

Análisis CFD del movimiento de balance de un portacontenedores

Julio García-Espinosa, Ingeniero Naval (1) (4)

Eugenio Oñate (2)

Jens Bloch Helmers (3)

Mohammed Reda Chakkor (4)

(1) Compass Ingeniería y Sistemas S.A.

(3) Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería

(4) Det Norske Veritas, Maritime Technology and Production Centre

(2) Aula FNB-CIMNE

1.- Introducción

La predicción precisa de los movimientos de un buque y en concreto la caracterización del movimiento de balance en un buque es un aspecto de gran relevancia en ingeniería naval, dado que permite determinar las características del amortiguamiento de las formas y apéndices de un diseño, que son el punto de partida para estimar tanto su estabilidad dinámica, como su comportamiento en la mar y confortabilidad. En los últimos años, desde el campo de los métodos numéricos han aparecido diferentes técnicas para la simulación del problema de dinámica del buque, pero las más avanzadas al día de hoy desprecian o simplifican de manera grosera los efectos de la viscosidad del agua en la dinámica del buque, y consideran los efectos del amortiguamiento del movimiento de manera artificial.

El hecho mencionado ha motivado el inicio de un programa de cooperación en materia de I+D entre la empresa Compass Ingeniería y Sistemas (CompassIS), el *Centro Internacional de Métodos Numéricos* (CIMNE) y diversos departamentos de la Sociedad de Clasificación *Det Norske Veritas* (DNV). Este programa, soportado por las propias organizaciones, se ha desarrollado durante los últimos años y tiene como objetivo el desarrollo de métodos de simulación más realistas para los problemas referidos, así como para otros de gran interés en la ingeniería naval y oceánica. El presente trabajo sintetiza los resultados obtenidos hasta el momento, y que se centran en el ensayo numérico del problema de extinción del movimiento de balance.

Para el presente trabajo se ha desarrollado un novedoso enfoque para la resolución de este problema. La metodología utilizada para ello se basa en la modificación de las ecuaciones diferenciales de la dinámica de fluidos reales (ecuaciones de Reynolds – RANSE), incluyendo el movimiento de la superficie libre, mediante la aplicación del método de cálculo finitesimal [1, 2, 3, 4, 5]. En el presente caso las ecuaciones modificadas son resueltas usando un esquema predictor-corrector implícito [6, 7] y el método de los elementos finitos (FEM). Este esquema de resolución se considera óptimo para este tipo de problemas, tanto en exactitud como en tiempo de cálculo. A modo de ejemplo hay que señalar que para problemas típicos (más de 1.000.000 de elementos finitos) son necesarias menos de 4 horas de CPU para resolver varios ciclos de movimiento del barco (Pentium IV). Esto permite el análisis de una matriz de ensayos en pocos días o incluso en horas, disponiendo de una red de ordenadores o potencia de cálculo suficiente.

Los efectos de la superficie libre son simulados mediante un método de trazado de la interfaz tipo *level set* [8]. Esta metodología permite la resolución del comportamiento de los dos fluidos involucrados (aire y agua), aunque para el análisis aquí presentado se ha despreciado el efecto del aire.

El movimiento del buque debido a las fuerzas de interacción se calcula resolviendo un problema típico de dinámica de sólidos. La actualización de la posición del buque, es difundida a toda la malla y se tiene en cuenta en las ecuaciones de la dinámica del fluido mediante un esquema de integración lagrangiano-euleriano (ALE) [9]. Esta metodología permite resolver el complejo problema de interacción fluido-estructura de una manera ágil, rápida y sencilla, dado que basta una malla para analizar las diferentes configuraciones que toma el dominio, debido al movimiento del barco.

Los desarrollos mencionados han sido implementados en el código CFD y de multi-física Tdyn, comercializado por CompassIS (<http://www.compassis.com/productos/tdyn>).

El contenido del presente artículo se estructura como sigue. En primer lugar se presenta brevemente la aplicación de la metodología y el entorno de usuario desarrollado para el programa Tdyn, para a continuación presentar una aplicación real del método al análisis de un buque

Índice

1.- Introducción

2.- Aplicación de la metodología

3.- Ejemplo de aplicación

4.- Conclusiones

5.- Referencias

portacontenedores. Finalmente se incluye un sencillo apartado de conclusiones.

2.- Aplicación de la metodología

El programa Tdyn ha sido usado como plataforma para los desarrollos mencionados en el apartado anterior, habiendo adaptado su interfaz para resolver este tipo de problemas. Por otra parte, Tdyn está completamente integrado con el sistema de pre y postproceso GiD (<http://www.gidhome.com>). Este sistema permite una sencilla definición de la geometría, introducción de los datos necesarios para el análisis, así como el posterior postproceso de los resultados. La figura 1 muestra la geometría del modelo analizado y cuyos resultados se presentan posteriormente. Esta geometría ha sido importada directamente en el entorno GiD, a partir de la definición IGS (basada en entidades NURBS), suministrada por DNV.

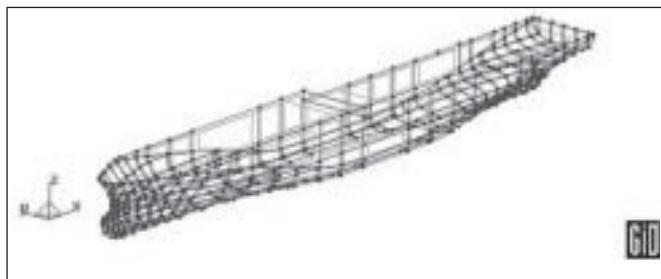


Figura 1.- Geometría del modelo basada en parches NURBS

Sobre la geometría del casco desnudo, y dentro del mismo entorno se han creado unas quillas de balance, siguiendo las especificaciones de DNV y despreciando su espesor, al ser éste muy pequeño en comparación con su manga. Sobre la geometría del modelo se ha construido el volumen de control, tal y como se muestra en la figura 2.

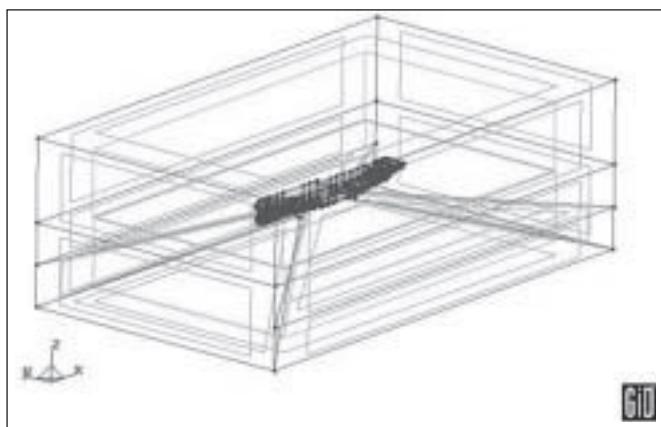


Figura 2.- Geometría final del modelo usada en Tdyn

El siguiente paso ha sido la definición de los datos necesarios para el análisis. La figura 3 muestra la ventana de definición de los datos del movimiento del buque. Entre ellos se incluyen las propiedades de masa e inercias, centro de gravedad y la definición de los grados de libertad del movimiento.

Por otro lado, la figura 4 muestra la ventana para la definición de la superficie libre, mediante el esquema *level set*. Este esquema resuelve una variable que representa la distancia (con signo) de un punto a la superficie libre. De esta manera, se definen las propiedades físicas de un punto del dominio (aire o agua) en función del valor (positivo o negativo) de esta variable. Como se muestra en la figura 4 esta variable se inicializa al valor dado por la coordenada *y*, lo que indica que la superficie libre es plana y está inicialmente en la posición *z* = 0.

Finalmente, a partir de la geometría definida se han generado las mallas de elementos finitos necesarias, que en este caso y para facilitar el proceso, se han basado en tetraedros lineales. Las mallas que se han utilizado en los análisis tienen más de 1 millón de tetraedros, con tama-

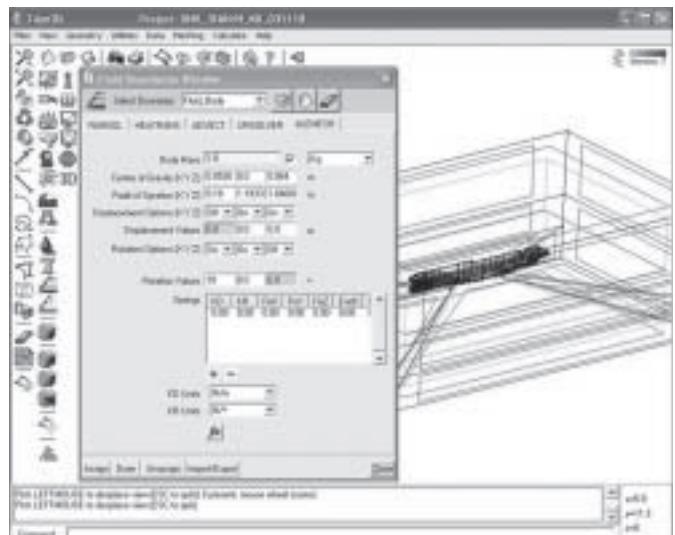


Figura 3.- Ventana de definición del movimiento del buque

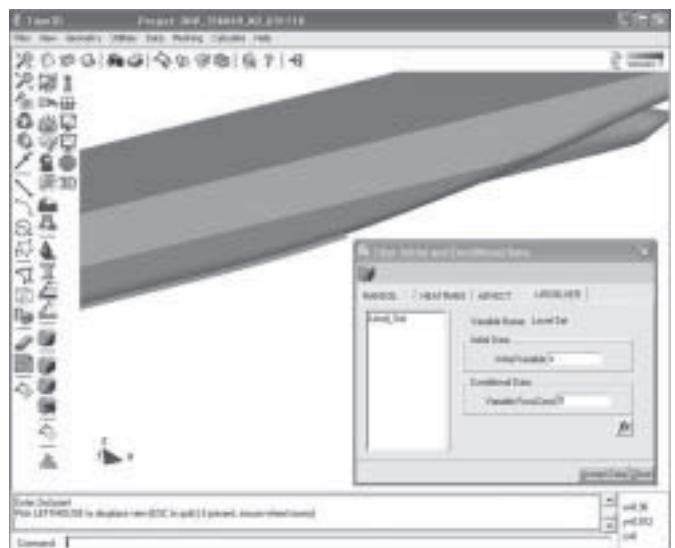


Figura 4.- Interfaz de Tdyn para la definición de la ecuación de superficie libre

ños variables que van desde unos centímetros hasta varios metros lejos del barco. La figura 5 muestra un detalle de la malla generada alrededor de la quilla de balance.

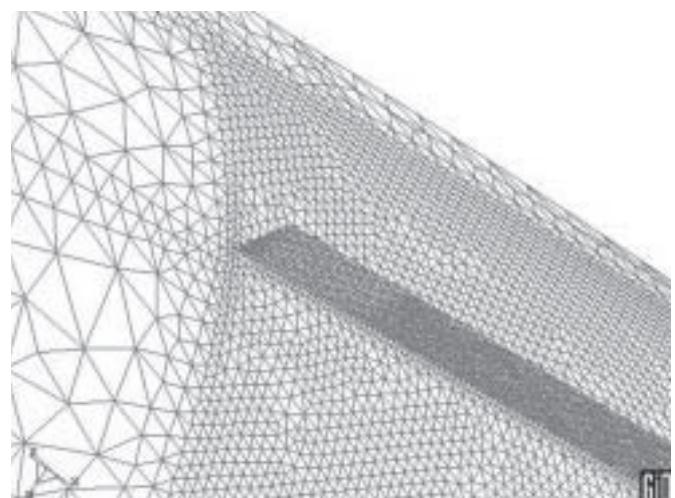


Figura 5.- Detalle de la malla generada alrededor de la quilla de balance

3.- Ejemplo de aplicación

En este apartado se presenta un ejemplo de aplicación de la técnica presentada. En concreto, el análisis de un barco portacontenedores en diferentes condiciones. Las características principales del barco analizado, cuya geometría se ha presentado en el apartado anterior, se muestran a continuación:

Desplazamiento para el calado de diseño	57.240 t
Radio de giro de balance	10,80 m
Radio de giro de cabeceo	71,60 m
Altura del metacentro transversal	1,32 m
Centro de gravedad:	
Desde la perpendicular de popa	136,80 m
Desde la línea base	15,00 m

Dos modelos del buque, uno a escala 1:60 y otro a escala 1:120 han sido analizados en canal de experiencias. El modelo a escala 1:120 no disponía de apéndices y ha sido ensayado en condiciones de movimiento forzado, para la frecuencia de resonancia, tanto en agua como en aire, mientras que el modelo a escala 1:60, disponía de quillas de balance, tal y como se muestra en la figura 6 y se ha ensayado con él un caso de movimiento de extinción del balance sin velocidad de avance.



Figura 6.- Modelo a escala 1:60. Disposición de las quillas de balance

Los tres ensayos a escala mencionados han sido utilizados para calibrar el modelo, en lo que se refiere al modelo de capa límite y campos de turbulencia iniciales.

En lo que se refiere a los ensayos numéricos, se han llevado a cabo un total de 56 ensayos, de los cuales 12 son bidimensionales, 26 son tridimensionales con movimiento forzado y el resto son ensayos tridimensionales de extinción. Los casos tridimensionales analizados corresponden tanto a la escala del modelo 1:60, como a la escala real del barco e incluyen las quillas de balance.

Esta es la lista con las características básicas de los casos analizados de movimiento forzado:

ID	Escala	Velocidad	Ángulo	Periodo	ID	Escala	Velocidad	Ángulo	Periodo
13	1:1	0 kn	10°	20 s	26	1:60	0 kn	10°	2,58 s
14	1:1	10 kn	2°	20 s	27	1:60	1,29 kn	2°	2,58 s
15	1:1	10 kn	2°	22 s	28	1:60	1,29 kn	2°	2,84 s
16	1:1	10 kn	10°	20 s	29	1:60	1,29 kn	10°	2,58 s
17	1:1	10 kn	10°	22 s	30	1:60	1,29 kn	10°	2,84 s
18	1:1	10 kn	30°	20 s	31	1:60	1,29 kn	30°	2,58 s
19	1:1	10 kn	30°	22 s	32	1:60	1,29 kn	30°	2,84 s
20	1:1	20 kn	2°	20 s	33	1:60	2,58 kn	2°	2,58 s
21	1:1	20 kn	2°	22 s	34	1:60	2,58 kn	2°	2,84 s
22	1:1	20 kn	10°	20 s	35	1:60	2,58 kn	10°	2,58 s
23	1:1	20 kn	10°	22 s	36	1:60	2,58 kn	10°	2,84 s
24	1:1	20 kn	30°	20 s	37	1:60	2,58 kn	30°	2,58 s
25	1:1	20 kn	30°	22 s	38	1:60	2,58 kn	30°	2,84 s

Para dar una idea del trabajo de análisis numérico, cada uno de los análisis representa un problema no lineal de más de 1.000.000 de grados de libertad (velocidades, presión y variables turbulentas) que tiene que ser resuelto varias veces (bucle no lineal) para cada paso de tiempo (unos 800 pasos por análisis para simular cuatro ciclos de balance). En resumen, cada uno de los 44 ensayos tridimensionales requiere invertir más de 1.000 veces un sistema de 1.000.000 de ecuaciones. Gracias a la optimización de la metodología es posible realizar este cálculo en menos de 4 horas en un PC estándar (Pentium IV). Esto permite reali-

zar toda la matriz de ensayos en una semana, o unos pocos días utilizando varios ordenadores en paralelo.

Los análisis de movimiento forzado fueron llevados a cabo rotando la geometría del barco alrededor de un eje longitudinal que pasa por el centro de gravedad del barco.

A continuación se incluye una lista, con las características básicas de los casos analizados de movimiento libre (problema de extinción):

ID	Escala	Velocidad	Ángulo	ID	Escala	Velocidad	Ángulo
39	1:1	0 kn	2°	48	1:60	0 kn	2°
40	1:1	0 kn	10°	49	1:60	0 kn	10°
41	1:1	0 kn	30°	50	1:60	0 kn	30°
42	1:1	10 kn	2°	51	1:60	1,29 kn	2°
43	1:1	10 kn	10°	52	1:60	1,29 kn	10°
44	1:1	10 kn	30°	53	1:60	1,29 kn	30°
45	1:1	20 kn	2°	54	1:60	2,58 kn	2°
46	1:1	20 kn	10°	55	1:60	2,58 kn	10°
47	1:1	20 kn	30°	56	1:60	2,58 kn	30°

Los análisis de movimiento libre fueron llevados a cabo con 4 grados de libertad.

Los diferentes análisis se han llevado a cabo con un modelo de turbulencia de 1 ecuación (modelo k), junto con una ley de pared logarítmica modificada. El valor de tracción resultante de la evaluación de esta ley de pared se ha calibrado para obtener los mismos resultados que en experimento de extinción disponible, tal y como se muestra en la figura 7.

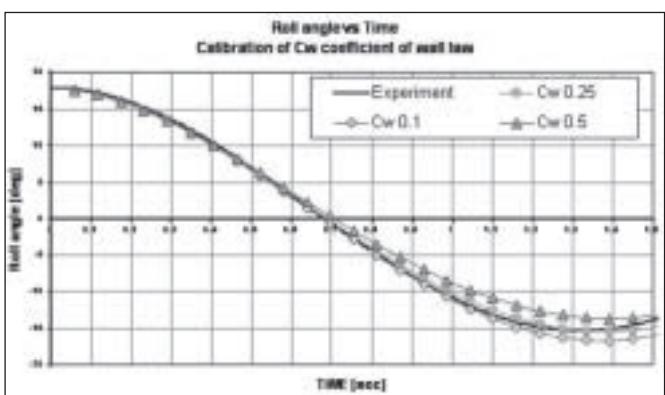


Figura 7.- Calibración del modelo de capa límite. Comparación de diferentes resultados, en función del parámetro de calibración de la ley de pared con el experimental

A continuación se muestran diversos resultados de los análisis llevados a cabo. La figura 8 muestra una comparación de los resultados, en cuanto a movimiento de balance y momento generado por los esfuerzos del fluido ($\langle ij \rangle$) en cuatro ensayos correspondientes a la escala 1:1, en movimiento forzado (30° de amplitud) y con variaciones tanto en la velocidad de avance del buque como en el periodo del movimiento. Como puede apreciarse hay una variación significativa (en torno al 40 %) en la amplitud del momento generado por los esfuerzos del fluido, entre los dos períodos estudiados (el periodo de resonancia se considera aproximadamente en 22 s).

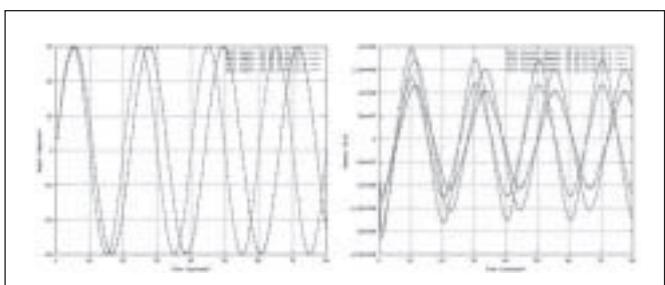


Figura 8.- Análisis del efecto de variación del periodo de balance. Escala 1:1

De manera similar, la figura 9 muestra los resultados del momento debido a las fuerzas de presión y a los esfuerzos del fluido, correspondientes al mismo ensayo anterior pero para el modelo a escala 1:60. En este caso, las variaciones en la amplitud del momento generado por los esfuerzos del fluido son importantes, pero más pequeñas que en el caso anterior.

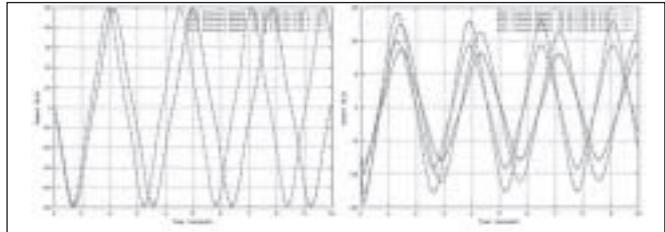


Figura 9.- Análisis del efecto de variación del periodo de balance. Escala 1:60

La figura 10 muestra una comparación de los resultados, en cuanto a movimiento de balance y momento de presión en tres casos correspondientes a la escala 1:1, para el ensayo de extinción, con 10° de amplitud inicial y con diferentes velocidad de avance del buque. Como puede apreciarse hay una variación significativa en el amortiguamiento del movimiento, provocada por la velocidad de avance del buque.

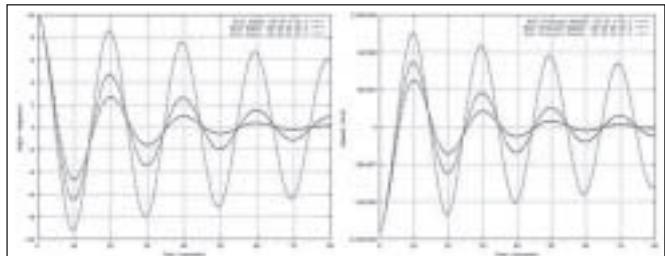


Figura 10.- Análisis del efecto de la velocidad de avance del barco sobre el movimiento de balance. Amplitud inicial 10°. Modelo a escala 1:1

Por su parte, la figura 11 corresponde a un caso similar al anterior, pero con una amplitud inicial de 30°. Los resultados que se muestran corresponden a los momentos debidos a las fuerzas de presión y a los esfuerzos del fluido.

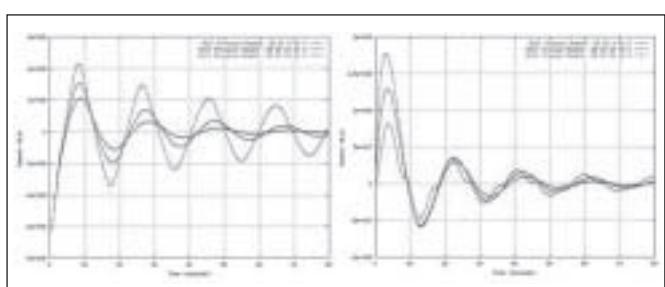


Figura 11.- Análisis del efecto de la velocidad de avance del barco sobre el movimiento de balance. Amplitud inicial 30°. Modelo a escala 1:1

En el presente estudio, se llevó asimismo a cabo un análisis simple de la sensibilidad del análisis, ante cambios de la malla. Para ello se regeñró la malla de análisis, refinándola alrededor de la quilla de balance. La malla resultante tiene unos 1,2 millones de elementos tetraédricos, un 20% más que la original. Los resultados de la comparación de los análisis para las dos mallas, para el caso 44, se muestran en la figura 12. Como puede apreciarse, las diferencias, en lo que se refiere al movimiento y momentos debidos a las fuerzas de presión y a los esfuerzos del fluido, son insignificantes.

Finalmente, la figura 13 muestra varias imágenes de resultados de los mapas de velocidad en el cuerpo cilíndrico y popa del buque, durante el proceso de cálculo. En los cortes por cuadernas, que se muestran transparentes en las imágenes, pueden apreciarse diferentes fenómenos de interés, como la aparición y la separación de vórtices en el pantocazo del buque.

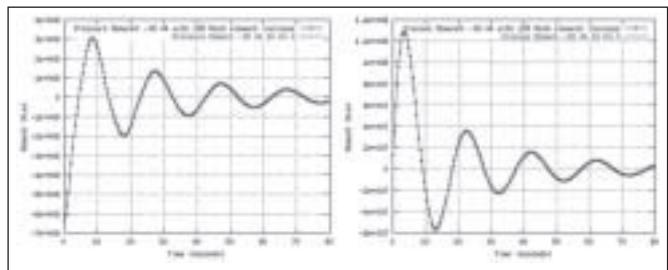


Figura 12.- Análisis de sensibilidad a la malla. Efecto sobre el momento de presión y de esfuerzos viscosos

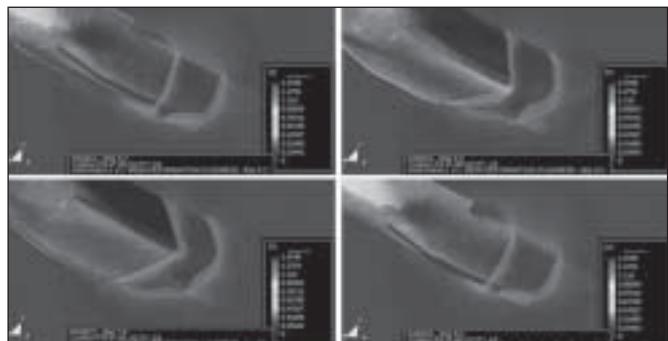


Figura 13.- Mapa de velocidades durante el análisis del problema de extinción del movimiento de balance de un barco portacontenedores

4.- Conclusiones

En el presente artículo se ha presentado un resumen del trabajo desarrollado para el análisis de problemas de interacción fluido-estructura en buques. Este método ha sido probado para el análisis de problemas de extinción del movimiento de balance de buques reales. Los resultados obtenidos dan validez a la aplicación del método para este tipo de análisis y prueban su utilidad práctica. Los desarrollos se han comprobado útiles, no sólo para la simulación del balance del buque, sino para la simulación de otros problemas de interacción fluido estructura con superficie libre como el pantocazo o las green waters.

5.- Referencias

- E. Oñate, J. García and S. Idelsohn, *Computation of the stabilization parameter for the finite element solution of advective-diffusive problems with sharp gradients*, Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 25, pp. 1385-1407 (1997).
- E. Oñate, J. García and S. Idelsohn, *An alpha adaptive approach for stabilized finite element solution of advective-diffusive problems with sharp gradients*, New Adv. In adaptive Comp. Met. In Mech., P. Ladeveze and J.T. Oden (Eds.), Elsevier (1998).
- J. García-Espinosa, M. López, E. Oñate, R. Luco, *An Advanced Finite Element Method for Fluid Dynamic Analysis of America's Cup Boats*, Proceedings of HPYD Conference (RINA), Auckland (New Zealand) 2002.
- J. García-Espinosa, J.M. González, J. García Peláez, J. González, G. Romero, F. Guarido, and F. Mata, *Un método estabilizado para análisis de flujo incompresible incluyendo superficie libre: Aplicación a geometrías navales*. SITT Ingeniería Naval, Cartagena, Spain (1999).
- J. García-Espinosa, E. Oñate y H. Sierra, *Un Método de Elementos Finitos para Análisis Hidrodinámico de Estructuras Navales*, CIMNE (ISBN 84-89925-75-5), Barcelona (Spain) 2000
- R. Codina, *Pressure stability in fractional step finite element methods for incompressible flows* Jnl. Comp. Phys., Vol. 170, 112-140. (2001)
- J. García-Espinosa, E. Oñate, *Un método de elementos finitos para análisis del problema de extinción del balance* Métodos Numéricos en Ingeniería (Proceedings of APMTAC 2004), Lisboa (Portugal) Abril 2004.
- O. Soto, R. Codina. *A numerical model for mould filling using a stabilized finite element method and VOF technique*. Int. Jnl. Num. Meth. Fluids. (2000)
- Hirt, C.W., Amsden, A.A., Cook, J.L., *An Arbitrary Lagrangian- Eulerian Computing Method for All Flow Speeds*, Journal of Comp. Physics, 14, 227-253 (1974)