

ENSAYOS EXPERIMENTALES PARA LA OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE HIDRÁULICO COMO UN FACTOR RELEVANTE EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO DE UN BUQUE

Álvarez, A., Rodríguez, J., González, P.

Abstract

In this paper an experimental study appears about the behavior of a model subject to the progressive flood of its compartments. The study consists of several tests by means of which one or more compartments are flooded using circular openings, and of other forms, with different dimensions. In every test the domain of the time the draw and the angles of roll and pitch are measured. Bearing these movements in mind the volume and water quantity is estimated inside the compartment. This information serves to obtain the hydraulic coefficient associated with the openings of the model. These coefficients can be used later to calibrate programs of calculation to the progressive flooding in the ships.

Keywords: Hydraulic coefficient, flooding, Ship project

Resumen

En este artículo se presenta un estudio experimental del comportamiento de un modelo sujeto a la inundación progresiva de sus compartimentos. El estudio consta de varios ensayos mediante los que se inunda uno o varios compartimientos utilizando aberturas circulares, y de otras formas, con diferentes dimensiones. En cada ensayo se mide en el dominio del tiempo el calado y los ángulos de escora y cabeceo. Teniendo en cuenta estos movimientos se estima la cantidad de agua y caudal en el interior del compartimiento. Estos datos sirven para obtener el coeficiente hidráulico asociado a las aberturas del modelo. Estos coeficientes pueden ser utilizados posteriormente para calibrar programas de cálculo de la inundación progresiva en los buques.

Palabras clave: Coeficiente hidráulico, inundación, proyecto buque

1. Introducción

La seguridad marítima siempre ha estado condicionada por el riesgo de abordaje, uno de los siniestros que ocurren con más frecuencia (a pesar de los progresos técnicos en la navegación) y que implica pérdidas de vidas y bienes.

Las principales causas de los accidentes marítimos son: malas condiciones atmosféricas, deficiencias en la comunicación oportuna de las condiciones meteorológicas, fallos técnicos o mecánicos que tienen su origen en un insuficiente mantenimiento, intensidad del tráfico marítimo, fallos humanos, carga inadecuada de las embarcaciones, exceso de pasaje, carga mal distribuida, etc. Cuando se produce un accidente marítimo la embarcación sufre daños que pueden crear una situación de peligro que no sólo afecta a la tripulación y al buque sino también a la carga. Una consecuencia derivada del choque de dos embarcaciones es la inundación del compartimiento o compartimentos afectados.

En este trabajo nos limitaremos a estudiar el comportamiento, en el dominio del tiempo, de un buque que ha sufrido un abordaje que ha provocado la inundación de alguno de sus compartimentos, para lo cual se realizan ensayos con un modelo. El modelo es simple y

consiste en un cajón de metacrilato de dimensiones 1500*400*300 mm que está dividido en puntal en dos espacios y en eslora en cinco, a su vez los cinco espacios se han subdividido en cinco más.

Con los datos obtenidos en los ensayos se determina la cantidad de agua en el interior de los compartimentos en cada instante y con estos datos se calcula el coeficiente hidráulico. Estos coeficientes varían entre 0.5 y 1 según los datos publicados por Söding [7]. Esta variación depende de la forma del agujero tomando un valor de 0.63 para una abertura situada en una superficie plana y 1 en el caso de una superficie inclinada. El coeficiente hidráulico también varía según la altura del fluido en cada lado de la pared que contiene la abertura, sobre todo en los casos en los que la altura de fluido en la cara interior esta por debajo o por encima de la avería. Normalmente el coeficiente hidráulico se presenta con un valor típico de 0,60 para altos números de Reynolds, Boss [1].

2. Resultados Experimentales

2.1. Descripción del Modelo

En este apartado se presenta la simulación experimental de inundación en el dominio del tiempo, del modelo tipo cajón. El modelo tiene como principales características las que se muestran en la tabla 1. Además, la geometría del modelo se ilustra en las figuras 1, 2 y 3.

Desplazamiento	32.83 Kg
L_{TOTAL}	1.5 m
B	0.4 m
D_{CP}	0.15 m
D_{CS}	0.30 m
T	0.064 m
LCG	0.7395 m
VCG	0.1395 m
GM_T (desde popa)	0.07 m

Tabla 1. Características del cajón

La Figura 3 da una idea real del modelo gracias a su representación en tres dimensiones. También se puede ver en el detalle A-A' el tamaño de las aberturas que comunican los compartimentos 2, 3, 4 y 7 y 8 entre sí.

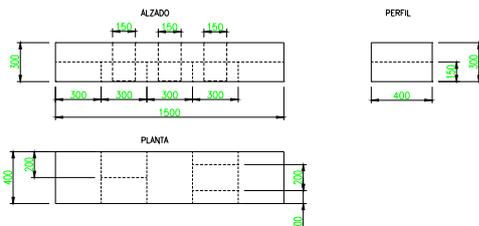


Figura 1. Geometría del modelo

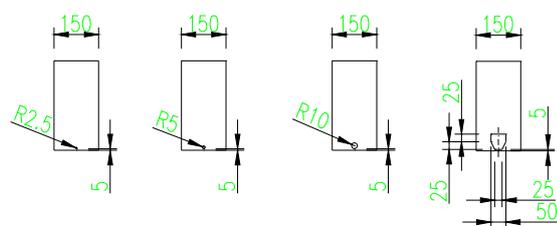


Figura 2. Geometría de las compuertas con el tamaño y posición de las aberturas

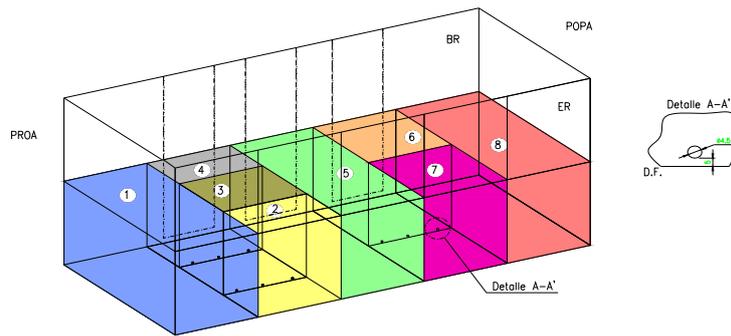


Figura 3. Figura en 3D del modelo

El modelo que se describe se utilizará para realizar un conjunto de experimentos. Con estos experimentos queremos determinar la influencia del tamaño de la abertura, que simula el daño en el casco del buque producido por abordaje, en la inundación de los compartimentos. Para ver como afecta el tamaño de las averías intercambiamos diferentes compuertas cuya forma y posición se muestran en la figura 2. Las compuertas contienen las aberturas que simulan el orificio producido en el casco por abordaje.

Los ensayos los efectuamos teniendo en cuenta las siguientes condiciones: desplazamiento de 32.83 Kg (para un calado de 0.064m) y una posición vertical del centro de gravedad de 0.1395m encima de la línea base. Con estas condiciones calculamos la posición del metacentro situado a 0.21m y también la altura metacéntrica que nos dio un valor de 0.07m.

2.2. Resultados experimentales en el dominio del tiempo

Con el fin de conseguir la condición de equilibrio inicial lastramos el modelo añadiendo pesos como se muestra en la figura 4, para esta posición de equilibrio obtuvimos un calado de 0.064m.

Alcanzada la posición de equilibrio procedimos a realizar los ensayos con las diferentes compuertas que simulan el daño accidental en el casco. Estos ensayos los efectuamos en un canal dentro de un espacio cerrado, por tanto, no tenemos en cuenta ni la influencia del viento ni la de olas; es decir, son ensayos en aguas tranquilas y abrigas.

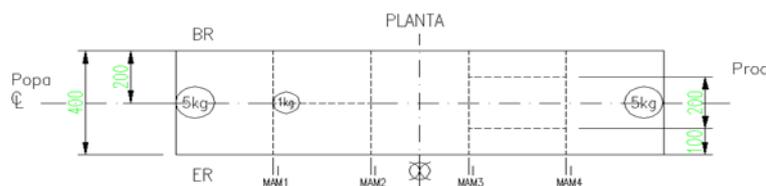


Figura 4. Condición de equilibrio

El primer experimento (1A a 1E), al igual que los dos siguientes, incluye cinco ensayos en los que inundamos cinco compartimentos. La inundación de los compartimentos la conseguimos utilizando compuertas intercambiables.

Con el objetivo de estudiar cómo afecta el tamaño del daño accidental en el casco realizaremos en el segundo experimento (2A a 2E) el mismo número de ensayos. Además inundamos los mismos compartimentos que en el primero, aunque ahora se cambia la compuerta por la de 2.1 cm de diámetro de orificio que simula el daño.

En el tercer experimento (3A a 3E), como en los anteriores, hacemos cinco ensayos inundando cinco compartimentos. En este caso utilizamos una abertura mayor cuyo tamaño y forma se indica en la figura 4.

2.2.1. Experimento 1A

En el primer ensayo de simulación asimétrica en el dominio del tiempo, inundamos el compartimiento 4, que está situado en proa y en el costado de babor (figura 5). Para este ensayo escogimos una abertura circular de tamaño de 1cm de diámetro.

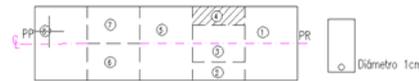


Figura 5. Posición del compartimiento 4 y tamaño de la abertura

Los resultados en forma de gráficos los podemos ver en la figura 6: en el primer gráfico se representa la escora en (negro) y en el segundo el cabeceo en (azul).

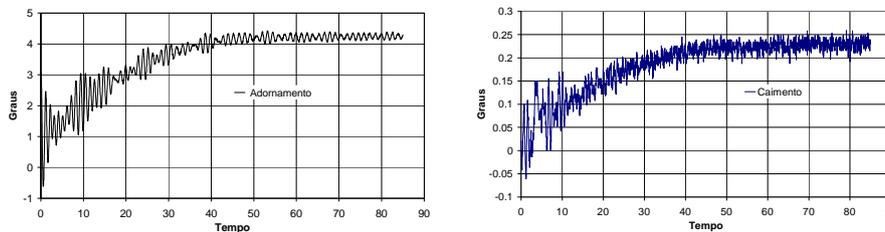


Figura 6. Ensayo inundación compartimiento 4

2.2.2. Experimento 1B

En el segundo ensayo inundamos los compartimentos 3 y 4 con la misma abertura de tipo circular y tamaño de 1cm de diámetro (figura 8). La figura 9 presenta la gráfica resultante del ensayo.

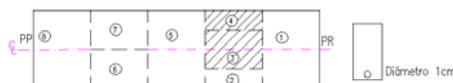


Figura 7. Posición de los compartimentos 3, 4 y tamaño de la abertura

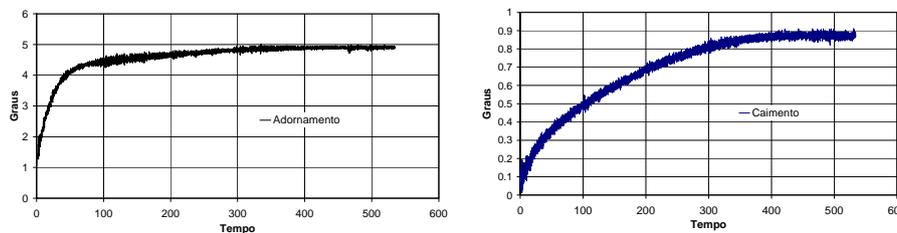


Figura 8. Ensayos inundación compartimentos 3 y 4

2.2.3. Experimento 1C

En el tercer ensayo inundamos los compartimentos 2, 3 y 4 con la misma abertura de tipo circular y tamaño de 1cm de diámetro (figura 9). Los resultados se pueden ver en la gráfica de la figura 10.



Figura 9. Posición de los compartimentos 2, 3, 4 y tamaño de la abertura

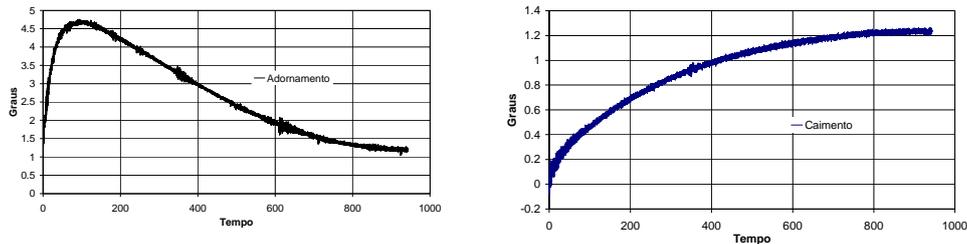


Figura 10. Ensayos de inundación compartimentos 2, 3 y 4

2.2.4 Experimento 1D

En el cuarto ensayo del experimento 1 inundamos el compartimiento 7 que está a popa de la cuaderna maestra, en el costado de babor (figura 11). El gráfico de la figura 12 nos muestra los resultados.

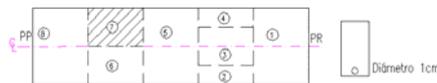


Figura 11. Posición del compartimiento 7 y tamaño de la abertura

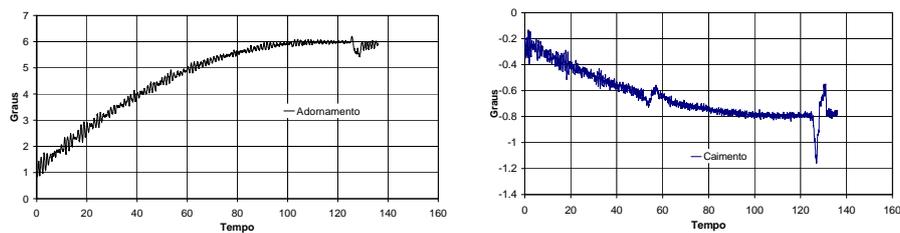


Figura 12. Ensayo inundación compartimiento 7

2.2.5. Experimento 1E

En el quinto y último ensayo de la serie del experimento 1 se inundan los compartimentos 6 y 7, por tanto, es una inundación simétrica puesto que el compartimento 6 es simétrico con respecto a la línea de crujía al compartimento 7. El compartimento 6 está situado en el costado de estribor y a popa de la cuaderna maestra (figura 13).

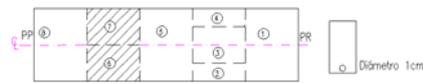


Figura 13. Posición de compartimentos 6 y 7 y tamaño de la abertura

Ambos compartimentos están comunicados por tres orificios colocados a igual distancia entre ellos y diámetro 4.5 mm. La figura 14 nos muestra la gráfica resultante del ensayo.

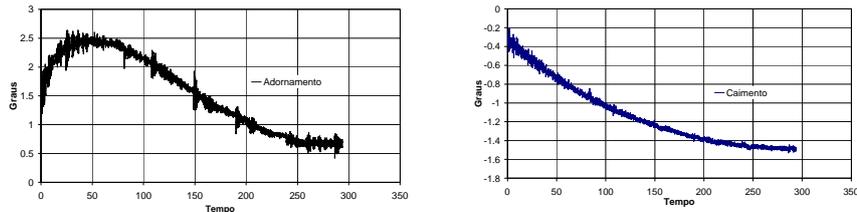


Figura 14. Ensayos de inundación compartimentos 6 y 7

2.2.6. Experiencia 2A

En el primer ensayo inundamos el compartimento 4 situado a proa de la cuaderna maestra, en el costado de babor (figura 15), obteniendo los resultados ilustrados en las gráficas de la figura 16.



Figura 15. Posición del compartimento 4 y tamaño de la abertura

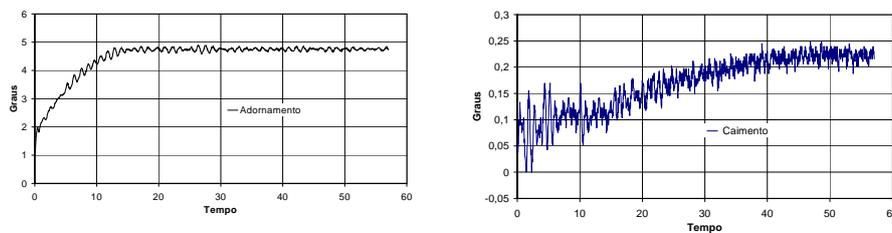


Figura 16. Ensayo inundación compartimento 4

2.2.7. Experimento 2B

En el segundo de ensayo de este experimento se inundan los compartimentos 3 y 4. Estos compartimentos están situados a proa de la cuaderna maestra, el 4 en el costado de babor mientras que el compartimento 3 se encuentra centrado con respecto a la línea de crujía (figura 17). En la gráfica de la figura 18 observamos los resultados.

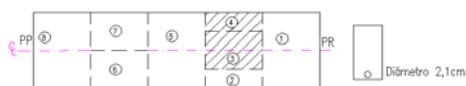


Figura 17. Posición de los compartimentos 3 y 4 y tamaño de la abertura

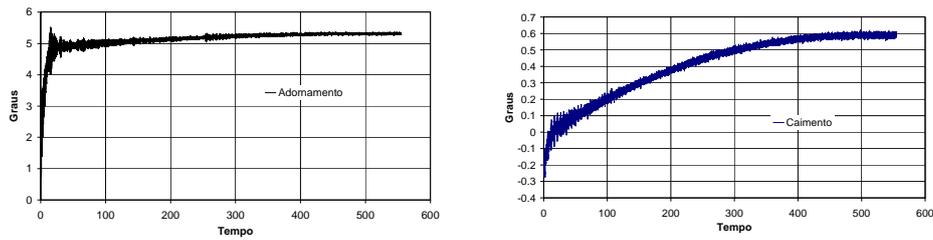


Figura 18. Ensayos inundación compartimentos 3 y 4

2.2.8. Experimento 2C

En el tercer ensayo se inundan los compartimentos 2, 3 y 4 situados a proa de la cuaderna maestra (figura 19). Los compartimentos 3 y 4 están comunicados por orificios circulares de 4,5 mm. Las gráficas con los resultados de este ensayo se muestran en la figura 20.

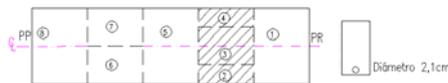


Figura 19. Posición de los compartimentos 2, 3 y 4 y tamaño de la abertura

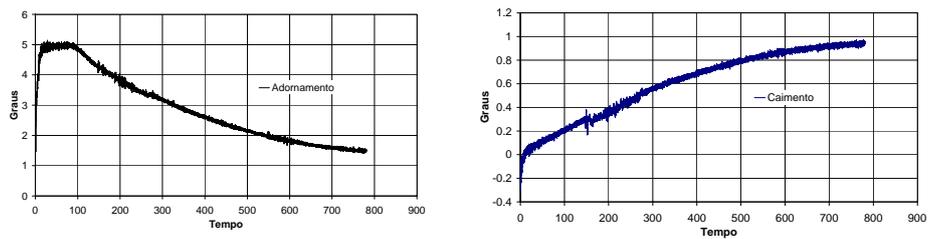


Figura 20. Escora de los compartimentos inundados 2, 3 y 4

2.2.9. Experimento 2D

Éste es el cuarto ensayo del segundo experimento (figura 21). En este ensayo inundamos el compartimiento 7 situado a 150 mm a popa de la cuaderna maestra. Los resultados se plasman en las gráficas de la figura 22.



Figura 21. Posición del compartimiento 7 y tamaño de la abertura

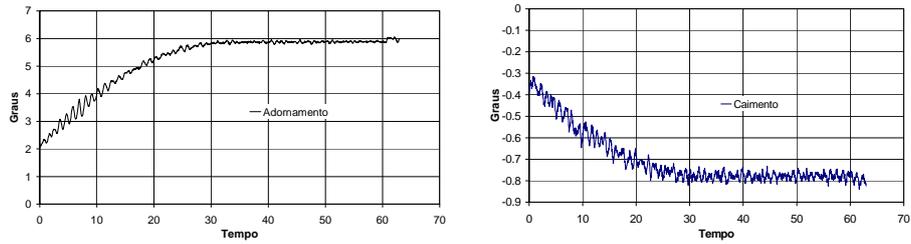


Figura 22. Ensayo inundación compartimento 7

2.2.10. Experimento 2E

El quinto y último de la serie de ensayos del segundo experimento consiste en inundar los compartimentos 6 y 7 (figura 23). Los datos que vamos a analizar se presentan en las gráficas de la figura 24.



Figura 23. Posición de los compartimentos 6 y 7 y tamaño de la abertura

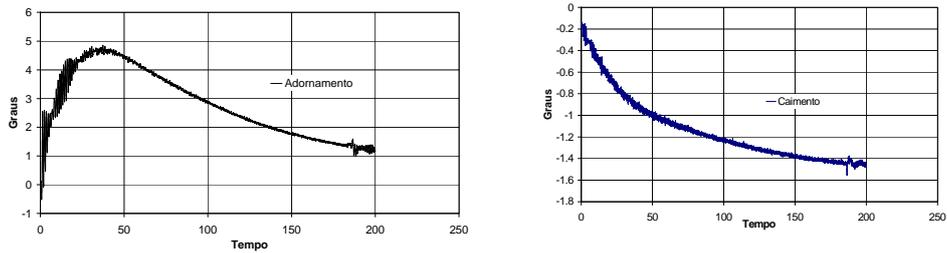


Figura 24. Ensayos inundación compartimentos 6 y 7

2.2.11. Experimento 3A

Inundamos el compartimento 4 situado a proa de la cuaderna maestra, en el costado de babor y entre los mamparos 3 y 4 como se indica en la figura 25. Los resultados se presentan en las gráficas de la figura 26.



Figura 25. Posición del compartimento 4 y tamaño de la abertura

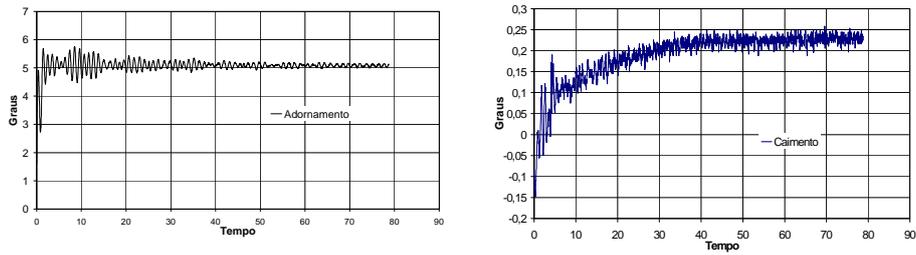


Figura 26. Ensayo inundación compartimento 4

2.2.12. Experimento 3B

Segundo ensayo del tercer experimento en que el daño producido en el casco se simula con una abertura trapezoidal, inundando los compartimentos 3 y 4 que se encuentran a proa de la cuaderna maestra (figura 27).



Figura 27. Posición de los compartimentos 3 y 4 y tamaño de la abertura

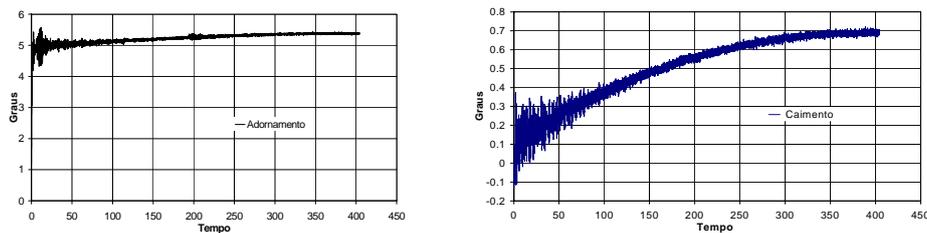


Figura 28. Ensayos inundación compartimentos 3 y 4

2.2.13. Experimento 3C

En este tercer ensayo inundamos los compartimentos 2, 3 y 4 que se encuentran situados a proa de la cuaderna maestra.

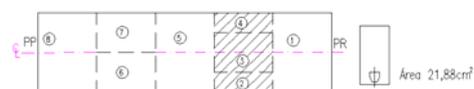


Figura 29. Posición de los compartimentos 2, 3 y 4 y tamaño de la abertura

El compartimento 4 está en el costado de babor, el 3 centrado y el 2 simétrico al 4 pero en el costado de estribor (figura 29). La figura 30 ilustra los resultados mediante unas gráficas.

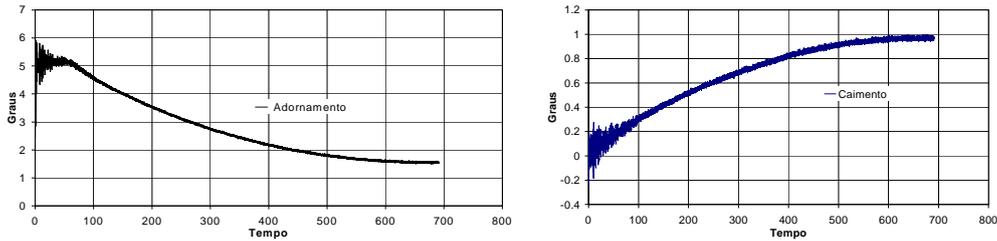


Figura 30. Ensayos inundación compartimentos 2, 3 y 4

2.2.14. Experimento 3D

En el cuarto ensayo inundamos el compartimento 7, situado a popa de la cuaderna maestra entre los mamparos 1 y 2, en el costado de babor (figura 31).



Figura 31. Posición del compartimento 7 y tamaño de la abertura

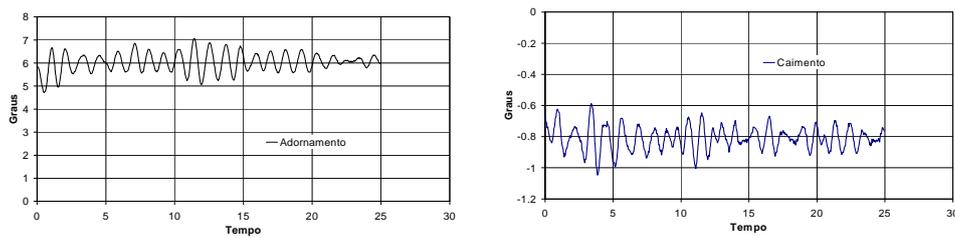


Figura 32. Ensayo inundación compartimento 7

2.2.15. Experimento 3E

Éste es el quinto y último ensayo de la serie del tercer experimento. En este caso inundamos los compartimentos 6 y 7, situados a popa de la cuaderna maestra entre los mamparos 1 y 2 (figura 33). Los resultados de este ensayo los podemos ver en las gráficas de la figura 34.

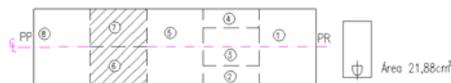


Figura 33. Posición de los compartimentos 6 y 7 y tamaño de la abertura

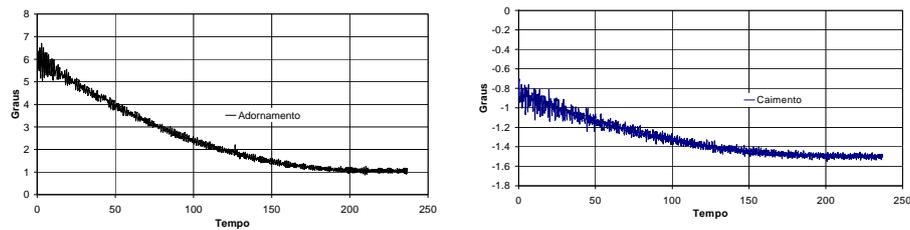


Figura 34. Ensayos inundación compartimentos 6 y 7

3. Análisis de los Resultados Experimentales

Cuando se comparan las escoras para los distintos tamaños de avería se observa que el tiempo que tarda el modelo en alcanzar la máxima escora (aproximadamente 5°) en los compartimentos 2, 3 y 4 situados a proa va aumentando a medida que se amplía el número de compartimentos inundados; es decir, primero se inunda el compartimento 4, a continuación los compartimentos 3 y 4 y por último los compartimentos 2, 3 y 4. Esto ocurre para los tres tamaños de avería que se han ensayado 0,75; 3,46 y 22,88 cm² de área. También se observa que al inundar los compartimentos 2, 3 y 4 (ver ubicación en la figura 33) el modelo tiende a recuperar su posición inicial una vez que adquiere la máxima escora

En los compartimentos 6 y 7 situados en la zona de popa el modelo logra la máxima escora (aproximadamente 6°) sólo cuando se inunda el compartimento 7 produciéndose una disminución en el tiempo que tarda en alcanzar la máxima escora al aumentar el tamaño de la abertura. Cuando se inundan los compartimentos 6 y 7 el modelo adquiere una escora menor y a continuación ésta disminuye hasta lograr la posición inicial de equilibrio. La tabla 2 recoge los datos finales de escora y cabeceo para cada compartimiento obtenidos de forma experimental y con autohydro.

Comp.	Escora final experimental						Cabeceo final experimental						Escora final Autohydro			Cabeceo final Autohydro		
	Área avería cm ²			Área avería cm ²			Área avería cm ²			Área avería cm ²			Área avería cm ²					
	0,75	3,46	1,88	0,75	3,46	21,88	0,75	3,46	1,88	0,75	3,46	21,88	0,75	3,46	21,88			
4	4,2	4,8	5	0,24	0,23	0,24	4,5	4,8	5	0,25	0,25	0,25						
3 y 4	5	5,2	5,3	0,89	0,6	0,7	5,5	5,7	6	0,9	0,9	0,9						
2, 3 y 4	1,2	1,5	1,5	1,2	0,88	0,89	1,5	1,8	2	1	1	1						
7	6	6	6	-0,8	-0,8	-0,8	5,5	5,8	6	-0,9	-0,9	-0,9						
6 y 7	0,2	1,5	1	-1,5	-1,4	-1,5	0,5	1	1,5	-1,5	-1,5	-1,5						

Tabla 2. Comparación de los datos experimentales con los obtenidos en autohydro

4. Estimación de los Coeficientes hidráulicos

Con base en los movimientos medidos, se determinan las cantidades de agua en cada compartimento y con estos datos se calculan los caudales de descarga hacia el interior de los compartimentos. Entonces se calculan los coeficientes hidráulicos de descarga asociados a las aberturas del modelo teniendo en cuenta que la velocidad de descarga se determina aplicando la ecuación:

$$v_2 = \sqrt{2g(H_1 - H_2)} / \rho \quad (1)$$

Donde H_2 es igual a cero y H_1 es la altura desde la superficie libre hasta el centro del orificio considerando que esta aumenta linealmente con el tiempo. Además, se desprecia la densidad ρ porque en este caso es igual en ambas caras de las compuertas intercambiables y por tanto no tiene efecto sobre el volumen.

Con ayuda de AutoHydro se obtuvo H_1 y el caudal para cada instante de tiempo y a continuación se aplicó la ecuación (2).

$$Q = C_d v_2 A \quad (2)$$

Donde: C_d coeficiente de descarga; A área del orificio.

Los resultados se muestran en las gráficas de las figuras 35, 36, 37, 38, 39 y 40. En ellas se observa que el coeficiente es lineal y que varía entre 0.60 y 0.90 aproximadamente. Estos valores se han obtenido estudiando todas las posiciones del fluido en función del tiempo por esa razón los coeficientes obtenidos varían según la altura de fluido en la cara interior de la pared para las situaciones en las que esta por debajo o por encima de la avería.

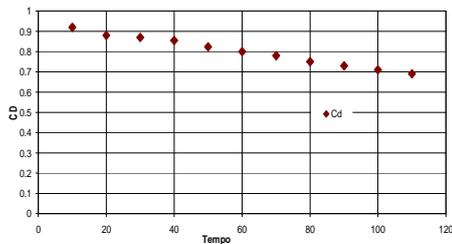


Figura 35. Coeficiente del compartimiento 4 con una avería de 0,75cm² de área

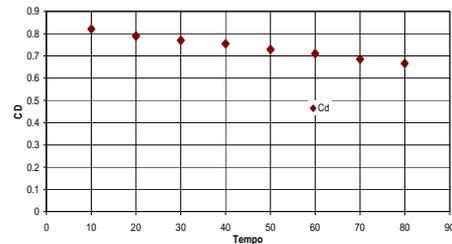


Figura 36. Coeficiente del compartimiento 4 con una avería de 3,46cm² de área

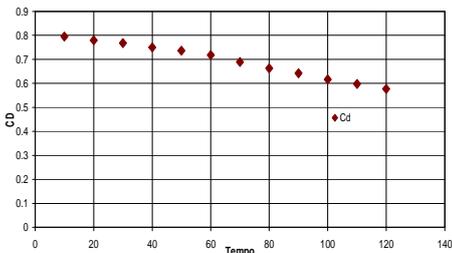


Figura 37. Coeficiente del compartimiento 4 con una avería de 21,88cm² de área

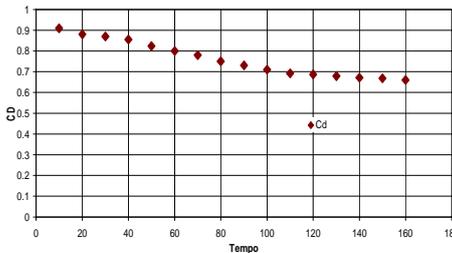


Figura 38. Coeficiente del compartimiento 7 con una avería de 0,75cm² de área

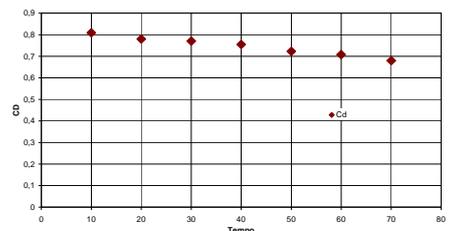


Figura 39. Coeficiente del compartimiento 7 con una avería de 3,46cm² de área

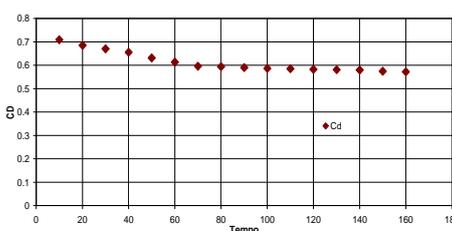


Figura 40. Coeficiente del compartimiento 7 con una avería de 21,88cm² de área

También con Autohydro se calcularon para cada ensayo la escora y el cabeceo obteniendo unos resultados muy similares a los experimentales en algunos casos con una variación inferior al 2%.

5. Conclusiones

Los accidentes marítimos se producen principalmente por malas condiciones atmosféricas, fallos técnicos o mecánicos, intensidad del tráfico marítimo, etc., conduciendo frecuentemente a la inundación de los compartimientos del buque. Las fases intermedias de inundación se caracterizan muchas veces por escoras transitorias debidas a la acumulación de agua en un costado del buque. Este fenómeno se debe, generalmente a la presencia de mamparos longitudinales en la disposición del buque. Si la abertura en el costado tuviese grandes dimensiones, la distribución del agua sería, durante algún tiempo, significativamente asimétrica. Esta asimetría también se ve afectada por los coeficientes hidráulicos de inundación del agua hacia, o entre, los compartimientos del buque. Los ensayos experimentales presentados en este artículo permiten determinar los coeficientes hidráulicos.

Además con los ensayos experimentales se puede observar la inundación asimétrica transitoria del modelo y evidenciar la influencia de la dimensión de la abertura de costado en el ángulo máximo de escora observado en el transcurso del proceso de inundación. El registro de los ángulos alcanzados en el dominio del tiempo permite efectuar de forma indirecta una estimación de los coeficientes hidráulicos, obteniendo coeficientes que varían entre 0.60 y 0.90. Estos valores están dentro de las tolerancias publicadas por Söding [7].

Los resultados experimentales también muestran oscilaciones significativas en las fases iniciales de inundación debidas al inadecuado mecanismo utilizado para abrir las aberturas de costado del modelo, constituyendo esto un aspecto para mejorar en el futuro. También se pretende, en el futuro, medir de forma directa el movimiento vertical del modelo así como las alturas del agua dentro de los compartimientos, especialmente cuando se inunden varios compartimientos al mismo tiempo. Finalmente, es necesario tener en cuenta que el modelo tiene unas dimensiones muy pequeñas (1500x400x300 mm) por tanto el efecto de la escala juega un papel importante si se pretende extrapolar estos resultados a un buque real.

Referencias

- [1] Boss, M. G., "Discharge measurement structures", *Int. Institute for land reclamation and improvement*, Wageningen, 1976.
- [2] IMO, "Large Passenger Ship Safety: Time-to-flood simulations for a large passenger ship-initial study", *Sub-Committee on Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety*, 46th session, Agenda item 8 2003.
- [3] Palazzi, L. and Kat, J., "Model Experiments and Simulations of Damage Ship with Air-Flow Taken into Account", 6th *International Ship Stability Workshop*, New York, UUSS 2002.
- [4] Veer, R. and Kat, J., "Experimental and Numerical Investigation on Progressive Flooding and Sloshing in Complex Compartment Geometries", 7th *International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Tasmania, Australia, 2000.
- [5] Veer, R. et al., "Exploring the Influence of Different Arrangements of Semi-Watertight Spaces on Survivability of Damaged Large Passenger Ship", 7th *International Ship Stability Workshop*, Shanghai, China, 2004.
- [6] Santos, T. et al, "Time Domain Modeling of the Transient Asymmetric Flooding of Ro-Ro Ships", *Ocean Engineering* 29 (6), pp. 667-688, 2002.

[7] Söding, H, "Flow computations for ship safety problems", *Ocean Engineering* 29, pp. 721-738, 2001.

[8] Stratford, B.S., "The calculation of the discharge coefficient of profiled choked nozzles and optimum profile for absolute air flow measurement", *J Royal Aeronautic Society* 68, pp. 237–245, 1964.

Correspondencia:

Ana Álvarez García
Universidad de La Coruña
Avd. 19 de Febrero s/n, 15405 Ferrol, La Coruña (España).
Phone: +34 981 33 74 00 Ext. 3097
Fax: + 34 981 33 74 01
E-mail: aalvarez@udc.es