

APLICACION DEL MODELO MATEMATICO S21MARK8 AL DISEÑO PORTUARIO

JAVIER MARTINEZ ARANZABAL (*)

RESUMEN. El modelo numérico S21Mark8 es un modelo para la simulación de flujos y variaciones del nivel de agua en estuarios, bahías y áreas costeras. Este modelo ha sido desarrollado por el Danish Hydraulic Institute, y simula flujos bidimensionales irregulares en una capa de fluido (verticalmente homogénea) tanto cuando se considera únicamente la batimetría como cuando se incluyen condiciones secundarias (coeficientes de resistencia, acción del viento, condiciones de contorno, etc.). Aquí se va a prestar atención a su aplicación al diseño portuario mediante simulaciones de ondas cortas que incluyen los efectos de refracción, difracción y reflexión. Como resultado de estas simulaciones se obtienen los coeficientes de agitación, a partir de los cuales, variando la disposición de los diques exteriores y demás elementos de la configuración del puerto, se pueden mejorar las condiciones de agitación en el interior del mismo.

ABSTRACT. *S21Mark8 is a numerical modelling system for the simulation of water level variations and flows in estuaries, bays and coastal areas. This model has been developed by Danish Hydraulic Institute and it simulates unsteady two-dimensional flows in one layer (vertically homogeneous) fluids when presented only with the bathymetries and the relevant ancillary conditions (resistance coefficients, wind field, hydrographic boundary conditions, etc.). Hereinafter we focus our attention on its application to port design by means short wave simulations including refraction, diffraction and reflection effects. From these simulations we can obtain the wave disturbance coefficients in order to improve the wave conditions inside the port by changing the breakwaters alignment.*

1. INTRODUCCION

El oleaje, en su propagación desde profundidades indefinidas a las zonas costeras, ve modificada su estructura a causa de las limitaciones impuestas por las condiciones de borde o de fondo. Estas limitaciones se traducen, generalmente, en los fenómenos de refracción, shoaling y difracción.

Cuando el oleaje llega a un área portuaria, además de seguir modificándose por la refracción y el shoaling debidos al gradiente batimétrico, se ve afectado por la difracción que se produce al encontrar a su paso determinados obstáculos habituales en un puerto, como pueden ser el morro de un dique, bocanas de dársenas, espigones, etc., y por las reflexiones que se originan al incidir la onda en obstáculos situados en su trayectoria.

La reflexión puede ser total, caso de un dique o muelle de paramento vertical (aunque siempre hay cierta pérdida de energía por turbulencia o rozamiento); parcial, como puede ser un dique de escollera o un muelle en claraboya, y prácticamente nula, como es el caso de una playa muy tendida.

Es fácil comprender que el estudio de estos fenómenos es de vital importancia a la hora de diseñar un puer-

to, ya que ellos van a ser los agentes determinantes del estado de agitación del mismo y, en consecuencia, quienes determinen la operatividad de las diferentes instalaciones portuarias.

Para abordar esta problemática suelen emplearse, fundamentalmente, dos herramientas:

- Estudio en modelo físico.
- Estudio en modelo matemático.

Aquí se va a hacer referencia a estos últimos, particularizando en el citado S21Mark8, que presentan, respecto al modelo físico, la ventaja de una mayor rapidez y agilidad no exenta de fiabilidad.

El modelo matemático S21Mark8 permite realizar, con cierta comodidad, modificaciones, respecto a la planta de un proyecto inicial, referentes a la alineación de diques, ubicación de atraques, dragados, etc., de modo que resulta posible, con relativa facilidad, tantear diferentes alternativas. De esta forma, mediante comparaciones entre los resultados de las distintas soluciones, se puede llegar a optimizar la configuración final del puerto en cuestión.

2. ECUACIONES DEL MODELO

El modelo S21Mark8 resuelve las ecuaciones de conservación del volumen y momento integradas verticalmente (ecuación de Saint Venant).

(*) Licenciado en Ciencias Físicas. CEPYC.

En su aplicación a las ondas cortas (oleaje) el modelo introduce el concepto de porosidad para simular reflexiones parciales en estructuras no reflejantes. Igualmente se consideran los términos de Boussinesq para corregir la distribución de presión no hidrostática, debida a las aceleraciones verticales.

Con estas premisas las ecuaciones quedan:

Continuidad:

$$n \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Momento-x:

$$n \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + n^2 g h \frac{\partial \zeta}{\partial x} + n^2 p \left(a + \beta \sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} \right) - \frac{p^2}{nh} \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{pq}{nh} \frac{\partial n}{\partial y} = n \frac{Hh}{3} \left(\frac{\partial^3 p}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 q}{\partial x \partial y \partial t} \right)$$

Momento-y:

$$n \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + n^2 g h \frac{\partial \zeta}{\partial y} + n^2 q \left(a + \beta \sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} \right) - \frac{q^2}{nh} \frac{\partial n}{\partial y} - \frac{pq}{nh} \frac{\partial n}{\partial x} = n \frac{Hh}{3} \left(\frac{\partial^3 q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 p}{\partial x \partial y \partial t} \right)$$

donde:

$\zeta(x,y,t)$	nivel de la superficie de agua sobre el datum	(m)
$p(x,y,t)$	densidad de flujo en la dirección x	(m ³ /s/m)
$q(x,y,t)$	densidad de flujo en la dirección y	(m ³ /s/m)
$h(x,y,t)$	profundidad del agua	(m)
$H(x,y)$	profundidad del agua en reposo	(m)
g	aceleración de la gravedad	(m/s ²)
$n(x,y)$	porosidad	
α	coeficiente de resistencia para régimen laminar en un medio poroso	
β	coeficiente de resistencia para régimen turbulento en un medio poroso	
x,y	coordenadas espaciales	(m)
t	tiempo	(s)

Estas ecuaciones se resuelven mediante el método de diferencias finitas implícitas. El modelo utiliza la técnica denominada ADI (Alternating Direction Implicit) para integrar las ecuaciones de conservación de la masa y el momento en el dominio espacio-tiempo.

Las ecuaciones matriciales que resultan en cada dirección y en cada línea de malla individualmente se resuelven por el algoritmo de doble barrido, conocido como DS (Double Sweep).

3. CONDICIONES DE VALIDEZ. MALLA DE CALCULO

A la vista de la representación en planta de la zona portuaria sobre la que se va a aplicar el modelo y de las características climáticas de la zona se determinan los siguientes parámetros previos:

T_m : periodo mínimo.

T_p : periodo de pico.

h_m : profundidad mínima.

h_M : profundidad máxima.

Con estos parámetros ha de verificarse que se cumplen las condiciones de validez del modelo, que son:

a) A partir de T_m y h_m se determina la longitud de onda L_m del oleaje sinusoidal de periodo T_m a profundidad h_m . De la relación $L_m/\Delta x > 6$ se obtiene el valor del paso de malla Δx .

b) Hay que comprobar que, en las condiciones más desfavorables, se cumple:

$$\frac{h}{l} \leq 0,25$$

c) A partir del número de Courant:

$$C_r = \sqrt{gh} \times \Delta x / \Delta t$$

que para el oleaje toma valores $C_r \leq 1$, y considerando la profundidad máxima h_M se obtiene el paso de tiempo Δt como:

$$\Delta t \leq \Delta x / \sqrt{gh}$$

Una vez verificadas las condiciones de validez del modelo se genera la malla de cálculo obteniéndose el archivo de topografía. La figura 1 muestra una de estas topografías.

4. CONDICIONES DE CONTORNO

El modelo requiere que la malla sea rectangular, con tres lados cerrados y uno abierto por donde entra el oleaje. Es, pues, fácil comprender que para cada dirección de incidencia del oleaje haya que realizar una simulación diferente.

El oleaje de entrada al modelo es un registro consistente en una serie temporal de elevaciones de la superficie del mar, generada a partir de un espectro dado.

Volviendo al tema de los contornos cerrados es necesario aclarar que los modelos matemáticos de simulación de oleaje requieren un dominio de integración infinito. Por razones obvias esto no se puede llevar a efecto, y en la realidad los dominios computacionales se limitan tanto como sea posible.

Así, pues, surge un problema en los contornos abiertos, ya que todas las olas deben salir del modelo, es decir, han de ser absorbidas por los contornos sin ningún tipo de reflexión, pero como ya se ha explicado todos los bordes, salvo aquel por el que entra el oleaje, han de estar cerrados lo cual daría lugar a reflexiones y al consiguiente aumento de energía en el interior del modelo.



FIGURA 1. Representación gráfica de un archivo de topografía.

J. Larsen y H. Dancy, 1983, llevaron a cabo un estudio en el que utilizando «capas esponja» en los contornos abiertos comprobaron que se absorbía prácticamente la totalidad del oleaje. Empleando un espesor de $5 \Delta x$ en la zona de capas esponja consiguieron coeficientes de reflexión inferiores a 0,07.

La figura 2 muestra los valores del coeficiente de reflexión frente al número de onda adimensional, para dos espesores diferentes de la zona de capas esponja.

El funcionamiento de estas capas esponja es relativamente sencillo. Al término de cada time-step las elevaciones de la superficie y las velocidades de flujo en la zona de capas esponja se amortiguan al dividirse por un conjunto de coeficientes de capas esponja. De esta forma, las olas que se dirigen hacia fuera desaparecen gradualmente según se van propagando a través de estas zonas.

Estas capas esponja no sólo se emplean en los bordes, sino que también son útiles donde se necesite simular la absorción total de energía, por ejemplo playas, o zonas donde, debido a la propia configuración de la malla, se produzcan reflexiones que den lugar a aumentos de energía que no corresponden a la realidad.

Las capas esponja se especifican en un archivo de parámetros del modelo, llamado BMP (Basic Model Parameters), en el que también se detallan otras circunstancias de interés, como contornos, número de time-steps, Δx , Δt , dimensiones, etc.

Así, pues, hasta ahora se han visto tres archivos

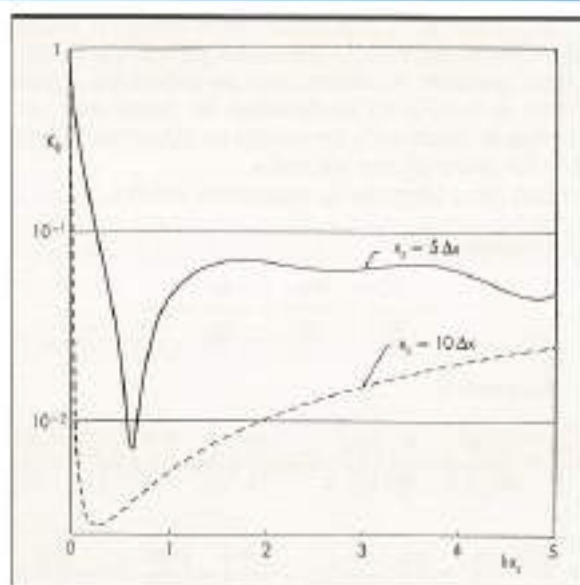


FIGURA 2. Valores del coeficiente de reflexión frente al número de onda adimensional, para dos espesores diferentes, $5 \Delta x$ y $10 \Delta x$, de la zona de capas esponja.

fundamentales: el de topografía, el del registro de oleaje y el de parámetros básicos del modelo.

5. REFLEXIONES PARCIALES

Cuando el oleaje incide en las estructuras sólidas se produce una reflexión del mismo que puede ser total o parcial, dependiendo de que la estructura en cuestión absorba o no parte de la energía del oleaje.

El modelo S21Mark8 considera por defecto que todas las estructuras son reflejantes, es decir, supone reflexión total.

En el caso de estructuras no reflejantes (muelles en claraboya, escolleras, etc.) se produce el fenómeno esquematizado en la figura 3, consistente en que parte de

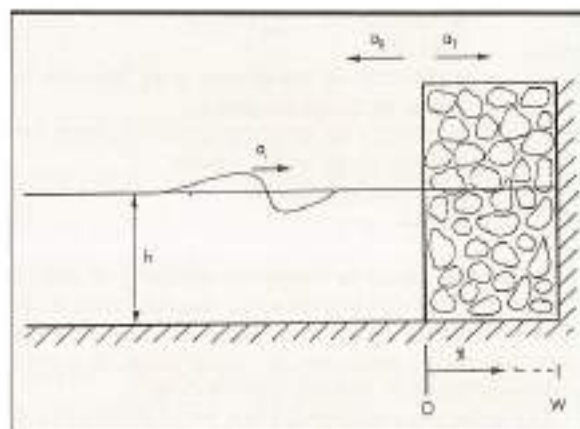


FIGURA 3. Incidencia de la energía del oleaje a_1 sobre una estructura no reflejante.

la energía incidente (a_i) se transmite a través de la estructura (a_t) y parte se refleja (a_r).

Es muy frecuente encontrar diques con un manto formado por varias capas de piedras cuyos tamaños disminuyen hacia el núcleo de la estructura, de forma que resultan casi impermeables. En este caso la transmisión de energía a través de las sucesivas capas se convierte en una disipación de energía, dando lugar a un fenómeno de reflexión sólo parcial. Este fenómeno se reproduce en el modelo mediante la utilización de capas porosas.

Los diques actuales tienen a menudo varias capas de piedras o bloques y forma trapezoidal, por lo que la disipación de energía tiene lugar no sólo en el interior de la estructura porosa, sino también en la pendiente hacia el mar a causa de la fricción. Este hecho conduce a un problema bidimensional en el que se deben tener en cuenta las velocidades verticales. Hasta ahora no se han obtenido soluciones analíticas bidimensionales, utilizándose métodos de aproximación.

El modelo considera este tipo de diques como impermeables, con una estructura porosa delante de ellos. La estructura se considera rectangular y homogénea, y el fondo horizontal. Las olas incidentes se suponen ondas lineales en aguas someras, las cuales no rompen al llegar a las capas porosas.

La expresión analítica del coeficiente de reflexión se determina como función de la porosidad (n), el factor de fricción (f) y el número de onda multiplicado por la anchura de la estructura absorbente (kwc):

$$\frac{a_r}{a_i} = \frac{1 - \varepsilon + (1 + \varepsilon) e^{-i2kwc}}{1 + \varepsilon + (1 - \varepsilon) e^{-i2kwc}}$$

$$\text{siendo: } \varepsilon = \frac{n}{\sqrt{1 - U^2}}$$

El paso siguiente es relacionar el factor de fricción con los parámetros típicos del oleaje incidente y de las características de la estructura absorbente. Esto se lleva a cabo empleando el principio de Lorentz, obteniéndose una expresión implícita de f . Esta expresión se resuelve combinando integración numérica e iteración, resultando el coeficiente de reflexión como función de:

- La porosidad.
- La anchura de la estructura absorbente.
- El diámetro de las piedras de dicha estructura.
- La profundidad.
- El período del oleaje.
- La altura de ola incidente.

La figura 4 representa los valores del coeficiente de reflexión en función de la porosidad; en este caso los parámetros considerados han sido:

- Anchura de la estructura absorbente 30 m.
- Diámetro de las piedras 0,20 m.

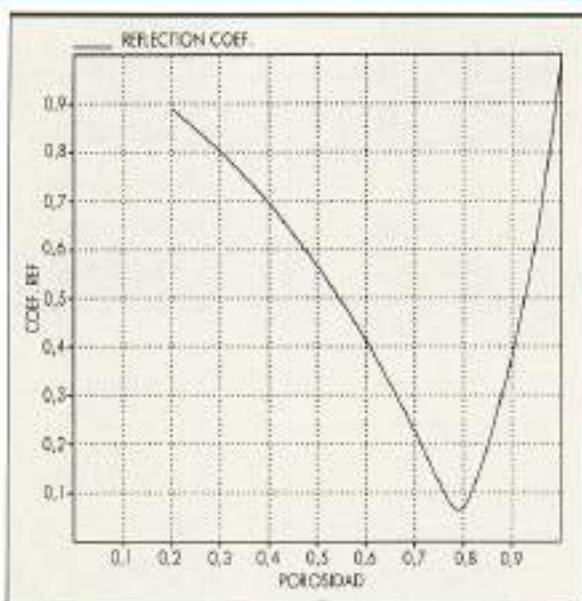


FIGURA 4. Coeficientes de reflexión en función de la porosidad
 $lw = 30 \text{ m}$, $d = 0,2 \text{ m}$, $h = 5 \text{ m}$, $T_p = 16 \text{ s}$, $H_i = 0,15 \text{ m}$.

- Profundidad 5 m.
- Período del oleaje 16 s.
- Altura de ola incidente 0,15 m.

En el caso de una aplicación particular del modelo hay que determinar el coeficiente de reflexión en cada una de las estructuras absorbentes del mismo.

Como ya se ha explicado, esta reflexión parcial se simula colocando capas porosas delante de esas estructuras. De esta forma resulta un nuevo archivo en el que se especifican los valores de porosidad correspondientes a cada una de las estructuras absorbentes.

6. EJECUCION DE LA SIMULACION

Los cuatro archivos que se han mencionado anteriormente, topografía, porosidad, parámetros básicos del modelo y registro de oleaje, sirven de entrada a la Unidad de Inicialización la cual crea un archivo que es, a su vez, la entrada de la Unidad de Computación.

La figura 5 esquematiza los diferentes pasos de este proceso.

7. RESULTADOS

Dado que el propósito de este artículo es destacar la utilidad del modelo numérico S21Mark8 al diseño portuario, se ha creído conveniente exponer los resultados de su aplicación a un caso real, concretamente al proyecto de ampliación del Puerto de Castellón, cuya configuración actual es la mostrada en la figura 6.

Este proyecto de ampliación tiene un doble objetivo como es aumentar la superficie de agua abrigada y permitir el acceso al puerto a barcos de mayor porte que los que actualmente pueden hacerlo.

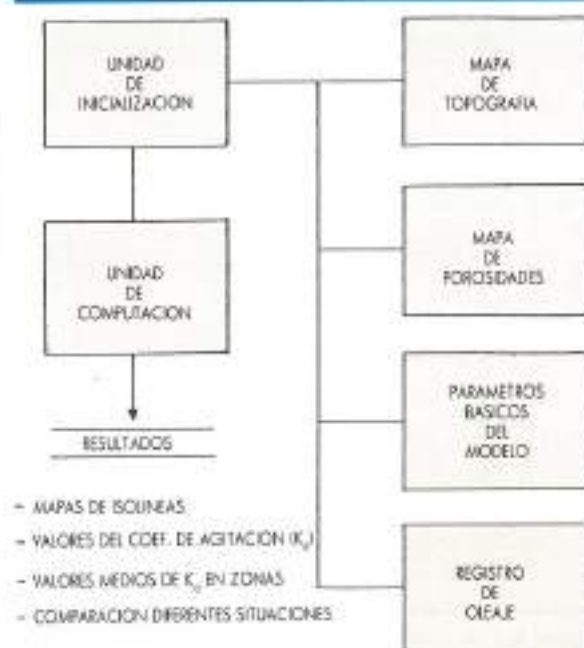


FIGURA 5. Esquema del funcionamiento del modelo matemático S21Mark8.

Con estas premisas, cualquier alternativa debe contemplar la prolongación del dique de abrigo, el dragado de la bocana del puerto y zona de antepuerto y la demolición parcial del contradique de poniente con el fin de facilitar la maniobra de entrada de los barcos.

A continuación se van a comparar los resultados de las tres situaciones siguientes:

- Situación actual (figura 6).
- Alternativa 1. Consiste en la demolición parcial

(220 m) del contradique de poniente, la construcción de un nuevo tramo de 320 m a partir del morro del dique exterior con una alineación próxima a la línea N-S y el dragado a -10,5 m de la bocana y el antepuerto (figura 7).

- Alternativa 2. La demolición del contradique y el dragado son similares a la anterior. El dique exterior se prolonga 100 m, y a continuación se añade un tramo de 530 m en una alineación como la de la alternativa anterior (figura 8).

Los resultados de estas tres simulaciones se muestran representando la distribución zonal del coeficiente de agitación (figuras 9, 10 y 11), definido éste como el cociente entre la altura significativa en cada punto del modelo y la que hay en la entrada del mismo.

A la vista de las figuras 9 y 10 parece claro que la alternativa 1 no es la solución adecuada, ya que la construcción del nuevo tramo es insuficiente para compensar el efecto de la demolición parcial del contradique, quedando la dársena interior claramente desprotegida. Se puede apreciar que el estado de agitación no sólo no mejora sino que empeora considerablemente con respecto a la situación actual.

Sin embargo, con la alternativa 2 (figura 11) se cumple el doble propósito de aumentar la superficie de agua abrigada y permitir la entrada a barcos de mayor calado. En todas las zonas de atraque y en las dársenas interiores la agitación disminuye notablemente con relación a la situación actual.

En las figuras 12 y 13, que representan el estado de agitación en un momento determinado de la simulación, se pone de manifiesto esta mejora, apreciándose claramente cómo en la alternativa 2 la entrada del oleaje se produce por difracción en el morro del dique exterior. Puede observarse cómo este dique supone un abrigo adecuado para el antepuerto y las dársenas interiores.

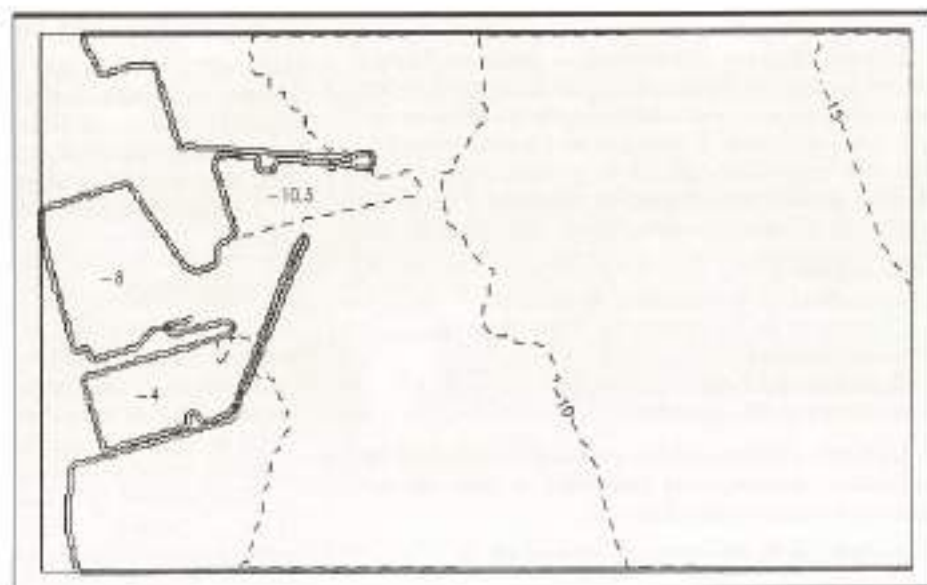


FIGURA 6. Representación en planta de la situación actual del Puerto de Castellón.

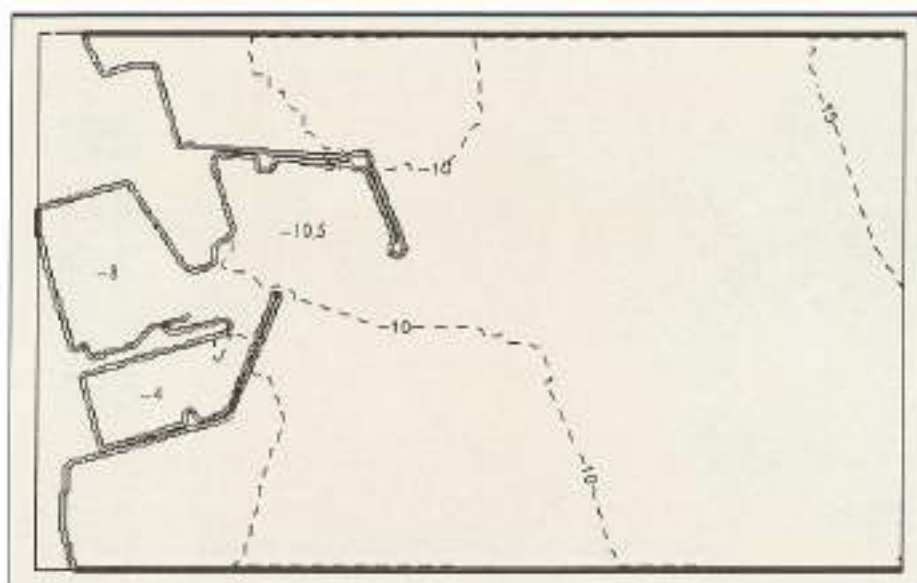


FIGURA 7. Representación en planta correspondiente a la solución alternativa 1 del Puerto de Castellón.

Para cuantificar las distintas situaciones resultantes de estas alternativas, habría que realizar simulaciones considerando todas las direcciones de oleaje que contribuyen a la agitación interior, en este caso NE, E y SE (los resultados mostrados corresponden a la SE) y, basándose en un estudio de clima marítimo, evaluar los resultados obtenidos.

A grandes rasgos el procedimiento sería:

- Determinar la altura de ola umbral, H_u , no deseable en el interior del puerto.
- Calcular el valor medio del coeficiente de agitación, K_a , en cada zona de interés.

- Obtener la altura de ola necesaria en la entrada del modelo, H_e , para originar esa altura umbral:

$$H_e = H_u / K_a$$

- Calcular, para cada dirección, los coeficientes de refracción y shoaling desde profundidades indefinidas hasta la entrada del modelo (estudio de propagación del oleaje).
- Obtener la altura de ola precisa en profundidades indefinidas, H_o , que da lugar a H_e :

$$H_o = H_e / (K_r \times K_s)$$

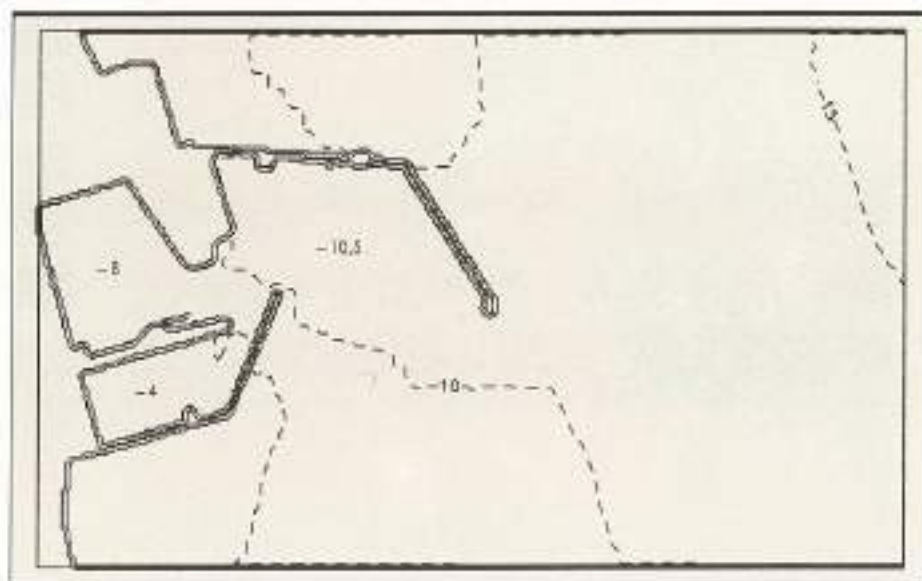


FIGURA 8. Representación en planta correspondiente a la solución alternativa 2 del Puerto de Castellón.

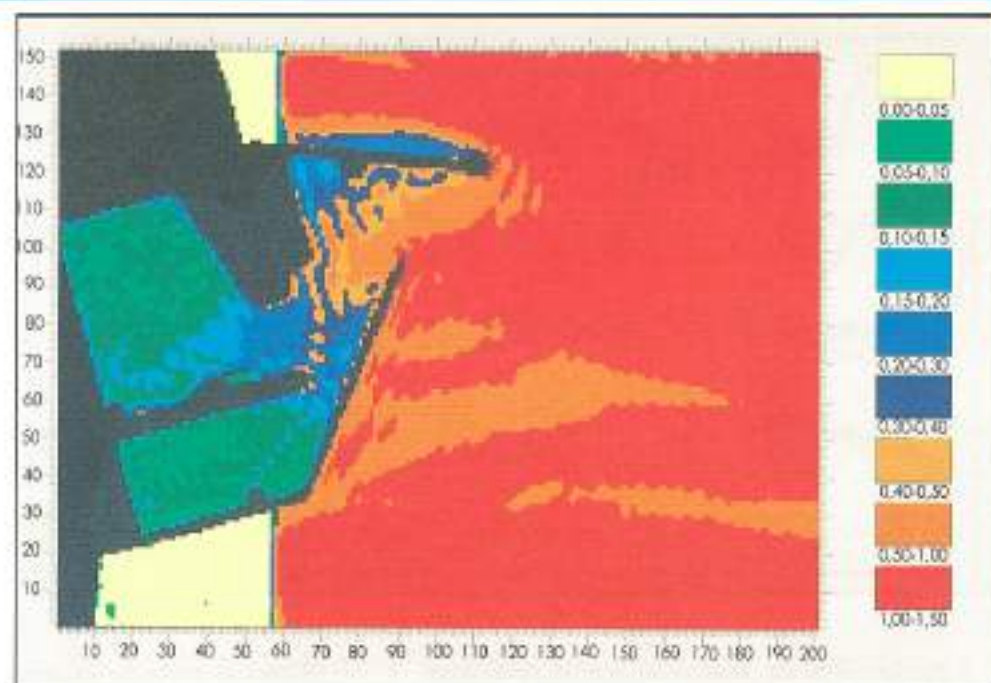


FIGURA 9. Distribución zonal del coeficiente de agitación. Situación actual. Dirección NE.

- Determinar, a partir del correspondiente régimen direccional de oleaje, la probabilidad de superación de H_0 y, consecuentemente, el número de días al año en que se excede dicha altura.
- Sumar la contribución de todas las direcciones ensayadas.

Una vez hecho esto se puede evaluar, con gran fiabilidad,

la bondad de las diferentes alternativas consideradas, y realizar las modificaciones que se estimen necesarias para optimizar la solución definitiva.

8. CONCLUSION

El comportamiento del modelo en la reproducción de los fenómenos que intervienen en la propagación de ondas

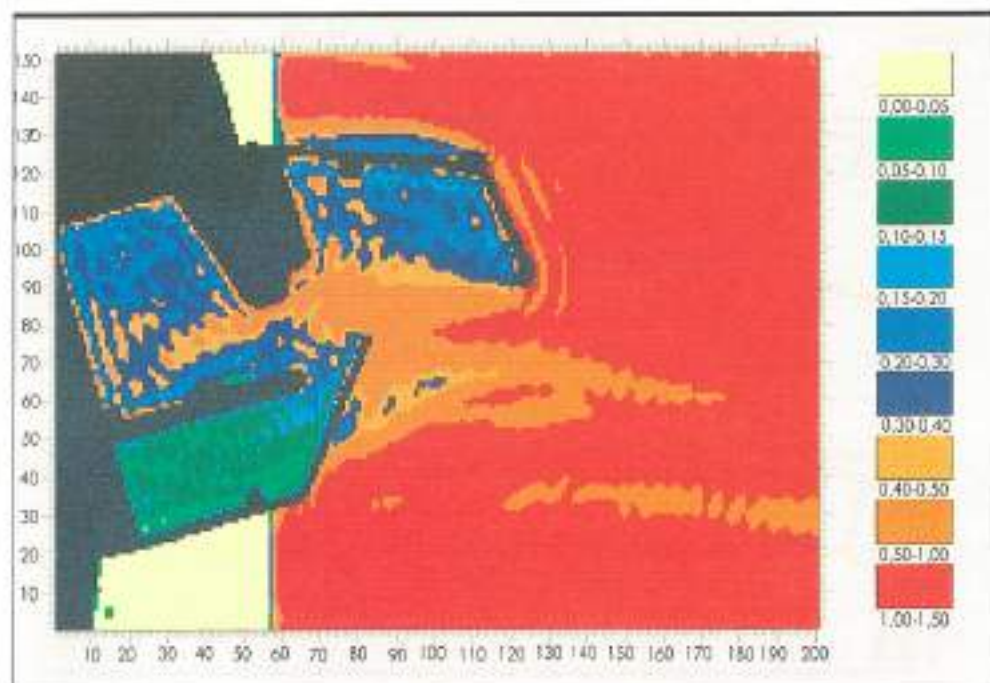


FIGURA 10. Distribución zonal del coeficiente de agitación. Alternativa 1. Dirección NE.

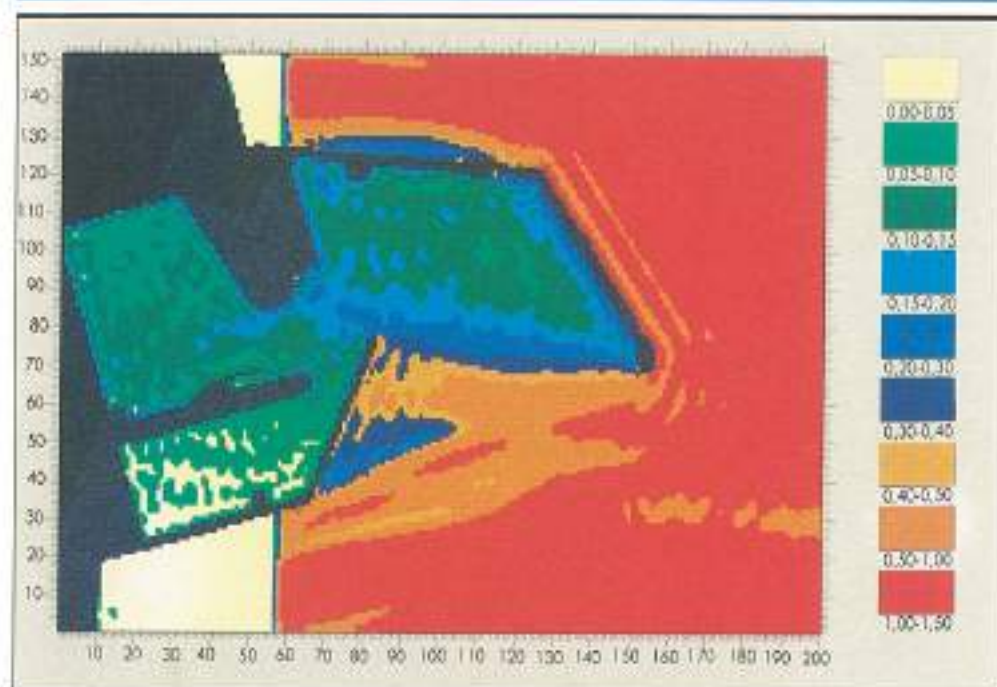


FIGURA 11. Distribución zonal del coeficiente de agitación. Alternativa 2. Dirección NE.

cortas (oleaje), tales como refracción, shoaling, difracción y reflexión total y parcial, ha sido comparado con resultados suficientemente contrastados, tanto analíticos como experimentales. En general, estas compara-

ciones han sido favorables, por supuesto, siempre dentro del rango de validez del modelo, el cual es amplio y satisfactorio.

Este hecho pone de manifiesto que el modelo mate-

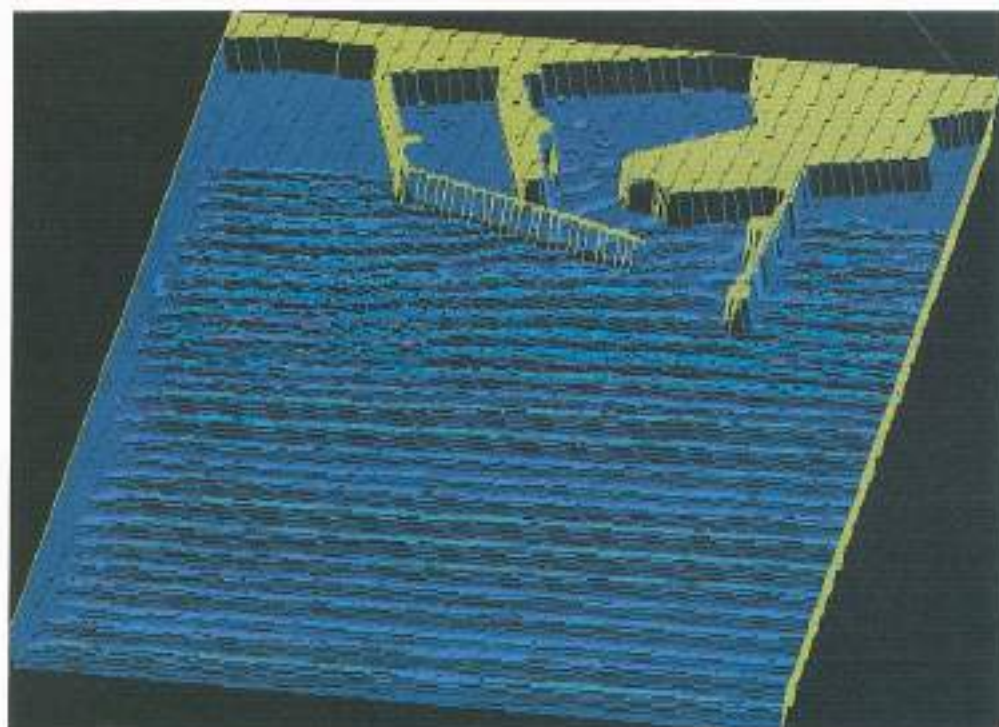


FIGURA 12. Estado de agitación en un instante determinado de la simulación (situación actual).



FIGURA 13. Estado de agitación en un instante determinado de la simulación alternativa II.

mático S21Mark8 es una herramienta de gran utilidad en estudios de agitación portuaria, con especial incidencia en el diseño portuario, como así lo prueba el considerable número de trabajos que con él se han llevado y se siguen llevando a cabo en el CEPYC y lo satisfactorio de los resultados alcanzados. Algunos de estos trabajos se han realizado también en modelo físico, observándose gran similitud entre los resultados de ambos.

9. AGRADECIMIENTOS

Dentro del apoyo general recibido del Sector de Estudios Portuarios del CEPYC, es de destacar la colaboración prestada por el técnico del mismo, don José Manuel Castillo Carrillo, en la ejecución del Estudio de agitación en el Puerto de Castellón.

10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

ABBOTT, M. B.; McCOWAN, A. D., y WARREN, I. R. (1984). Accuracy of Short Wave Numerical Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 110, n.º 10.

ABBOTT, M. B.; PETERSEN, H. M., y SKOVGAARD, O. (1978). On the Numerical Modelling of Short Waves in Shallow Water. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 16, n.º 3.

KEULEGAN, G. H. (1973). Wave transmission through rock-structures. U. S. Army Engineer Waterways Experiments Station, Vicksburg, Research report n.º H-73-1.

LARSEN, J., y DANCY, H. (1983). Open boundaries in short wave simulation-A new approach. *Coastal Eng.*, 7:285-297.

MADSEN, P. A. (1983). Wave Reflection from a Vertical Permeable Wave Absorber. *Coastal Engineering*, 7.

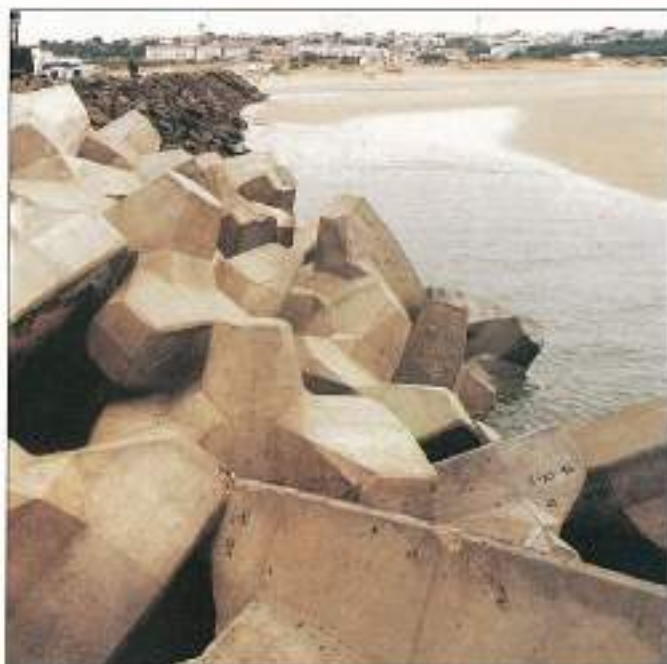
MADSEN, P. A., y WARREN, I. R. (1984). Performance of a numerical short-wave model. *Coastal Eng.*, 8:73-93.

MARTINEZ, J. (1990). Estudio de agitación en modelo matemático en el Puerto de Castellón. CEDEX, Centro de Estudios de Puertos y Costas. Madrid.

SEELING, W. N., y AHRENS, J. P. (1981). Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments and breakwaters. Department of the Army. Coastal Engineering Research Center. Kingman Building, Fort Belvoir, Virginia.

ACCROPODE®

El manto de protección en las estructuras marítimas



Manto en construcción del nuevo puerto deportivo de Mazagón (Huelva)



Bloque de 22 toneladas utilizado para la protección del nuevo puerto deportivo de Palamós (Cataluña)

50 aplicaciones en 14 países representan más de un millón de toneladas de hormigón

Desarrollado y patentado por SOGREAH que realiza :

- estudios gratuitos del diseño de soluciones con el bloque ACCROPODE®
- Ensayos en modelos hidráulicos en su propio laboratorio de hidráulica
- Asistencia técnica completa
- Asistencia en el control de la obra durante su construcción

SOGREAH
▼
SOGELERG

6, rue de Lorraine - 38130 Echirolles - Francia
Telefono (33) 76 33 40 00 - Telex 980876F - Telefax (33) 76 33 42 96

Representante en España para el ACCROPODE®
Juan Gonzalo y Vara
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
C/Caracas, 6 - 3ª izqda. exterior - 28010 Madrid

CALIDAD Y VARIEDAD



La infraestructura de FIBROTUBO-BONNA responde a todas las exigencias de calidad y variedad que hoy plantea la conducción de fluidos. Nuestro catálogo de fabricados contiene la gama más completa de materiales y accesorios en todas las dimensiones... Aportamos soluciones innovadoras y específicas para cada necesidad... Y ofrecemos la indiscutible garantía de FIBROTUBO-BONNA.



**FIBROTUBO
BONNA**

FIBROTUBO-BONNA, S.A.
Hortaleza, 2-4º. 28004 MADRID