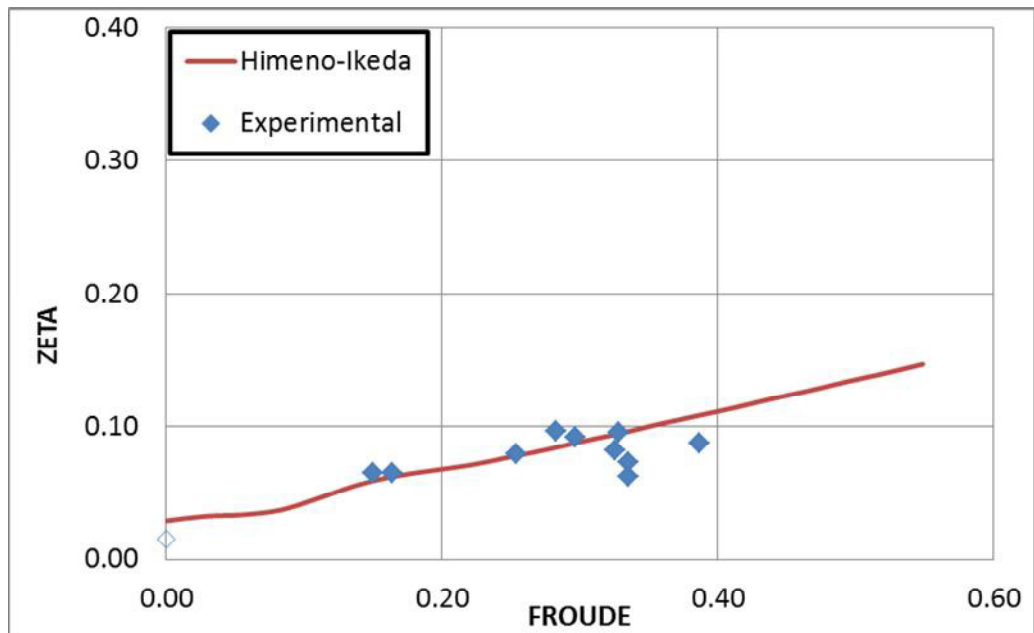


Figura 65. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=77$ kg GM=5.2 cm

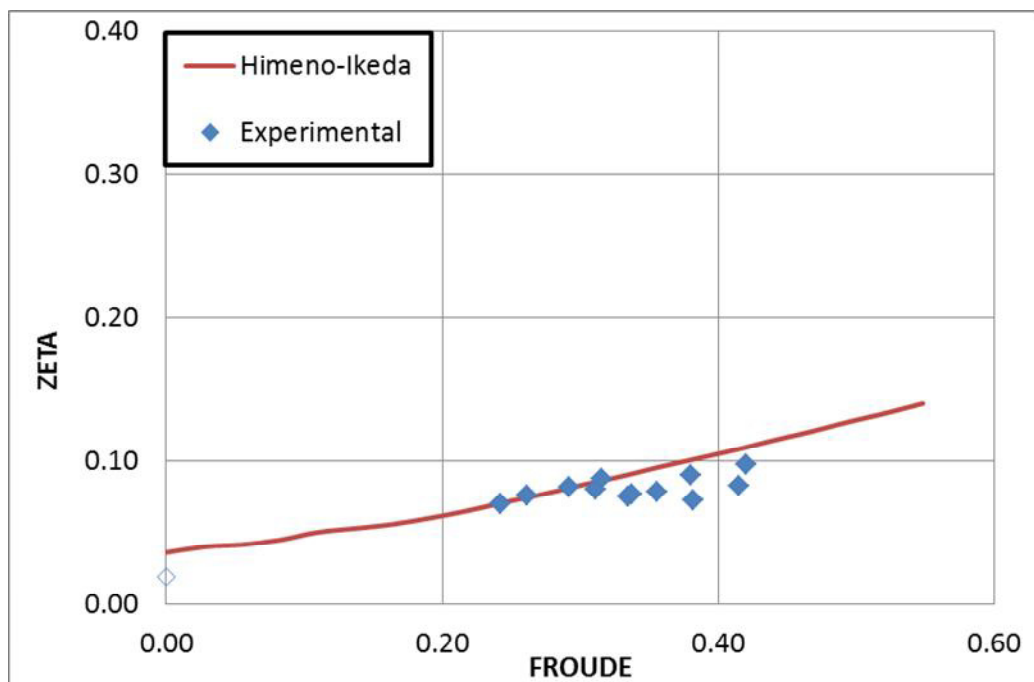


Figura 66. Comparación de resultados C/V condición $\Delta=77$ kg GM=6.2 cm

CONCLUSIONES

En esta tesis 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 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:

1. La adaptación de los equipos disponible permitió registrar las curvas de decaimiento en los ensayos de extinción y finalmente se pudo determinar el coeficiente de amortiguamiento en Balance del modelo de un buque

pesquero sardinero ecuatoriano. Se comprobó que los valores de dichos coeficientes eran aceptables, considerando simulaciones numéricas con el método de Runge-Kutta de cuarto orden, en las que se recuperan los resultados experimentales muy cercanamente.

2. 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 en el coeficiente de amortiguamiento. Las no linealidades cuadrática y cúbica del coeficiente del amortiguamiento se evalúan a través de un término de Amortiguamiento equivalente. 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, esto indica que el coeficiente de amortiguamiento depende mucho de la amplitud del ángulo de balance.
3. 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 0.43 en la condición $\Delta=77$ kg $GM=3.7$ 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.

4. El método de Himeno e Ikeda es considerado como emblemático 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 $GM=6.34$ cm donde el coeficiente de bloque y el de sección media están fuera del rango de aplicación, el término lineal muestra una diferencia del 55% y el cuadrático del 74%. 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. La determinación del coeficiente de amortiguamiento empleando el método mencionado es posible 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.

RECOMENDACIONES

1. En el caso de las pruebas con velocidad de avance, el ángulo de escora para iniciar las oscilaciones era limitado para evitar el ingreso de agua. Por lo que se recomienda trabajar con modelos con cubierta estanca, para en futuras pruebas poder analizar las no linealidades del coeficiente de amortiguamiento con velocidad de avance.
2. El coeficiente de amortiguamiento en Balance depende de las formas del casco, por tanto se recomienda determinarlo en otros buques de la flota pesquera ecuatoriana, por ejemplo en pesqueros de formas con pantoque redondeado.
3. Las formulaciones empíricas dadas por el método de Himeno e Ikeda muestran ciertas limitaciones en la predicción del coeficiente de amortiguamiento, por tanto es recomendable comparar los resultados

con formulaciones específicamente desarrolladas para buques pesqueros.

ANEXOS

ANEXO A

ECUACIÓN DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO NO LINEAL

En este trabajo se pretende determinar el coeficiente de amortiguamiento en balance con y sin velocidad de avance, para el primer caso se considera el término como Lineal, mientras que para las pruebas sin velocidad de avance se analizan no linealidades cuadrática y cúbica respecto a la velocidad angular. La ecuación de balance libre con amortiguamiento, [8] es:

$$(J_{xx} + m_{44})\ddot{\phi} + M + \Delta\overline{GM}\phi = 0$$

Donde el Momento debido al Amortiguamiento es:

$$M = N\dot{\phi}$$

Donde **N** es el coeficiente de amortiguamiento equivalente

$$M = N_1\dot{\phi} + N_2|\dot{\phi}|\dot{\phi} + N_3\dot{\phi}^3 + N_4|\dot{\phi}|\dot{\phi}^3 + N_5\dot{\phi}^5 + \dots$$

El trabajo disipado por el amortiguamiento durante un ciclo puede ser calculado como sigue:

$$L = \oint M d\varphi = \oint (N_1 \dot{\varphi} + N_2 |\dot{\varphi}| \dot{\varphi} + N_3 \dot{\varphi}^3 + N_4 |\dot{\varphi}| \dot{\varphi}^3 + N_5 \dot{\varphi}^5 + \dots) d\varphi$$

Y considerando que la oscilación es armónica, se deben considerar las siguientes relaciones.

$$\varphi = a \sin \omega t$$

$$\dot{\varphi} = a\omega \cos \omega t$$

$$d\varphi = \dot{\varphi} dt$$

La integral queda como sigue:

$$L = N_1(\omega a)^2 \int_0^T \cos^2 \omega t dt + N_2(\omega a)^3 \int_0^T \cos^3 \omega t dt + N_3(\omega a)^4 \int_0^T \cos^4 \omega t dt \\ + N_4(\omega a)^5 \int_0^T \cos^5 \omega t dt + \dots$$

Introduciendo una nueva notación

$$I_n = \int_0^T \cos^n \omega t dt$$

La integral de arriba se puede calcular con la siguiente ecuación de recurrencia:

$$I_{n+2} = \frac{n+1}{n+2} I_n$$

La cual resulta de la integración por partes donde, además

$$I_0 = T, \quad I_1 = \frac{2}{\pi} T.$$

Entonces:

$$L = N_1(\omega a)^2 \frac{1}{2} T + N_2(\omega a)^3 \frac{4}{3\pi} T + N_3(\omega a)^4 \frac{3}{8} T + N_4(\omega a)^5 \frac{16}{15\pi} T + \dots$$

Luego introduciendo el término de amortiguamiento equivalente y simplificando.

$$N = N_1 + N_2(\omega a) \frac{8}{3\pi} + N_3(\omega a)^2 \frac{3}{4} + N_4(\omega a)^3 \frac{32}{15\pi} + \dots$$

Bajo las siguientes consideraciones:

$$b_i = \frac{N_i}{(J_{xx} + m_{44})}, \quad b \equiv 2v_{sq}$$

El análisis de las no linealidades cuadrática y cúbica respecto a la velocidad angular se reduce en la siguiente expresión:

$$v_{sq} = \frac{1}{2} b_1 + \frac{4}{3\pi} b_2 (\omega_n a) + \frac{3}{8} b_3 (\omega_n a)^2$$

donde los coeficiente b_1 , b_2 y b_3 son independientes de la amplitud del ángulo de balance.

ANEXO B

DETERMINACIÓN DE LA ALTURA METACÉNTRICA CON Y SIN VELOCIDAD (EXPERIMENTO DE INCLINACIÓN).

Antes de realizar las pruebas experimentales en balance libre con amortiguamiento se determina la altura metacéntrica de cada condición

ensayada, para lo que se realiza un experimento de inclinación. La Figura 67 muestra el esquema que se utiliza en la prueba de inclinación, para lo que se emplea un peso de 0.5 kg el cual es desplazado transversalmente hacia babor y estribor (15 y 30 cm) en ambas direcciones, con un total de 8 movimientos en total.



Figura 67. Esquema empleado para la prueba de inclinación

Resultados de las pruebas de inclinación para los ensayos sin velocidad de avance.

La Tabla VIII muestra los resultados de la prueba de inclinación realizada para determinar la altura metacéntrica de cada condición a ensayar con velocidad de avance nula. Se observa el ángulo de escora máximo alcanzado en las diferentes posiciones en las que se usó un peso de 0.5 kg.

Característica	Regreso a Puerto			Salida de Puerto			Cargado		
	$\Delta=48$ kg			$\Delta=63$ kg			$\Delta=77$ kg		
Ángulo con el peso desplazado 30 cm (B)	2.72	3.39	5.35	2.24	2.70	4.37	1.81	2.25	2.65
Ángulo con el peso desplazado 30 cm (E)	2.77	3.38	5.66	1.92	2.70	4.41	1.83	2.25	2.65
Ángulo con el peso desplazado 15 cm (B)	1.4	1.66	2.67	1.07	1.37	2.18	0.93	1.14	1.36
Ángulo con el peso desplazado 15 cm (E)	1.37	1.81	2.59	0.85	1.24	2.30	0.93	1.13	1.31

Tabla VIII. Resultados de la prueba de inclinación S/V

Resultados de las pruebas de inclinación para los ensayos con velocidad de avance.

La Tabla IX muestra los resultados de las pruebas de inclinación realizadas para determinar la altura metacéntrica de cada condición a ensayar con velocidad de avance. Se observa el ángulo de escora alcanzado en las diferentes posiciones en las que fue colocado el peso de 0.5 kg.

Característica	Regreso a Puerto			Salida de Puerto			Cargado		
	$\Delta=48$ kg			$\Delta=63$ kg			$\Delta=77$ kg		
Ángulo con el peso desplazado 30 cm (B)	2.38	3.24	4.38	2.04	2.57	3.69	1.78	2.32	3.17
Ángulo con el peso desplazado 30 cm (E)	2.40	3.10	4.58	1.95	2.63	3.72	1.85	2.18	2.85
Ángulo con el peso desplazado 15 cm (B)	1.19	1.67	2.24	0.90	1.33	1.95	0.87	1.11	1.66
Ángulo con el peso desplazado 15 cm (E)	1.21	1.54	2.31	1.05	1.26	1.71	0.96	0.94	1.35

Tabla IX. Resultados de la prueba de inclinación C/V.

ANEXO C

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES SIN VELOCIDAD DE AVANCE

Los resultados de las pruebas sin velocidad de avance se encuentran en el directorio “SIN VELOCIDAD” y están organizados como se detalla en la Tabla X. Este directorio además contiene el archivo obtenido de la prueba de inclinación de cada condición ensayada. Algunas pruebas que no se incluyen fueron desechadas siguiendo el proceso que se explica en el capítulo 2.1. Dentro de cada carpeta nombrada como Prueba 1,2..., se encuentran 3 archivos: el archivo con formato texto con los datos originales, otro con los datos filtrados, y uno con formato `bmp` en el cual se observa la fecha y hora en la que se registró cada curva de decaimiento. Además un archivo de los datos necesarios para aplicar el método de Himeno e Ikeda.

Condición 1, $\Delta=48$ kg [17 de Septiembre]		
Res1gm1 (6.24 cm)	Res1gm2 (5.18 cm)	Res1gm3 (3.19 cm)
Prueba 1	Prueba 1	Prueba 1
Prueba 2	Prueba 2	Prueba 2
Prueba 3	Prueba 3	Prueba 3

Prueba 4	Prueba 4	Prueba 4
Prueba 5	Prueba 5	Prueba 5
Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación
Condición 2, $\Delta=63$ kg [16 de Septiembre]		
Res2gm1 (6.8 cm)	Res2gm2 (5.0 cm)	Res2gm3 (3.1 cm)
Prueba 1	Prueba 1	Prueba 1
Prueba 2	Prueba 2	Prueba 2
Prueba 3	Prueba 3	Prueba 3
Prueba 4		Prueba 4
Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación
Condición 3, $\Delta=77$ kg [17 de Septiembre]		
Res2gm1 (6.1 cm)	Res2gm2 (4.9 cm)	Res2gm3 (4.2 cm)
Prueba 1	Prueba 1	Prueba 1
Prueba 2	Prueba 2	Prueba 2
Prueba 3	Prueba 3	Prueba 3
Prueba 4	Prueba 4	Prueba 4
	Prueba 5	Prueba 5
Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación

Tabla X. Organización de los resultados de las pruebas S/V

ANEXO D

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES CON VELOCIDAD DE AVANCE

Los resultados de las pruebas con velocidad de avance se encuentran en el directorio "CON VELOCIDAD" y están organizados como se detalla en la Tabla XI. Este directorio además contiene el archivo obtenido de la prueba de inclinación de cada condición ensayada. Las pruebas que no se incluyen han sido desechadas por no cumplir con el número mínimo de ciclos. Dentro de cada carpeta nombrada como Resigmi, $i=1,2,3$ se encuentran 3 archivos: uno con formato de texto con los datos originales, otro con los datos filtrados, y uno con formato `bmp` en el cual se observa la fecha y hora en la que se registró cada curva de decaimiento. Además un archivo de los datos necesarios para aplicar el método de Himeno e Ikeda.

Condición 1, $\Delta=48$ kg [17 de Octubre]		
Res1gm1 (7.45 cm)	Res1gm2 (5.64 cm)	Res1gm3 (3.96 cm)

Rango de velocidades (0.55-1.98) [m/s]	Rango de velocidades (0.75-1.98) [m/s]	Rango de velocidades (0.65-1.99) [m/s]
Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación
Condición 2, $\Delta=63$ kg [20 de Octubre]		
Res2gm1 (7.16 cm)	Res2gm2 (5.37 cm)	Res2gm3 (3.80 cm)
Rango de velocidades (0.78-2.28) [m/s]	Rango de velocidades (0.75-2.03) [m/s]	Rango de velocidades (0.84-2.27) [m/s]
Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación
Condición 7, $\Delta=7$ kg [25 de Octubre]		
Res2gm1 (6.21 cm)	Res2gm2 (5.24 cm)	Res2gm3 (3.72 cm)
Rango de velocidades (1.02-1.77) [m/s]	Rango de velocidades (0.63-1.63) [m/s]	Rango de velocidades (0.61-1.83) [m/s]
Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación	Prueba de Inclinación

Tabla XI. Organización de los resultados de las pruebas C/V

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **HADDARA, Mahmoud. y ZHANG, Suimin**, Experimental Study of the Effect of Forward Speed and Following Waves on Roll Damping of Fishing Vessels. M.Sc.Thesis, Memorial University of Newfoundland, Canada, 1993.
- [2] **MERINO, Jorge**, Eliminación de la resonancia paramétrica en barcos pesqueros utilizando la teoría del tanque de estabilización pasivo tipo U. Tesis de grado de Ingeniería Naval, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2007.
- [3] **KAWAHARA, Yuki, MAEKAWA, Kazuya, e, IKEDA, Yoshiho**, 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.
- [4] **FERNÁNDEZ, Julio, y, NEVES, Marcelo**, Estabilidad Desarrollos Recientes de Nuevos Criterios de Estabilidad Intacta de Buques en Olas. Simposio Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuaria, Perú, 2012.

- [5] **BULIAN, Gabriele**, 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.
- [6] **CEVALLOS, O., CHICA, I., y, CASTILLO, E.**, Análisis de Dinámica del Buque: Movimiento (no acoplado) de Roldo (balance) No lineal. Tesis de grado de Ingeniería Naval, FIMCM-ESPOL, Ecuador, 1991.
- [7] **PÉREZ, Luis, ZAMORA, Ricardo, y, VALLE, Jesús**, El Efecto de escala en la determinación del Movimiento de Balance de un Buque. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, España, 2004.
- [8] **PAWLOWSKI, Maciej**, Approximation of the non-linear roll damping. Proceedings 11th International Ship Stability Workshop, 2010.
- [9] **TRAPERO, Juan**, Técnicas de Identificación Algebraicas y Espectrales de Señales armónicas. Aplicaciones En mecatrónica y economía. Tesis de Doctorado, Universidad de Castilla-La Mancha., España, 2008.
- [10] **ELSIMILLAWY, Nagy**, Time-Simulation of ship motions, PhD thesis, University of Glasgow, Escocia, 1984.
- [11] **HIMENO, Yohi**, "Prediction of Ship Roll Damping - State of the art". Department of Naval Architecture and Marine Engineering, U. de Michigan, EE.UU, 1981

[12] **VALLE, Jesús**, Estudio teórico experimental de las no linealidades del amortiguamiento en el movimiento de Balance de Buques, Tesis de Doctorado, ETSIN, España, 1998.

[13] www.globalsecurity.or