

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE AGITACION POR OLAJE EN UN PUERTO  
MEDIANTE SIMULACION NUMERICA

Miguel A. Cavaliere, Angel M. Menéndez, Roberto Castellano  
Laboratorio de Hidráulica Aplicada - I. N. C. y T. R.  
Casilla de Correo 21. 1802 Aeropuerto Ezeiza, Argentina

RESUMEN

Se describe una aplicación del sistema computacional DIFRAC para estudiar las condiciones de agitación por oleaje dentro de un puerto, teniendo en cuenta el efecto combinado de difracción, refracción y reflexión de las olas. Se presentan resultados para la amplitud y dirección de propagación del oleaje en su interior y de las condiciones de resonancia en las distintas dársenas del puerto.

ABSTRACT

An application of the computational model DIFRAC for the study of wave conditions inside a harbor is described. It takes account of the combined effect of diffraction, refraction and reflection of waves. Results for wave amplitude and wave front propagation direction into the harbor are presented, together with an analysis of resonance conditions for the different docks.

INTRODUCCION

Un puerto constituye un área de aguas calmas no sólo para garantizar la permanencia en amarra de las embarcaciones bajo adecuadas condiciones de seguridad, sino además para permitir las operaciones que éstas deban realizar : embarque de pasajeros, manipuleo de cargas, abastecimiento, reparación, mantenimiento, etc.

En zonas expuestas a la acción del oleaje, es habitual que se deba recurrir a la construcción de estructuras de protección que limiten su penetración al puerto. Las dimensiones y orientación del acceso al puerto surgen de una solución de compromiso entre las facilidades requeridas por las embarcaciones para acceder al puerto y la energía de oleaje máxima admisible dentro del espejo de agua protegido. La construcción de estas estructuras (obras de abrigo) tiene, habitualmente, una importante incidencia en el costo total del puerto, afectando la rentabilidad en el caso de tratarse de un puerto comercial. Proteger en exceso supone inversiones iniciales innecesariamente altas; por el contrario, proteger en defecto significa costos operativos elevados.

Para la depuración de un proyecto portuario, específicamente en lo que se refiere a protección del oleaje, el ingeniero hidráulico ha recurrido tradicionalmente a los modelos hidráulicos, es decir, a la simulación física del problema en escala reducida. Mediante esta técnica el ingeniero proyectista tiene la posibilidad de

"ver" cómo las obras interactúan con el oleaje, facilitándole la interpretación de la compleja hidrodinámica, originada en la coexistencia de los fenómenos de difracción, refracción y reflexión, y la formulación de diagnósticos y propuestas de soluciones. La principal dificultad con la simulación física es su alto costo en infraestructura (superficies cubiertas del orden de 500 a 1000 m<sup>2</sup>, equipo para generación de olas, instrumentación electrónica específica para la adquisición de datos), implementación (costo de construcción) y operación (energía eléctrica, personal auxiliar). Además, para escalas del orden de 1:150 a 1:200 los efectos de escala comienzan a distorsionar los resultados.

Estos inconvenientes, sumados a la reciente formulación de modelos teóricos confiables de agitación por oleaje, el persistente incremento de la potencia de cálculo de las computadoras, a costos cada vez menores, y los avances en los métodos de resolución numérica de ecuaciones diferenciales y de las técnicas de visualización de resultados, han colocado a la simulación numérica en una posición ventajosa tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En este trabajo se presenta un estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto deportivo a construirse en Punta del Este (Uruguay). El objetivo es ilustrar el alcance de este tipo de modelos desde un punto de vista práctico.

#### MODELO NUMERICO

El estudio se realizó con el sistema computacional DIFRAC, desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LHA) del INCYTH. Este modelo permite simular el efecto combinado de refracción, difracción y reflexión de olas, tal como se presenta en los recintos portuarios. Sus detalles técnicos ya han sido expuestos en oportunidades anteriores [1,2]. En lo que sigue se presenta solo una breve reseña.

La formulación matemática del problema de agitación se basa en la teoría lineal de ondas de pequeña amplitud de tipo armónico y en la hipótesis de que la pendiente del fondo es suave [3]. Bajo esas condiciones, el potencial (complejo) plano de velocidades  $\Phi$ , reducido al nivel medio del agua, satisface la ecuación

$$\nabla \cdot \left[ \alpha \nabla \Phi \right] + \kappa^2 \alpha \Phi = 0 \quad (1)$$

donde  $\alpha$  es el producto de las celeridades de fase y de grupo y  $\kappa$  un coeficiente de modulación vertical de la amplitud de oscilación, relacionado a la frecuencia mediante una relación de dispersión.

La amplitud  $A$  del oleaje puede calcularse a partir del potencial plano reducido a través de la siguiente expresión

$$A = \frac{\omega}{g} |\Phi| \quad (2)$$

donde  $\omega$  es la pulsación de la ola y  $g$  la aceleración de la gravedad

La ecuación (1), conocida como Ecuación de Berkhoff, ha sido exhaustivamente verificada en su capacidad de simular adecuadamente el fenómeno de agitación [2,4]. En particular, Booij [5] analizó su comportamiento en problemas con pendientes relativamente fuertes, comparando sus resultados con un modelo tridimensional, y obtuvo acuerdos satisfactorios a pesar de apartarse de una de las hipótesis básicas de la formulación.

Los contornos físicos del recinto portuario pueden comportarse como totalmente reflejantes o parcialmente absorbentes. Estos últimos representan estructuras en las cuales hay disipación de energía, tales como rompeolas, escolleras de enrocado, etc.

El puerto se comunica, a través de su entrada, con el mar, que constituye un dominio "infinito" donde se superponen el oleaje incidente y el de "scattering", resultante de la acción reflejante y difractante del conjunto de estructuras que componen el puerto. El potencial de "scattering" debe satisfacer la condición de radiación de Sommerfeld.

Con vistas a su resolución numérica, el dominio del problema es dividido en una región interior finita, donde se concentran todos los contornos físicos relevantes, y una región exterior infinita. En la primera es posible reemplazar la formulación diferencial por una variacional. Para la región exterior, en cambio, puede adoptarse una formulación integral indirecta en términos de una distribución de fuentes, lo cual trae como ventaja la posibilidad de resolver el problema exterior solo sobre el contorno matemático de separación de ambas regiones, denominado frontera de radiación.

En base a esta reformulación del problema, es natural adoptar el método de los elementos finitos para la zona interior y el método de los elementos de contorno para la zona exterior.

#### DESCRIPCION DEL PUERTO

El proyecto estudiado corresponde a una marina a construirse, sobre el litoral atlántico de la República Oriental del Uruguay, destinada al amarre de embarcaciones deportivas. Este estudio fue efectuado por el LHA a requerimiento de la consultora LATINOCONSULT S.A. [6].

En la Figura 1 se presenta un esquema del puerto y se identifican distintas zonas. El acceso desde el mar se logra a través de un canal de navegación de aproximadamente 300 metros de longitud, a cuyos lados se desarrollan dos escolleras de enrocado. La distribución general de las zonas de amarre es de tipo ramificada, distinguiéndose cuatro dársenas (A, B, C, D) y dos canales (zonas E a I). La profundidad en toda la marina es constante, salvo en el canal de acceso. La sección transversal del canal es de tipo trapezoidal, con taludes laterales suaves.

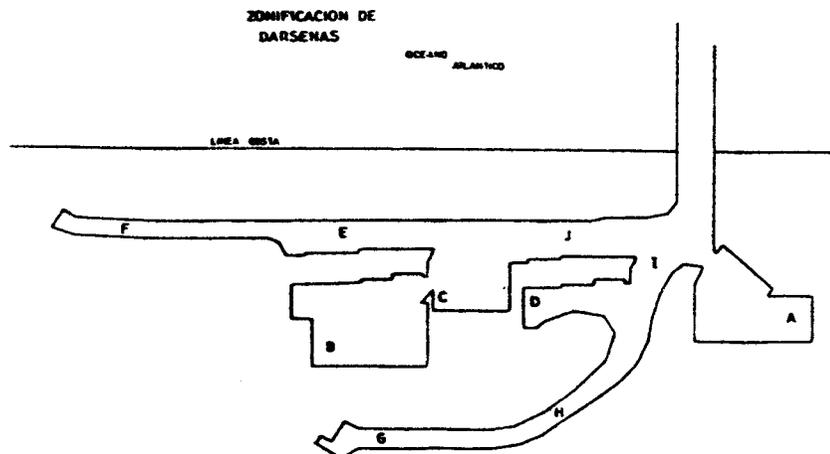


Figura 1 : Esquema del puerto

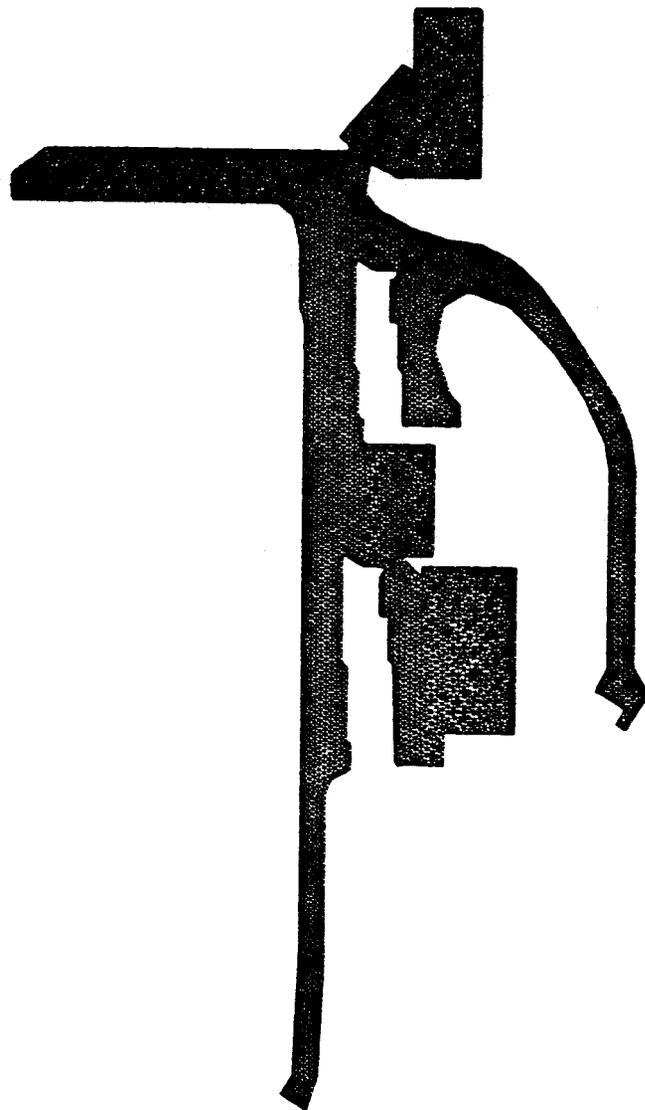


Figura 2 : Malla de elementos finitos

#### IMPLEMENTACION DEL MODELO

La frontera de radiación, que separa las zonas interior y exterior, se ubicó en la boca del canal de acceso, uniendo a las dos escolleras. La mayor parte de las paredes internas de la marina están constituidas por un tablestacado vertical que, desde el punto de vista hidrodinámico constituye, un contorno impermeable sobre el cual el oleaje se refleja totalmente. El tratamiento de estos contornos resultó, entonces, trivial dado que constituyen una condición de borde de tipo natural. Las escolleras y las zonas protegidas con taludes inclinados se trataron como contornos parcialmente absorbentes, con coeficientes de absorción determinados por el proyectista de la obra.

La malla de elementos finitos, mostrada en la Figura 2, fue generada en forma automática, a partir de la planimetría del contorno del puerto, utilizando el programa ENREDO, desarrollado por el grupo de Mecánica Computacional del Centro Atómico Bariloche de la CNEA. Para lograr una adecuada representación numérica del problema, fue necesario trabajar con una malla de 13657 elementos y 7411 nodos, con lo cual las longitudes de onda más cortas estudiadas fueron representadas, al menos, con 5 elementos. Teniendo en cuenta que el potencial plano  $\phi$  es complejo el número de incógnitas se duplica. Esto significó un requerimiento de 7 MBytes de memoria para el almacenamiento de los datos y tiempos de máquina en MicroVax del orden de los 80 minutos de CPU por ensayo.

#### RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Se efectuaron ensayos para diferentes condiciones del oleaje incidente, analizándose la efectividad de las estructuras de abrigo. En la Figura 3 se muestra una vista tridimensional de la superficie libre en la zona interior del puerto correspondiente a uno de los ensayos. Se observa que el nivel de agitación es marcadamente distinto en las diferentes dársenas.

En la Figura 4 se representa la amplitud del oleaje a lo largo del canal de acceso. Se observa que la atenuación es muy importante. Para olas con períodos comprendidos entre 5 y 7 segundos, que son las más frecuentes en esa región, la atenuación alcanza el 90 %, siendo algo más leve para período mayores. Se determinó que los taludes del canal de acceso juegan un rol muy importante en este proceso, dado que producen un efecto de refracción sobre las olas, orientándolas hacia las escolleras que protegen el canal, las cuales disipan gran parte de la energía de las olas incidentes.

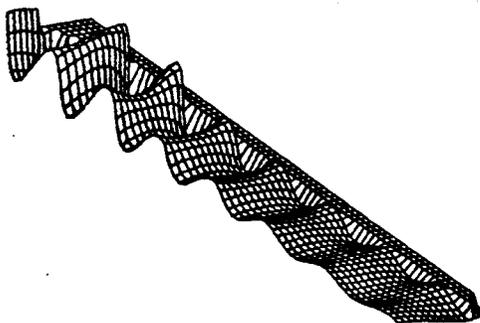


Figura 4 : Atenuación del oleaje en el canal de acceso

En la Figura 5 se presenta una vista tridimensional de detalle de la Dársena A, donde la agitación es mayor. La Figura 6 muestra las líneas de isoamplitud, relativa a la amplitud de la ola incidente, sobre todo el puerto. Dado que el modelo es de tipo lineal, estos resultados son independientes de la amplitud del oleaje incidente.

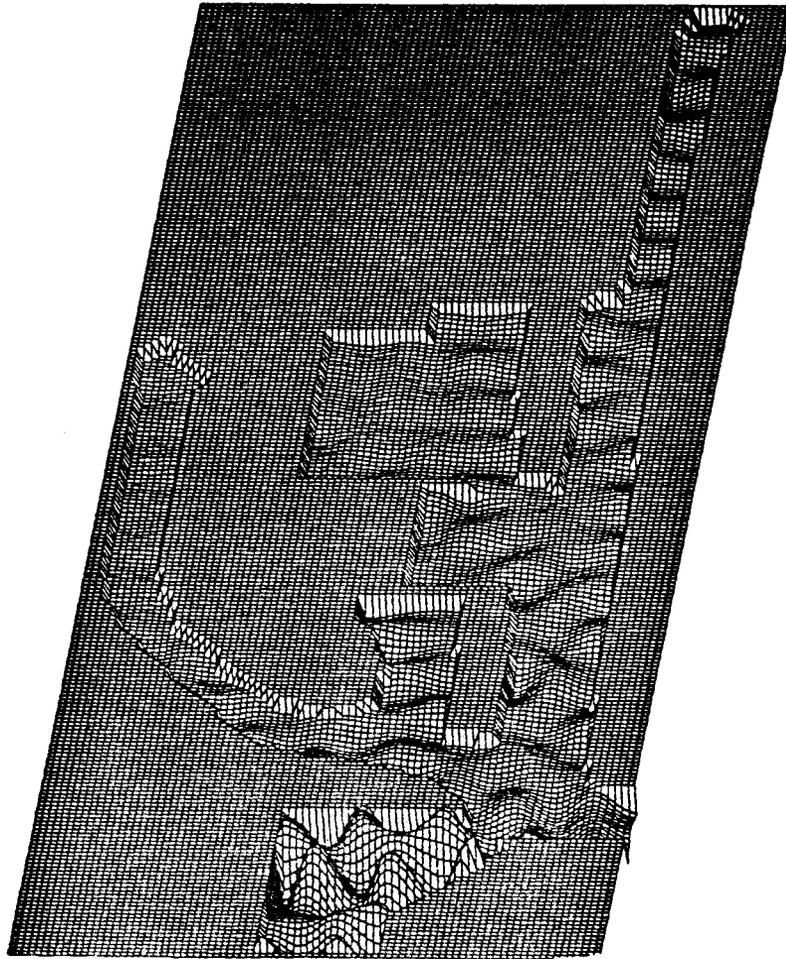


Figura 3 : Vista tridimensional del interior del puerto



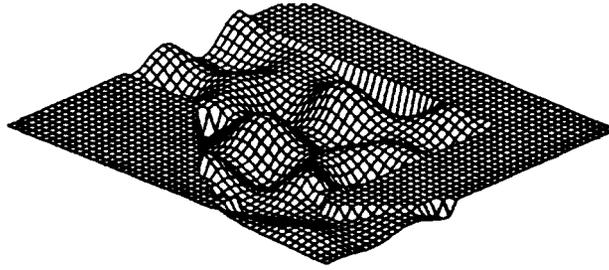


Figura 5 : Vista tridimensional del oleaje en la Dársena A

La dirección de propagación del oleaje dentro de la marina es un parámetro importante de analizar desde el punto de vista práctico, ya que, según cómo estén orientadas las embarcaciones respecto de aquella, las alturas máximas de ola admisibles son diferentes. En la Figura 7 La dirección de propagación del oleaje en un sector de la marina se representa mediante el campo de vectores número de onda. Este fue graficado sólo donde la amplitud relativa supera el 5%. El módulo de los vectores está escalado respecto del correspondiente a una onda progresiva del mismo período. En la zona B se observa que los vectores número de onda son muy pequeños, lo cual corresponde a un sistema de ondas estacionarias. En las zonas C y E se distingue la presencia de puntos anfidrónicos, alrededor de los cuales giran los frentes de onda (normales al vector número de onda local).

Como todo sistema físico sometido a oscilaciones forzadas, los puertos pueden estar sujetos a fenómenos de resonancia [7]. Por ello, es importante analizar la agitación para todo el rango de períodos de olas factibles de existir. Se efectuaron una larga serie de ensayos para períodos comprendidos entre 9 y 60 segundos, con incrementos de entre 1 y 2 segundos, determinándose, en cada ensayo, la máxima amplitud en cada zona del puerto. En la Figura 8 se muestra el comportamiento de las Dársenas A y D. Se observa que la dársena A presenta varios picos, dos de ellos de relativa importancia. En particular, se ve que para un período de 9 segundos hay un pico secundario que prácticamente duplica la amplitud respecto de otras dársenas. Esta es, precisamente, la condición que corresponde a la vista tridimensional presentada en la Figura 3.

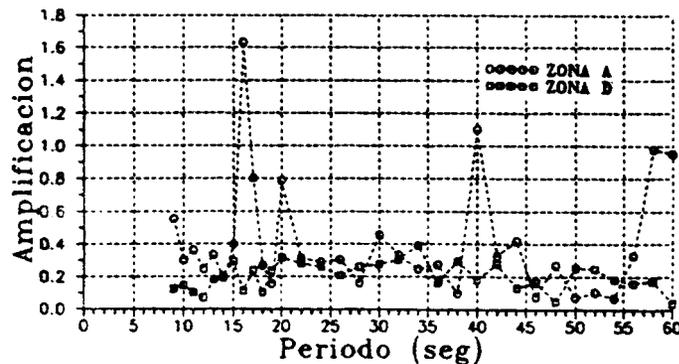


Figura 6 : Curva de Resonancia

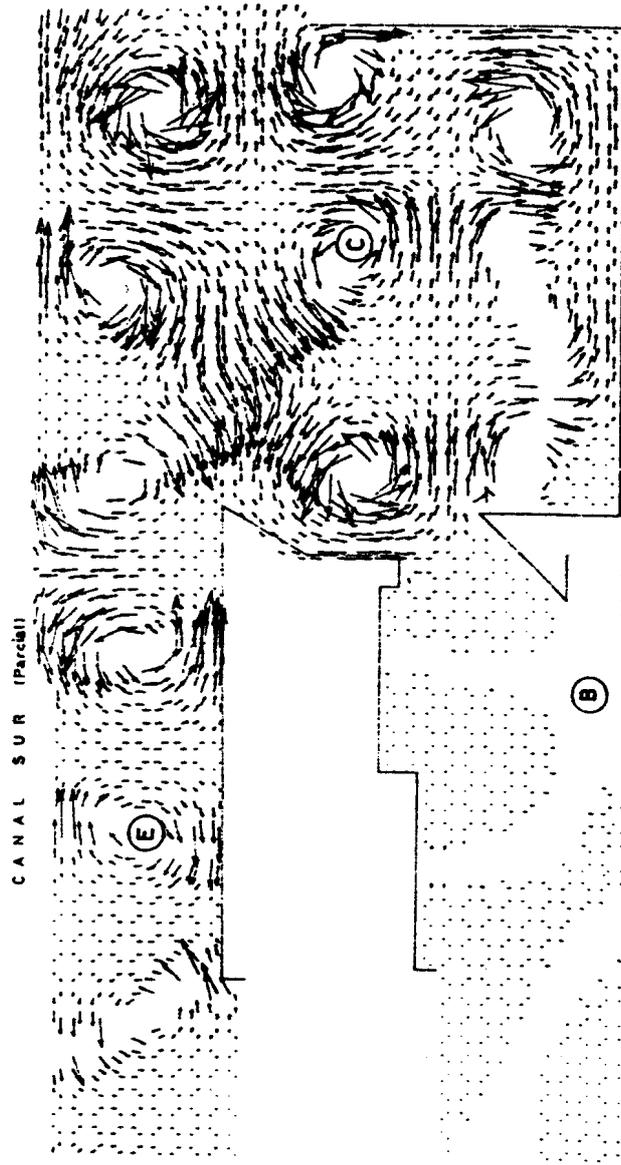


Figura 7 : Campo de vectores número de onda

#### CONCLUSIONES

A través de la presentación de una aplicación, se ha ilustrado el alcance práctico de los resultados obtenidos con un modelo numérico de agitación por oleaje en el interior de un puerto desarrollado en el LHA. El estudio requirió de una estrecha colaboración entre los encargados del proyecto de la obra y los responsables del desarrollo y la operación del modelo, lo cual se tradujo en un pleno aprovechamiento de los resultados obtenidos.

#### REFERENCIAS

1. Vionnet, C. A.; Menéndez, A. M., "Difracción-refracción combinadas de ondas de agua. Cálculo utilizando elementos finitos híbridos, incluyendo bordes absorbentes y disipación por fricción", ENIEF 87, San Carlos de Bariloche, Julio, 1987
2. Vionnet, C. A., "Difracción-refracción combinadas en ondas de agua", Informe LHA-INCyTH 064-02-87, setiembre, 1987.
3. Berkhoff, J.C.W., "Computation of combined refraction - diffraction", Proc. 13th. Conf. on Coastal Engineering, Vancouver, Julio, 1972.
4. Berkhoff, J.C.W., Booij N.; Badder, A.C., "Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear waves" Coastal Engineering 6, Elsevier Publishers, Amsterdam, 1982, pp 255-279.
5. Booij, N., "Gravity waves on water with non-uniform depth and current", Report N° 81-1, Delft University of Technology, 1982.
6. Cavaliere, M. A., Castellano, R., Menéndez, A. M., "Estudio de las condiciones de agitación en la marina de Punta del Este.- Informe de avance Nro. 1 ". Informe LHA-INCyTH 112-01-90, diciembre, 1990.
7. Vionnet, C. A., "Resonancia de puertos inducida por ondas gravitatorias". Informe LHA-INCyTH 064-05-88, mayo, 1988.