

**CUARTO PREMIO DURAN I FARRELL DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA**

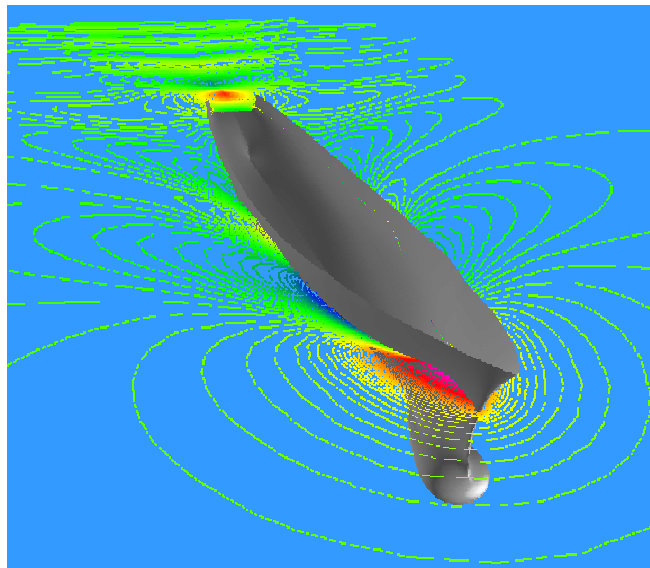
**PRESENTACIÓN DEL PROYECTO**

**“DESARROLLO DEL CÓDIGO DE ELEMENTOS FINITOS  
TDYN PARA ESTUDIO DE LA HIDRODINÁMICA DE  
BARCOS. APLICACIONES AL DISEÑO DE VELEROS DE LA  
COPA AMÉRICA”**

**Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra** (Investigador Principal)  
Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería, UPC

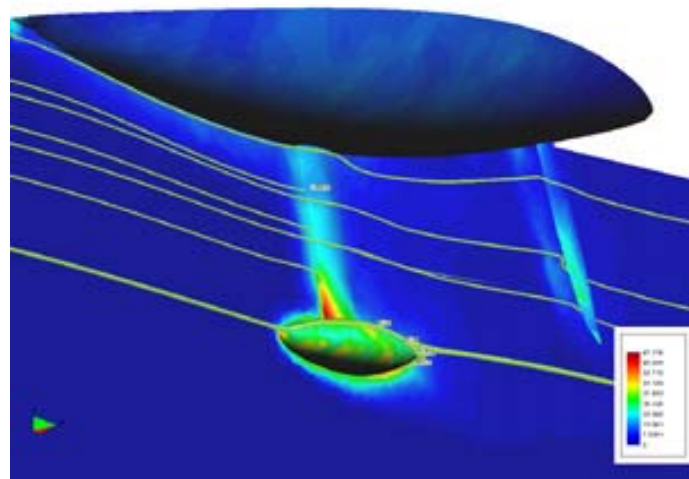
**Julio García Espinosa**  
Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas, UPC

Organismos colaboradores  
**Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)**  
**Compass Ingeniería y Sistemas, S.A.**



## PRESENTACIÓN

En los últimos años CIMNE ha desarrollado en colaboración con la empresa COMPASS Ingeniería y Sistemas, S. A. ([www.compassis.com](http://www.compassis.com)) un nuevo código de cálculo basado en el método de los elementos finitos para el estudio fluido-dinámico de embarcaciones. El código permite reproducir de forma virtual con fidelidad el denominado “Canal de Ensayos Hidrodinámicos” (CEH) utilizado regularmente para la evaluación experimental de la resistencia hidrodinámica de barcos. El nuevo código, denominado TDYN, es una alternativa a mucho más económica y precisa a los ensayos en el CEH, al permitir analizar el comportamiento de barcos en el agua a escala real, eliminando así los errores de escala usuales en los ensayos experimentales. TDYN incorpora nuevos modelos matemáticos y métodos de elementos finitos avanzados que han llevado a término numerosas publicaciones internacionales. TDYN se desarrolló conjuntamente por investigadores de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) del Depto. de Resistencia de Materiales y Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona y del Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas de la Facultat de Náutica de Barcelona en el marco de diversos proyectos europeos y nacionales llevados a término en colaboración con CIMNE y la empresa COMPASS, además de otras empresas de prestigio en el sector naval. TDYN se aplicó al diseño de diversos veleros de la Copa América (en particular por el equipo del barco ALINGHI ganador de la edición de 2003). TDYN lo comercializa actualmente en todo el mundo la empresa COMPASS, una spin-off de la UPC.



Cálculo hidrodinámico con TDYN del barco Bravo España  
(Copa América 1999)

## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO TDYN

### Objetivos

El objetivo del proyecto es el desarrollo de un código de simulación por ordenador para prever con precisión las fuerzas hidrodinámicas que se producen en el agua en un barco en movimiento. El conocimiento de estas fuerzas es esencial para el diseño óptimo de las formas del casco y de la maquinaria del barco.

El nuevo código denominado TDYN es una alternativa a los ensayos experimentales para conocer el comportamiento hidrodinámico de embarcaciones.

Hasta hace muy poco, la predicción de las mencionadas fuerzas hidrodinámicas únicamente podía hacerse en costosos ensayos experimentales en Canales Hidrodinámicos. Estos ensayos, típicos en la etapa de diseño de los barcos, consisten en el arrastre de un modelo reducido del barco de forma controlada en un canal, y la medición de las fuerzas del agua en puntos del casco. Mediante un proceso de escala, las fuerzas sobre el modelo permiten conocer una estimación de las fuerzas hidrodinámicas del barco a escala real. Este proceso de escalado presenta muchas incertidumbres y errores debido a la no linealidad de las ecuaciones de la dinámica de fluidos.

El código de cálculo TDYN desarrollado en este proyecto es una alternativa más económica y fiable que los ensayos en Canales Hidrodinámicos, al permitir reproducirlos a *escala real*, eliminando los errores del proceso de escalado. Una vez calibrado el código con resultados de los ensayos experimentales obtenidos en modelos reducidos TDYN, puede utilizarse de forma rutinaria para conocer con precisión el comportamiento hidrodinámico de barcos.

### Relevancia científica

El código TDYN incorpora avances muy importantes en modelos de cálculo por el método de los elementos finitos para resolver las ecuaciones de la fluido-dinámica de un barco. En particular se destacan los siguientes avances científicos llevados a término durante el desarrollo del proyecto:

- 1) Nueva formulación de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido viscoso (ecuaciones de Navier-Stokes) incorporando métodos de estabilización de la solución numérica mediante la técnica del “cálculo finito” desarrollada por los Drs. E. Oñate y J. García [refs. 1-4, 6-8]
- 2) Método original para incluir los efectos de superficie libre a las ecuaciones de Navier-Stokes basado en la mencionada técnica de cálculo finito desarrollada por E. Oñate y J. García [6, 7].
- 3) Nuevo algoritmo de pasos fraccionados para la solución por el método de los elementos finitos de las ecuaciones hidrodinámicas de un barco teniendo en cuenta los efectos de interacción fluido-estructura. La consideración de estos efectos permite estudiar con precisión el movimiento del barco durante su interacción con el fluido [3].
- 4) Nuevos procedimientos para el tratamiento de las zonas de “separación” del fluido con relación al casco en el estudio de la hidrodinámica de barcos. Estas zonas presentan altos

gradientes de la velocidad y precisan de métodos numéricos especiales como los desarrollados por los Drs. E. Oñate y J. García [2, 6-8].

- 5) Nuevos algoritmos para la generación de mallas y la visualización de resultados en problemas de hidrodinámica de barcos. Se destaca que estos problemas son inherentemente tridimensionales y que su solución exige necesariamente la utilización de discretización es tridimensionales con mallas del orden del millón de elementos finitos tetraédricos [6-8].

### **Relevancia técnica**

Se destaca el trabajo llevado a término por el equipo proponente en la integración de los distintos métodos de cálculo mencionados, en un único código de cálculo (el código TDYN) para el análisis de la hidrodinámica de barcos de forma sencilla.

Este trabajo de integración ha significado el enlace de los nuevos códigos de cálculo por elementos finitos con potentes pre/post procesadores que facilitan las tareas de preparación de datos y de visualización gráfica de los resultados del cálculo. En esta tarea se utilizó el sistema de pre/post proceso GiD desarrollado por investigadores del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Se destaca que GiD recibió el Premio Ciutat de Barcelona de Innovación Tecnológica en 2003 y el IST Award de la CE en 2002.

El código TDYN es desde Abril de 2003 una herramienta totalmente operativa a escala industrial. Este código lo comercializa en todo el mundo la empresa COMPASS Ingeniería y Sistemas S.A. ([www.compassis.com](http://www.compassis.com)). Esta empresa es una spin-off de la UPC a través del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) que participa en la misma en un 30%.

Durante el año 2003 el código tuvo continuas adaptaciones o mejoras que lo convierte en uno de los códigos más avanzados del mundo para el análisis hidrodinámico de barcos.

### **Relevancia económica**

El código TDYN permite realizar análisis hidrodinámicos de embarcaciones a *escala real*, cosa imposible de efectuarse en los Canales de Ensayos Hidrodinámicos. En España existe un solo canal de este tipo en Madrid, el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, de 30 x 300 m. que únicamente permite realizar ensayos a escala reducida (típicamente  $\frac{1}{4}$  para barcos deportivos y  $\frac{1}{15} - \frac{1}{25}$  para barcos comerciales). Estos ensayos son muy caros, tanto por los costes de realización del modelo a escala como por la realización del ensayo y el complejo proceso de tratamiento e interpretación de los resultados. Mediante la utilización de TDYN se consiguen, por tanto, importantes ahorros en la etapa del diseño de embarcaciones.

El código TDYN también es aplicable a muchos otros problemas de fluido-dinámica de interés industrial, tanto en el campo de la ingeniería naval (análisis de estructuras off-shore, análisis de tuberías al mar, etc.) como en el de la ingeniería civil (estudio fluidodinámico de puentes y de puertos, problemas medio ambientales) y la aeronáutica (aerodinámica de aviones) entre otras.

## APLICACIONES PRÁCTICAS DE TDYN

El código TDYN se aplicó con éxito los últimos años (tanto durante la fase de desarrollo como en la más industrial) al análisis hidrodinámico de distintos barcos.

### Etapa de desarrollo

Durante la etapa de desarrollo (1999-2003), TDYN (entonces denominado SHYNE, nombre que se dio a la versión de investigación del código) se aplicó al análisis hidrodinámico de barcos propuesto por la empresa naval española BAZAN (actualmente IZAR). Estos análisis se realizaron en el marco de los proyectos europeos SHEAKS y FLASH liderados por BAZAN en los que participaba el grupo propuesto (ver referencias de proyectos europeos en el apartado siguiente).

También se aplicó la versión prototipo de TDYN (obtenida a partir de desarrollos del código de investigación SHYNE) al análisis de barcos de la Copa América Rioja de España y Bravo España a propuesta de la empresa Copa América Desafío Español S.A.

En todos estos casos se dispuso de resultados experimentales obtenidos en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo. Con estos resultados se calibraron los modelos de cálculo TDYN hasta convertirlo en un código preciso y robusto.

### Etapa de industrialización

La primera versión industrial de TDYN, finalizada en otoño del 2002 se aplicó con éxito al análisis de embarcaciones de vela que participaron en la Copa América 2004. Estos barcos fueron el GBR (patrocinado por el Sindicato de Copa América Británico) y el Alinghi (patrocinado por el Sindicato Suizo). Los análisis fueron realizados por personal técnico de los Sindicatos mencionados, que adquirieron TDYN con la colaboración de la empresa COMPASS.

Como es bien sabido el **barco Alinghi ganó la Copa América 2003**. Actualmente se está negociando la utilización de TDYN por parte de diversos Sindicatos que participaran en la próxima edición de la Copa América que tendrá lugar en España (en Valencia) en el año 2007.

### Comercialización de TDYN

Como ya se ha comentado en apartados precedentes, TDYN se comercializa en todo el mundo, desde Abril de 2003, por la empresa COMPASS Ingeniería y Sistemas SA ([www.compassis.com](http://www.compassis.com)). Esta empresa creada en 2002 es una *Spin-off* de la UPC. Además de su aplicación intensiva a problemas de ingeniería naval, área en la que TDYN es uno de los códigos más competitivos, TDYN se aplica de manera cotidiana para la solución de problemas de dinámica de fluidos en áreas muy diversas de la ingeniería aeronáutica, mecánica y civil, entre otras. Entre las aplicaciones recientes más destacadas de TDYN cabe mencionar el análisis hidrodinámico de veleros (ver el último ejemplo de este documento), el estudio aerodinámico de aviones y vehículos automotores, problemas de aerodinámica interna (ventilación, climatización, etc.) y problemas de interacción fluido-estructura.

## FONDOS ECONÓMICOS DEL PROYECTO

El proyecto de desarrollo de TDYN se llevó a cabo con fondos provenientes de los siguientes proyectos europeos y nacionales. El presupuesto se refiere a la parte desarrollada por el grupo de los Profs. E. Oñate y J. García.

### **SHEAKS, “Development of a computer based system for enhanced sea-keeping and structural ship design”**

Programa: BRITE/EURAM

Ref.: BRPr-CT97-0605

Organismo/Entidad Financiadora: CEE

Fecha de inicio: 1/12/1997

Fecha final: 15/2/2001

Presupuesto del grupo (€)	472.000
---------------------------	---------

### **FLASH, “HPCN tools for enhanced hydrodynamic design of fast ships on parallel computing platforms”**

Programa: ESPRIT

Ref.: EP-24903

Organismo/Entidad Financiadora: CEE

Fecha de inicio: 15/10/1997

Fecha final: 15/01/2001

Presupuesto del grupo (€)	398.118
---------------------------	---------

### **FANTASTIC, “Functional design and optimisation of ship hull forms”**

Programa: GROWTH

Ref.: G3RD-CT-2000-00096

Organismo/Entidad Financiadora: EUROPEAN COMMISSION

Fecha de inicio: 1/07/2000

Fecha final: 30/06/2003

Presupuesto del grupo (€)	354.006
---------------------------	---------

### **EXPRO-CFD, “Computational fluid dynamics for offshore exploration and production platforms”**

Programa: GROWTH

Ref.: G3RD-CT-2000-00308

Organismo/Entidad Financiadora: European Commission

Fecha de inicio: 1/02/2001

Fecha final: 31/01/2004

Presupuesto del grupo (€)	143.063
---------------------------	---------

**MARNET-CFD, “A Thematic Network in computational fluid dynamics for the Marine Industry”**

Programa: BRITE

Ref.: brrt-ct98-5058

Organismo/Entidad Financiadora: EUROPEAN COMMISSION

Fecha de inicio: 1/10/1998

Fecha final: 30/09/2001

Presupuesto del grupo (€)	15.750
---------------------------	--------

**DISVEL, “Sistema automatizado de diseño y fabricación de embarcaciones deportivas”**

Programa: ATYCA

Ref.: P0316/1997

Organismo/Entidad Financiadora: M° DE INDUSTRIA Y ENERGIA

Fecha de inicio: 24/10/1997

Fecha final: 31/12/1999

Presupuesto del grupo (€)	28.954
---------------------------	--------

**SABOR, “Sistema experto integrado para determinar las consecuencias medio-ambientales y de seguridad del abordaje entre buques**

Programa: ATYCA

Ref.: P54/1997

Organismo/Entidad Financiadora: M° DE INDUSTRIA Y ENERGIA

Fecha de inicio: 24 10 1997

Fecha final: 31 12 2000

Presupuesto del grupo (€)	150.000
---------------------------	---------

Además se contó con financiación del Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), de la empresa COMPASS, principalmente para las fases finales de personalización e industrialización de TDYN.

El coste total estimado del desarrollo del código TDYN desde su inicio en 1997 hasta la finalización de la última versión industrial del código en Abril de 2003 fue de unos 800.000 €.

Destacamos finalmente que el desarrollo del código TDYN es un proceso continuado. Actualmente se continúan en la UPC y en CIMNE los desarrollos de métodos numéricos más avanzados para mejorar aspectos como la modelización más precisa de los efectos de la turbulencia, la reproducción de fenómenos de rotura de olas y de entrada de agua en el interior del barco (fenómeno de green-water) y la mejora general de la eficiencia computacional de manera que puedan ser utilizadas mallas de algunos millones de elementos finitos en tiempos razonables (menos de un hora de CPU para un cálculo hidrodinámico tridimensional). Esto permitirá utilizar TDYN con efectividad para la optimización de formas de barcos, lo que requiere realizar numerosos cálculos hidrodinámicos sucesivos de forma automática hasta que se encuentre la forma óptima.

## CONGRESO MARINE 2005

Los Drs. E. Oñate y J. García son co-organizadores del primer Congreso sobre “Computational Methods in Marine Engineering” (MARINE 2005) que tendrá lugar en Oslo del 27 al 29 de Junio de 2005. El congreso se organiza conjuntamente con el Dr. Pal Bergan (Director de I+D de la empresa Det Norske Veritas [DNV]) y el Dr. Trond Kvamsdal (Investigador de SINTEF). En este congreso se presentarán aplicaciones de TDYN.

La empresa DNV es una de las principales del mundo en el ámbito de la clasificación de barcos y de la consultoría en ingeniería naval y off-shore. El SINTEF es el organismo principal de I+D de Noruega y agrupa unos 6.000 investigadores.

La organización del congreso es el resultado de la colaboración entre los Drs. E. Oñate y J. García, la empresa DNV y SINTEF. Esta colaboración se tradujo en la realización conjunta de numerosos proyectos de I+D en los que se utilizaron versiones de TDYN.

Está previsto que la segunda edición del congreso se haga en la Universidad Politécnica de Catalunya el 2007, año en que la Copa América tendrá lugar en València.

Se adjunta un folleto con información del congreso MARINE 2005.

## REFERENCIAS

### *Capítulos en Libros*

#### **1. Oñate E., García J. and Idelsohn S.**

An alpha-adaptive approach for stabilized finite element solution of advective-diffusive problems with sharp gradients

*New Advances in Adaptive Computational Methods in Mechanics*

P. Ladeveze and J.T. Oden (Eds.), Elsevier, 1998

#### **2. Oñate E. and García J.**

A finite element method for fluid-structure interaction with surface waves

*Trends in Computational Structural Mechanics*

W. A. Wall, K.-U. Bletzinger and K. Schweizerhof (Eds.), CIMNE, Barcelona, Spain 2001

#### **3. Oñate E., García J., Bugeda G. and Idelsohn S.R.**

A general stabilized formulation for incompressible fluid flow using finite calculus and the finite element method

*Towards a New Fluid Dynamics with its Challenges in Aeronautics*

J. Périaux, M. Champion, B. Stoufflet, J.J. Gagnepain, Ph. Thomas and O. Pironneau (Eds.), CIMNE, Barcelona, Spain, 2002



### ***Artículos en Revistas***

**4. Oñate E., García J. and Idelsohn S.**

Computation of the stabilization parameter for the finite element solution of advective-diffusive problems

*International Journal for Numerical Methods in Fluids*

Vol. 25, pp. 1385-1407, 1997

**5. López Rodríguez M., García Espinosa J. y Oñate E.**

Optimización de embarcaciones de recreo mediante la utilización de un código CFD

*Ingeniería Naval*

No. 784, pp. 122-130, 2001

**6. Oñate E. and García J.**

A finite element method for fluid-structure interaction with surface waves using a finite calculus formulation

*Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*

Vol. 191, Issue 6-7, pp. 635-660, 2001

**7. García Espinosa J. and Oñate E.**

An unstructured finite element solver for ship hydrodynamics problems

*Journal of Applied Mechanics*

Vol. 70, pp. 18 - 26, January 2003

**8. Oñate E., García J. and Idelsohn S.R.**

Ship hydrodynamics

To be published in *Encyclopedia of Computational Mechanics*, E. Stein, R. de Borst and T.J.R. Hughes (Eds.), John Wiley & Sons Ltd, 48 pp., 2004

### ***Artículos en Actas de Congresos***

**9. Oñate E. and García J.**

A stabilized finite element method for analysis of fluid-structure interaction problem involving free surface waves

Proceedings of the International Symposium on Computational Methods for Fluid-Structure Interaction (FSI'99)

T. Kvamsdal et al (Eds.), Trondheim, Norway, pp. 163 - 176, 15 - 17 February, 1999

**10. García Espinosa J. y Oñate E.**

Un método estabilizado para análisis de problemas de interacción fluido estructura con superficie libre  
Congreso sobre Métodos Numéricos en Ingeniería, Sevilla, 7-10 Junio 1999

R. Abascal, J. Domínguez y G. Bugada (Eds.), Semni, 1999

**11. Oñate E. and García Espinosa J.**

A methodology for analysis of fluid structure interaction accounting for free surface waves

European Conference on Computational Mechanics (ECCM'99)

August 31 - September 3, München, Germany, 1999

**12. Oñate E. and García J.**

A stabilized finite element method for incompressible flow using a finite increment calculus formulation

European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2000), Barcelona, 11-14 September 2000



**13. Oñate E. and García J.**

A finite element method for fluid-structure interaction with surface waves  
European Conference on Computational Mechanics (ECCM 2001)  
Cracow, Poland, June 26-29, 2001

**14. Oñate E. and García J.**

Finite element analysis of incompressible flows with free surface waves using a finite calculus formulation  
ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conference (ECCOMAS CFD 2001)  
Swansea, Wales, UK, 4-7 September 2001

**15. Alonso-Pardo B., García Espinosa J., Papanikolaou A., Pérez de Lucas A. and Oñate E.**

Sheaks project: A development and experimental validation of numerical methods for seakeeping analysis  
International conference on Applied Simulation and Modelling (ASM 2002)  
Crete, Greece, June 25-28, 2002

**16. García J. and Oñate E.**

Advances in the finite element analysis of ship hydrodynamics problems  
Fifth World Congress on Computational Mechanics (WCCM V)  
H. A. Mang et al (Eds.), Vienna, Austria, July 7 - 12, 2002

**17. García Espinosa J., Luco-Salman R., López-Rodríguez M. and Oñate E.**

An advanced finite element method for fluid-dynamic analysis of America's cup boat  
Presented at the High Performance Yatch Design Conference  
Auckland, 4 - 6 December, 2002

**18. García Espinosa J. and Oñate E.**

Fluid dynamic analysis of America's Cup boats including dynamic sinkage and trim effects  
Marnet-CFD Workshop  
Portsmouth, UK, 20-21 March 2003

**19. García-Espinosa J., Oñate E. and Helmers J.B.**

Un método FEM para el análisis de la extinción del movimiento de balance  
Congresso sobre Métodos Computacionais em Engenharia  
Lisboa, Portugal, 31 de Maio – 2 de Junho, 2004