

INFLUENCIA DEL DRAGADO EN LA AGITACIÓN PORTUARIA APLICACIÓN AL PUERTO DE SAGUNTO

Javier Martínez Aranzábal*
Licenciado en Ciencias Físicas

El dragado del canal de acceso a un puerto da lugar a una serie de modificaciones en el comportamiento hidráulico de éste que no siempre producen el efecto deseado. En este Artículo se va a ver la aplicación al caso del Puerto de Sagunto, prestando atención a la agitación portuaria antes y después del dragado considerando oleaje incidente de direcciones E y SE.

The dredging of the entry channel of a harbour produces some changes in its hydraulic behaviour which could have undesirable effects. This paper presents a practical application of this type of situation concerning to the port of Sagunto, paying particular attention to agitation conditions inside the port with incoming waves from E and SE directions, before and after dredging.

Introducción

Las obras de dragado tienen como objetivo principal facilitar las maniobras de los barcos en su aproximación a dársenas, atraques y demás instalaciones portuarias, así como permitir el acceso al puerto de embarcaciones de mayor calado.

Sin embargo, estas obras, aparentemente beneficiosas para la explotación portuaria, pueden introducir una serie de efectos que alteren los niveles de agitación del puerto previos a la obra, pudiendo en ocasiones dar lugar a un empeoramiento general de las condiciones de explotación.

Por este motivo, antes de llevar a cabo una obra de dragado, deben evaluarse las posibles modificaciones que los efectos producidos por la misma pudieran originar en el interior del puerto.

Los principales efectos ocasionados por un dragado van asociados a los fenómenos que sufre el oleaje en su propagación en profundidades reducidas, y pueden resumirse en los siguientes:

- Variación de la altura de ola y dirección de los frentes de oleaje debido a los fenómenos de refracción y shoaling.
- Aparición de ondas atrapadas a causa de reflexiones. Este hecho se manifiesta principalmente en los bordes de un canal.
- Modificación de los períodos de oscilación de las dársenas ante la excitación por ondas largas.

En este artículo se va a prestar atención a los dos primeros puntos, utilizando como ejemplo ilustrativo la aplicación al Puerto de Sagunto.

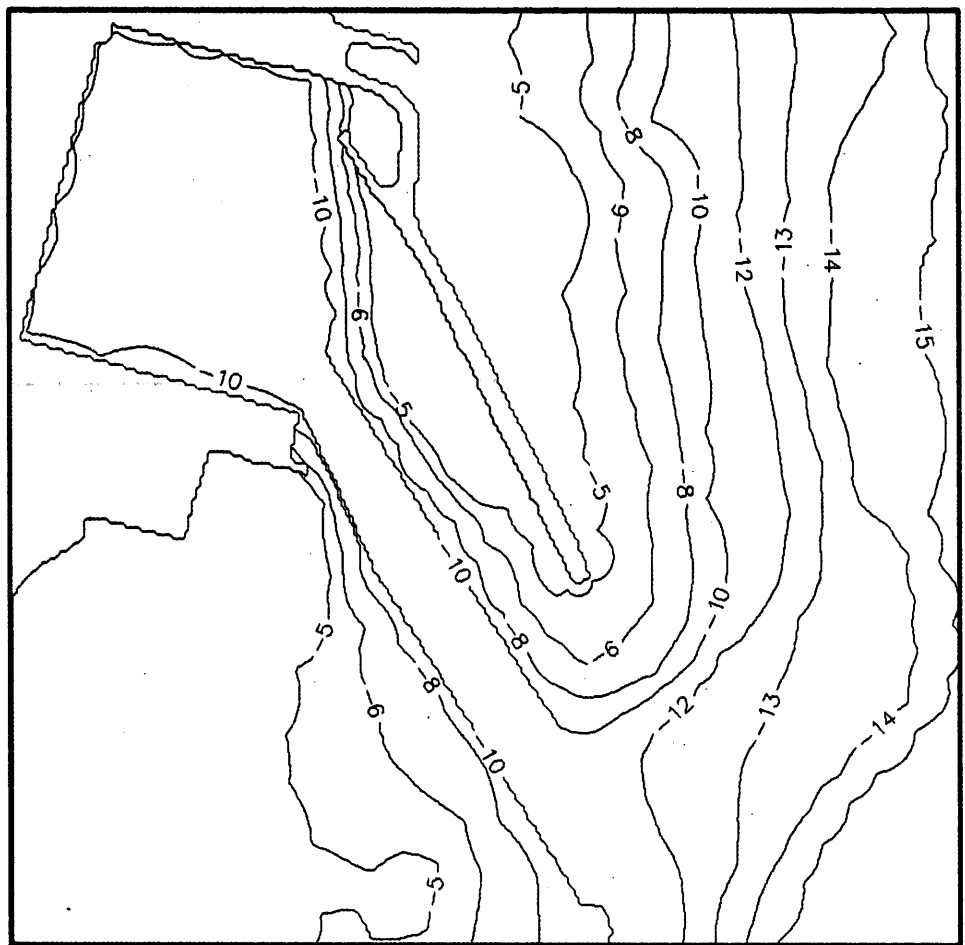
Planteamiento del problema. El puerto de Sagunto

Con el fin de permitir el acceso y utilización del puerto a embarcaciones de mayor porte que las que actualmente lo hacen, la Autoridad Portuaria de Valencia ha proyectado dragar tanto el

*Director de Programa del AREA DE IMPACTO AMBIENTAL. Dirección General de Política Ambiental (MOPTMA).

Recibido en ROP: julio 1994

Figura 1.
Configuración
del Puerto
de Sagunto
y batimetría
actual.



canal de entrada al puerto de Sagunto como la dársena interior del mismo.

Estas obras de dragado tienen el objetivo de mejorar el estado de agitación actual del puerto, fundamentalmente cuando se presentan temporales de levante.

El estudio en que se basa este artículo se llevó a cabo utilizando el modelo matemático Mike 21 (desarrollado por el Danish Hydraulic Institute), considerándose para ello la situación actual del puerto (figura 1) y una serie de alternativas de dragado.

En un principio se tuvieron en cuenta tres direcciones de incidencia del oleaje: NE, E y SE, descartándose posteriormente la NE, pese a ser la que lleva asociadas las mayores alturas de ola, debido a que el puerto está convenientemente abrigado frente a dicho oleaje. La dirección E, oleaje de levante, es la que produce más problemas de agitación. El oleaje del SE se ha considerado,

pese a ser poco frecuente, por incidir directamente en el puerto. Como se verá posteriormente esta última dirección pone de manifiesto el efecto de ondas atrapadas en el borde del canal.

En el desarrollo de este artículo se van a considerar dos configuraciones del puerto: la actual y una alternativa consistente en aumentar la anchura del canal y dragar la dársena y el canal a -11.25m, extendiéndose la zona de dragado hasta encontrar la batimétrica correspondiente a dicha profundidad (figura 2). Los resultados obtenidos con oleaje de dirección E servirán para poner de manifiesto la contribución de la refracción a la agitación resultante, mientras que el efecto de la reflexión en los bordes del canal quedará patente al incidir oleaje de dirección SE.

Refracción del oleaje

Cuando en su propagación el oleaje alcanza profundidades próximas a una semilongitud de

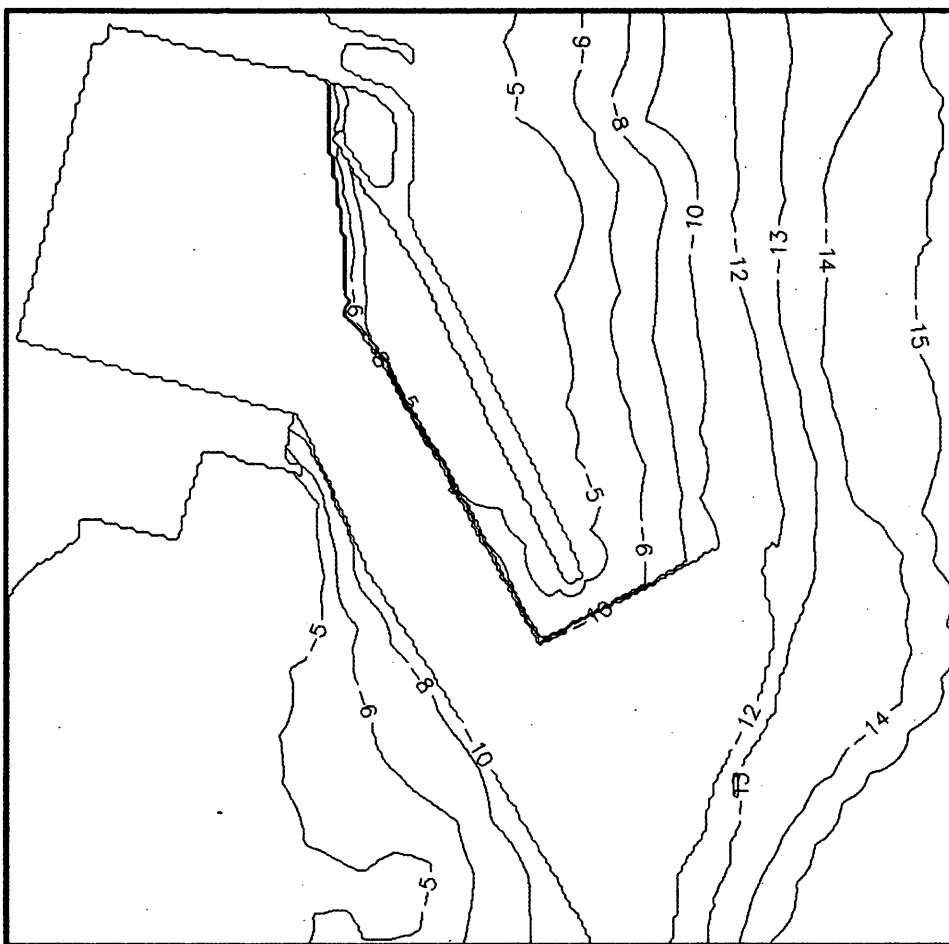


Figura 2.
Batimetría
del puerto
incluyendo
las obras de
dragado.

onda comienza a verse afectado por el fondo, modificando su altura, velocidad y dirección.

Puesto que la celeridad del oleaje (c) es función de la profundidad (d), cuando dos puntos de un mismo frente de onda se encuentran a profundidades distintas experimentan una distorsión, desplazándose uno de los puntos con mayor velocidad que el otro.

En la expresión

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$$

donde T es el período y L la longitud de onda, se relacionan estas variables que explican el fundamento del fenómeno de la refracción del oleaje.

La orientación que toma un determinado oleaje sometido a refracción se puede resumir dicién-

do que los frentes de onda tienden a situarse de forma paralela a las batimétricas.

Las variaciones de dirección por refracción pueden deducirse de forma gráfica con el método de las ortogonales, basado en la ley de Snell.

$$\frac{\sin \theta}{V_c t} = cte$$

donde

θ Es el ángulo que forma el frente con la batimétrica.

V_c Velocidad de fase del oleaje (celeridad).

En la figura 3 se muestra un diagrama esquemático de la refracción.

En el caso del puerto de Sagunto el oleaje de levante sufre el efecto de la refracción al verse

Figura 3. Representación esquemática del fenómeno de la refracción.

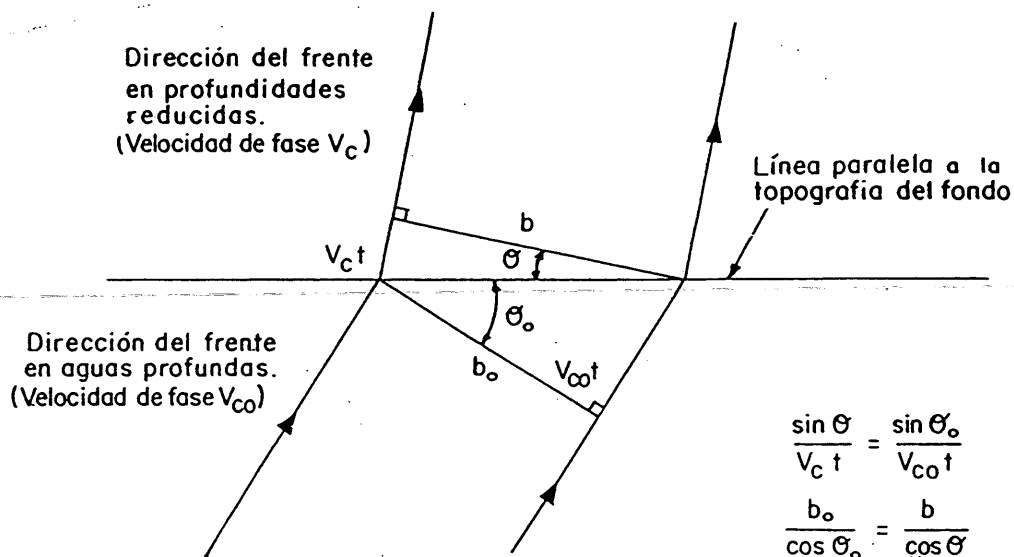


DIAGRAMA DE REFRACCION

Figura 4.- Propagación del oleaje de dirección E en la situación actual.



afectado por los bajos próximos al morro del dique. Este fenómeno obliga a los frentes de oleaje a realizar un giro encauzándose por el canal, lo que provoca que la mayor parte de la energía se concentre hacia el interior del puerto. Esta situación queda reflejada en la fig. 4.

Si se considera la situación alternativa antes descrita (figura 2), el efecto del dragado queda patente al reducirse considerablemente la zona donde se refractaban los frentes, con lo que estos se propagan ahora por un área de profundidad uniforme sin llegar a afectarse por el fondo lo suficiente como para incidir en el puerto.

En la figura 5 se muestra la nueva situación, pudiendo verse que una parte de la energía va asociada al oleaje que continúa su propagación atravesando el canal sin penetrar en el puerto, mientras que la energía que penetra lo hace entre el borde del canal y la cara interior del dique disipándose a lo largo de la escollera.

Estas dos situaciones pueden cuantificarse por medio del coeficiente de agitación, definido éste como el cociente entre la altura de ola en

cada punto y la que hay en la entrada del modelo matemático, es decir viene a indicar el porcentaje de la altura de ola exterior que se registra dentro del puerto. La distribución zonal del coeficiente de agitación correspondiente a la situación actual está representada en la figura 6, donde se aprecia claramente el encauzamiento de energía por el canal. La figura 7 muestra el estado de agitación resultante tras el dragado. Puede observarse que la mayor parte del oleaje no llega a penetrar en el puerto lo que provoca que en el interior de éste se obtenga una situación mucho más favorable que la actual.

Ondas atrapadas

Como se acaba de ver, la presencia de un canal puede alterar la dirección del avance del oleaje debido al efecto de la refracción producida por la diferencia de profundidades.

En ocasiones este fenómeno da lugar a la aparición de ondas atrapadas con la consiguiente concentración de energía en una determinada zona, lo cual puede suponer un grave perjuicio si se trata de una zona de atraque o de maniobra de embarcaciones.

Este comportamiento de los frentes de onda está regido, como ya se ha visto, por la conocida ley de Snell, que es una de las leyes clásicas de la refracción cuando una onda pasa de un medio a otro.

Existe numerosa bibliografía que explica este fenómeno tanto de forma teórica como práctica, en aplicaciones a canales de longitud finita o infinita y de batimetría paralela.

La aplicación teórica en el caso del puerto de Sagunto debe hacerse con ciertas reservas debido a las limitaciones impuestas por tratarse de una batimetría irregular y por la dificultad de precisar con exactitud el ángulo de incidencia del oleaje en el canal. No obstante, lo que se explica a continuación puede servir para dar una idea, si quiera cualitativa, del fenómeno producido.

En la figura 8.a se esquematiza el paso de un frente de olas de un medio 1 de profundidad h_1 a un medio 2 cuya profundidad es h_2 . La ley de Snell dice que se ha de cumplir la relación siguiente:

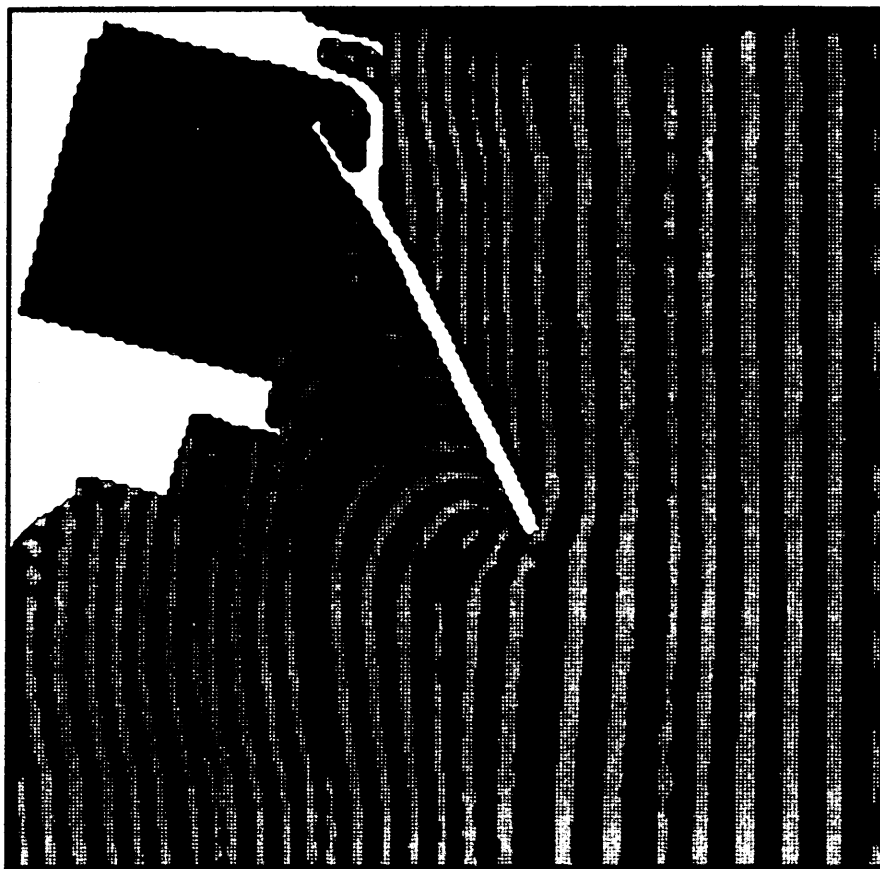


Figura 5.
Propagación del oleaje de dirección E tras la realización del dragado.

$$\sin \alpha_r = \frac{C_2}{C_1} \sin \alpha_i$$

siendo C_1 y C_2 las celeridades a las profundidades h_1 y h_2 respectivamente.

Para el caso en que $\sin \alpha_i$ sea igual a C_1/C_2 se verifica que α_r vale 90° , es decir las ondas se propagan a lo largo del borde entre ambos medios (figura 8.b).

Según la conservación del flujo de energía:

$$H_2 = \frac{K_{s2}}{K_{s1}} \sqrt{\frac{\cos \alpha_i}{\cos \alpha_r}} H_1$$

Donde K_{s1} y K_{s2} son los coeficientes de shoaling a las profundidades h_1 y h_2 respectivamente, siendo H_1 y H_2 las correspondientes alturas de ola en cada medio.

Como $\cos \alpha_r = \cos 90^\circ = 0$, H_2 se hace infinito a la profundidad h_2 , no existiendo penetración del

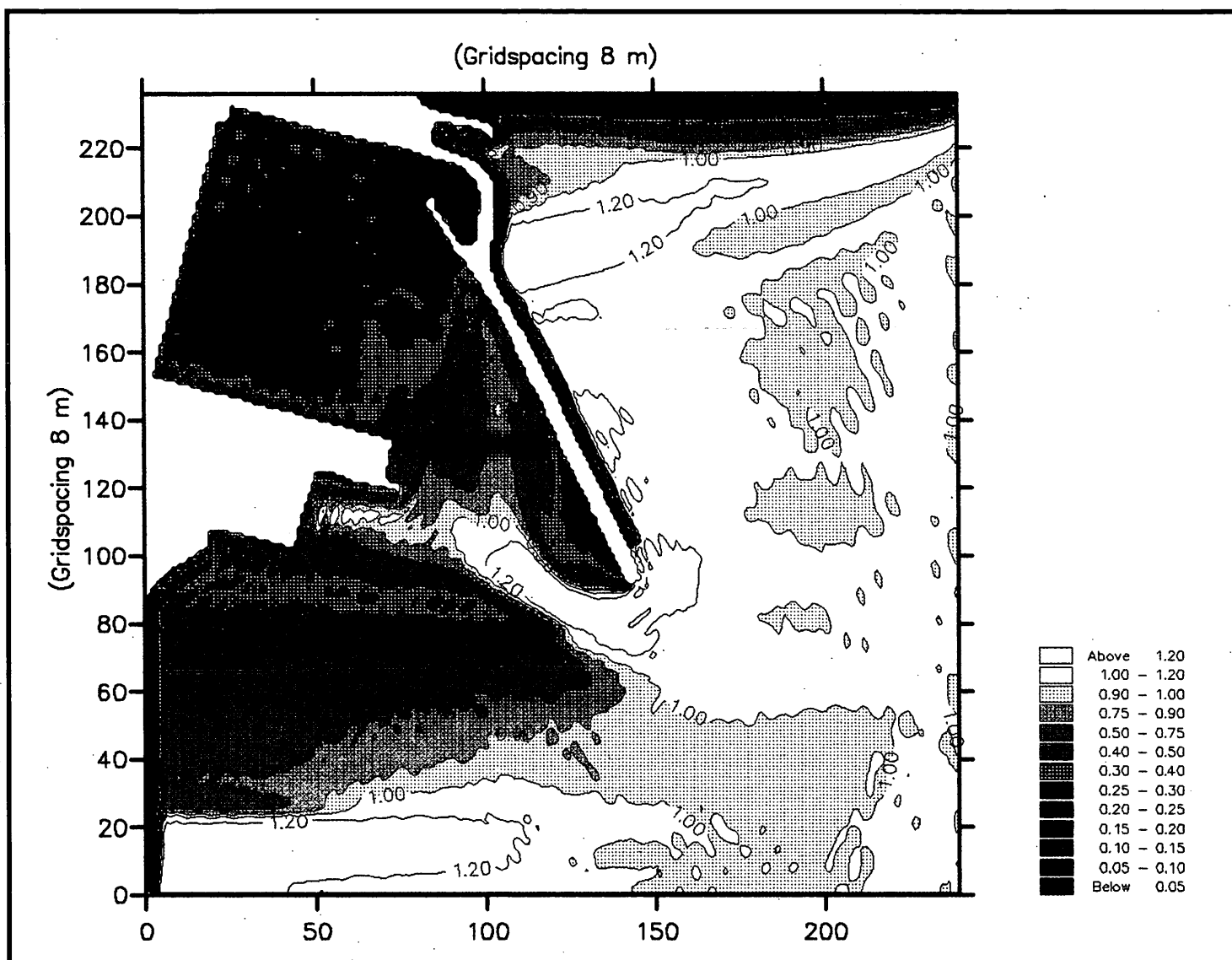


Figura 6. Coeficientes de agitación en la situación actual. Oleaje E.

oleaje a esa profundidad. Luego, según la teoría lineal, el oleaje queda atrapado en el borde del canal cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo crítico, α_{crit} , dado por:

$$\alpha_{crit} = \arcsin \frac{C_1}{C_2}$$

En la realidad lo que ocurre es una amplificación de la altura de ola que evidentemente no es infinita, como tampoco es cero la altura al otro lado del canal la cual decrece al separarse del borde.

Para estimar el ángulo crítico en el canal del puerto de Sagunto se considera que el primer me-

dio, antes de llegar al borde del canal, la profundidad es constante $h_1=7m$, siendo $h_2=10.5m$ la profundidad del canal.

La longitud de onda en profundidades indefinidas correspondientes al período $T=9s$ viene dada por:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = 123,6m$$

La expresión de la celeridad es $C=L/T$, siendo L la longitud de onda a la profundidad h , que se calcula según:

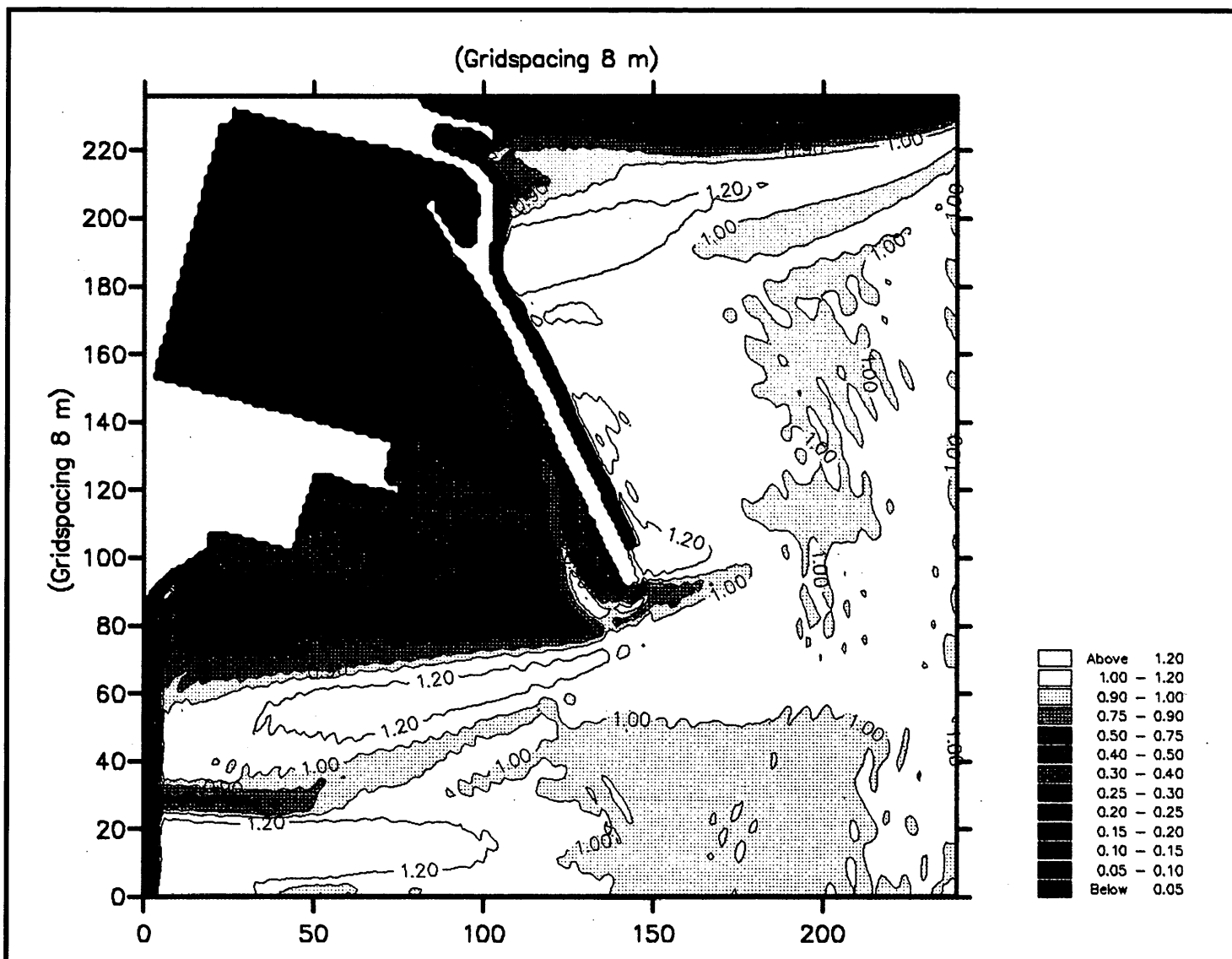


Figura 7. Coeficientes de agitación obtenidos después del dragado . Oleaje E.

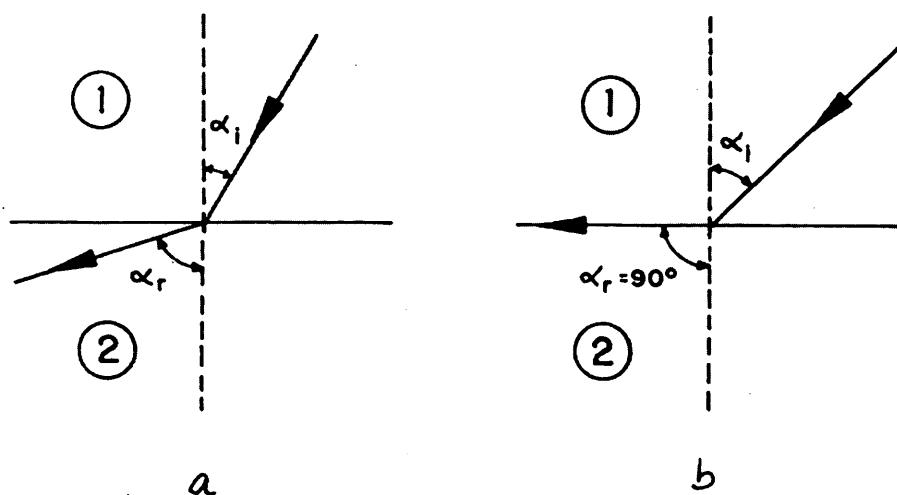


Figura 8. a) Esquema del paso de un frente de oleaje de un medio a otro. b) La misma situación cuando la incidencia se realiza bajo el ángulo crítico.

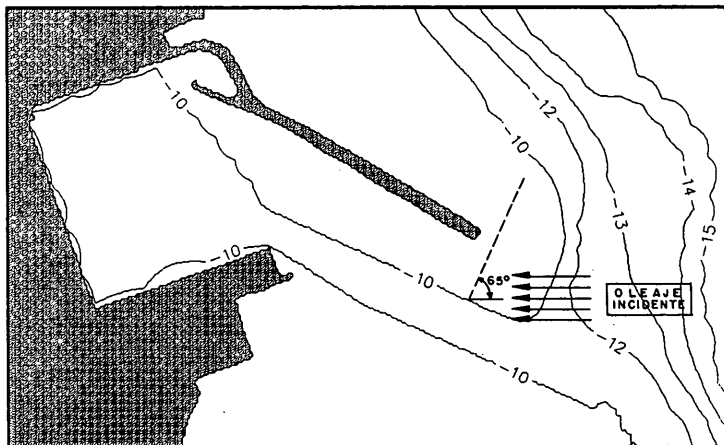


Figura 9. Incidencia del oleaje de dirección SE en el canal de acceso al puerto. A la derecha, figura 10. Propagación del oleaje de dirección SE en la situación actual.

$$L = L_0 \tanh kh = L_0 \tanh \frac{2\pi}{L} h$$

que como se ve es una ecuación trascendente que se resuelve por métodos iterativos, estando $\tanh kh$ tabulado para distintos valores de h/L_0 .

Por lo tanto

$$\frac{h_1}{L_0} = \frac{7}{126,36} = 0,0554 \Rightarrow \tanh Kh_1 = 0,5577 \Rightarrow L_1 = 70,47m \Rightarrow C_1 = 7,83m/s$$

$$\frac{h_2}{L_0} = \frac{10,5}{126,36} = 0,0831 \Rightarrow \tanh Kh_2 = 0,6595 \Rightarrow L_2 = 83,34m \Rightarrow C_2 = 9,26m/s$$

Luego el ángulo crítico es:

$$\alpha_{crit} = \arcsin \frac{C_1}{C_2} \approx 58^\circ$$

La incidencia del oleaje en el puerto de Sagunto es tal que, si se mantuviera la dirección considerada en la entrada del modelo matemático, formaría un ángulo con el canal de 31° en el caso de oleaje del E, y de 65° en el SE.

La figura 9 muestra como el oleaje del SE llega al canal con un ángulo de 65° siempre y cuando no se alterara su dirección de entrada. Este ángulo es de por sí bastante próximo al crítico, pero en realidad lo es aún más ya que, como se observa en la figura 10, por efecto de la batimetría el oleaje tiende a rolar hacia el este, lo que hace que el ángulo de incidencia en el canal sea algo menor que el considerado, explicándose así la importante concentración de energía, ondas atrapadas, entre el borde del canal y el dique.

La figura 11 resalta este hecho mostrando el importante aumento que registra el coeficiente de agitación en la zona señalada. Esto podría resultar alarmante si en lugar del manto de escollera que hay en dicha zona se tratara, por ejemplo, de una línea de atraque.

Si se considera la solución alternativa descrita anteriormente, puede apreciarse como el efecto del dragado es menos notable que en el caso del oleaje de levante. Se ha visto que en la situación actual, con el oleaje del SE, la mayor parte de la energía se concentra entre el borde del canal y el dique, disipándose a lo largo de la escollera de éste sin llegar al interior de la dársena. La obra de dragado hace que el ángulo de incidencia del oleaje en el canal esté más alejado del crítico, por lo que ahora la concentración de energía en aquella zona es menor. Esto se traduce en un ligero aumento de la energía que penetra en el puerto y de la que continúa propagándose hacia la costa. Las figuras 12 y 13 ilustran lo comentado en este último párrafo.

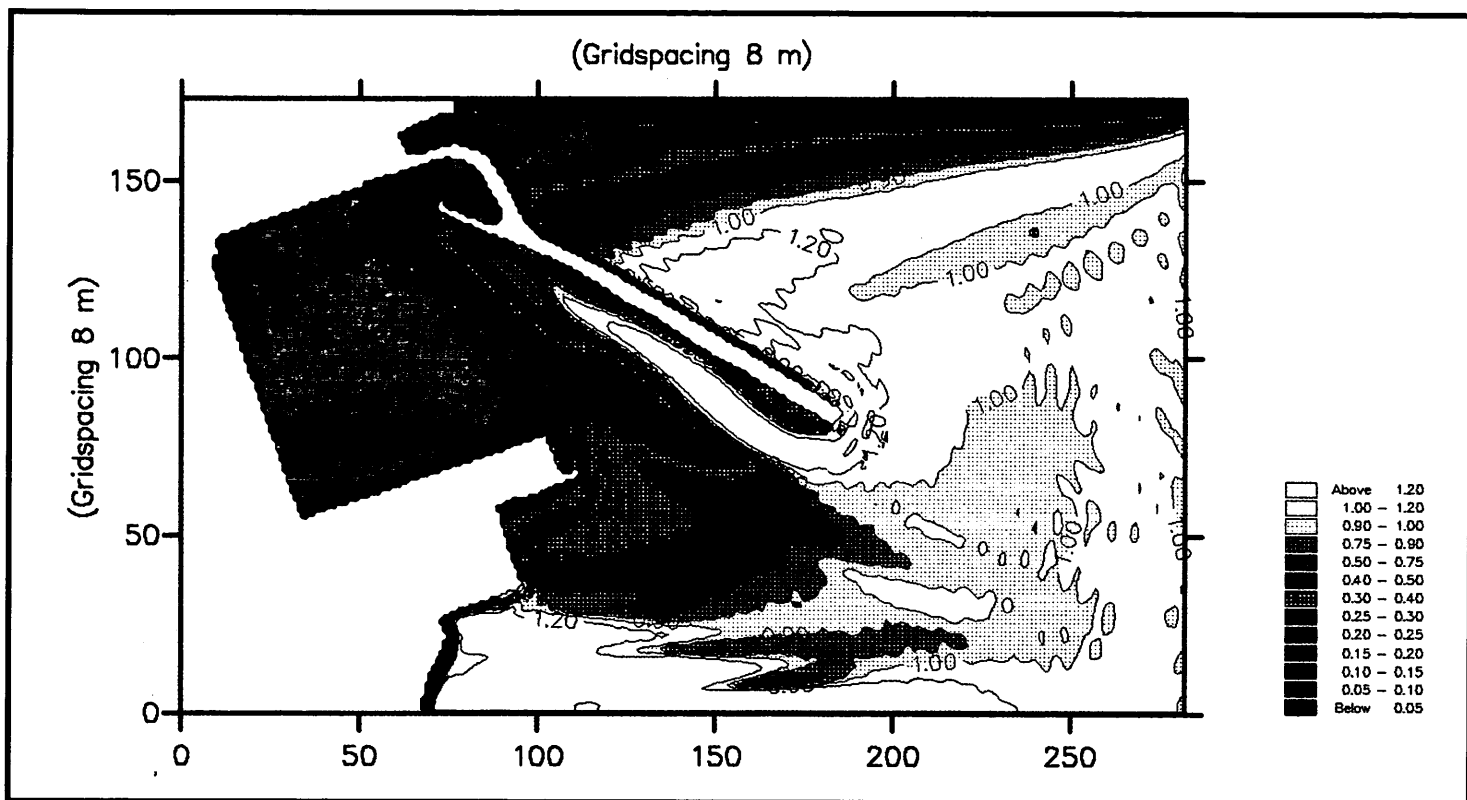


Figura 11. Coeficientes de agitación en la situación actual. Oleaje SE.

Conclusiones

De todo lo expuesto anteriormente pueden extraerse dos conclusiones fundamentales, una de carácter particular referente al puerto de Sagunto,

y otra cuyo ámbito de aplicación es general. Estas conclusiones son las siguientes:

- El principal efecto producido por la obra de dragado en el puerto de Sagunto es disminuir

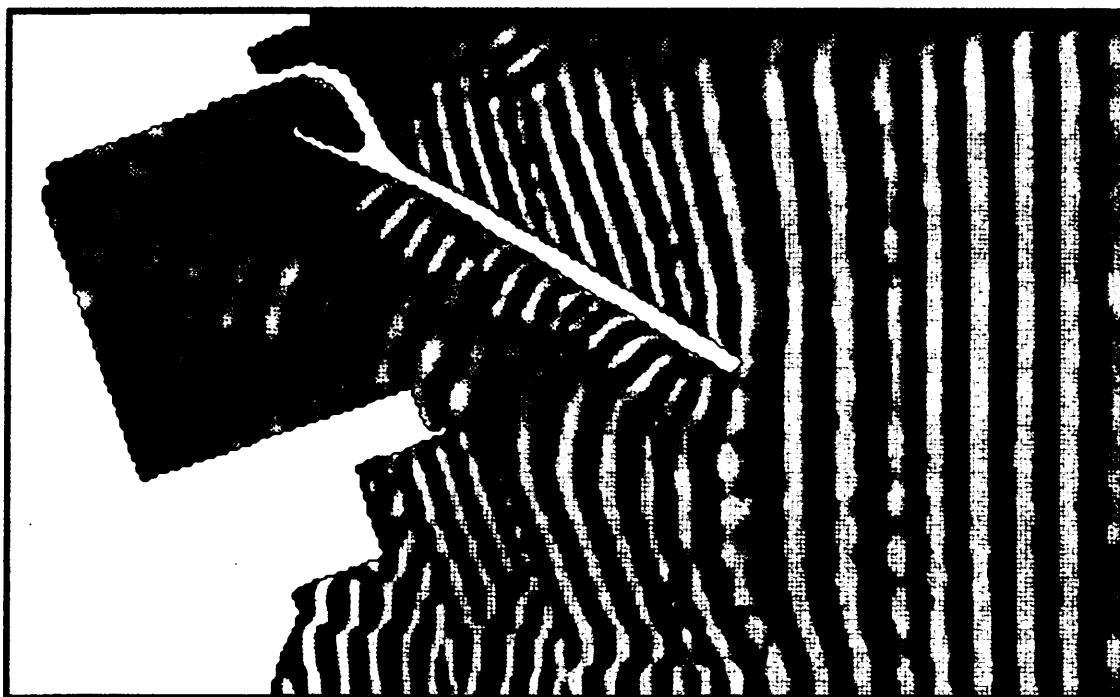


Figura 12. Propagación del oleaje de dirección SE tras la realización del dragado.

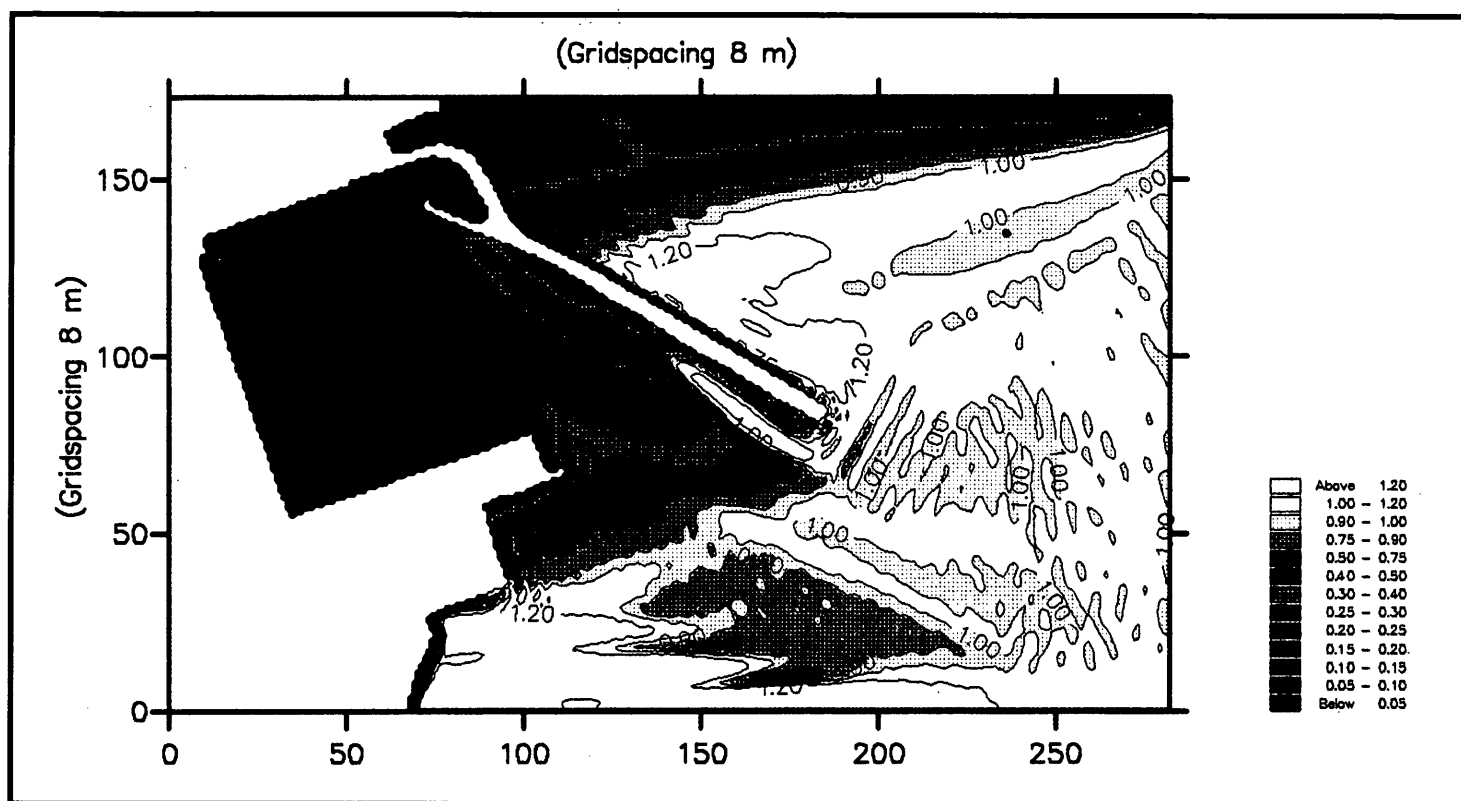


Figura 13. Coeficientes de agitación obtenidos después del dragado. Oleaje SE.

considerablemente la refracción del oleaje en la zona próxima a la bocana y morro del dique, gracias a lo cual la mayor parte de la energía del oleaje continúa su propagación sin penetrar en el puerto. Esto ocurre fundamentalmente con oleaje de levante, que es el que tiene una mayor contribución al estado de agitación global del puerto.

■ Se ha visto que cuando el oleaje incide en el canal de entrada a un puerto con direcciones próximas al ángulo crítico correspondiente, se produce un fenómeno de reflexión en el borde del canal que da lugar a la aparición de ondas atrapadas con la consiguiente concentración de energía. Este hecho se traduce en que las alturas de ola se amplifican en dicho borde y disminuyen al alejarse del mismo.

Así pues, podría ocurrir que una obra de dragado, que en principio se realiza para mejorar la situación de un puerto, diera lugar a concentraciones de energía en zonas destinadas a líneas de atraque o de maniobra de buques, con el consiguiente perjuicio para la explotación portuaria.

Por lo tanto, dada la sensibilidad de los puertos con respecto a las obras de dragado, se recomienda que cualquiera de ellas que se vaya a lle-

var a cabo sea analizada previamente para determinar su posible repercusión en la agitación del puerto.

Agradecimientos

Este artículo se desarrolló cuando el autor prestaba sus servicios como Director de programa en el Sector de Estudios Portuarios del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC) del CEDEX. Vaya pues mi más sincero agradecimiento a todos los miembros del mencionado Sector por su valiosa colaboración y ayuda, tanto para la realización del Estudio que sirvió de punto de partida al presente trabajo como para la propia elaboración del mismo.

Bibliografía

- Bakker W.T.**, 1983. Class Notes OE 661. Department of Ocean Engineering, University of Hawaii.
- Iribarren J.R. y Gómez Pina G.**, 1987. Ampliación del Puerto Autónomo de Valencia. Ensayos de Agitación. Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX.
- Martínez Aranzábal J.**, 1993. Estudio de Agitación en el Puerto de Sagunto. Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX.
- Martínez Aranzábal J.**, 1994. Optimización del Dragado del puerto de Sagunto. Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX.
- Svendsen I.A. and Jonsson I.G.**, 1976. Hydrodynamics of Coastal Regions. Technical University of Denmark.
- Zwamborn J.A.** Wave Attenuation and Cocnetration Associated with Harbour Approach Channels. Coastal Engineering Conference, Chapter 120. ■