

EVALUACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PARALELO A LA ORILLA EMPLEANDO OBSERVACIONES VISUALES DE OLEAJE Y TEORIA CNOIDAL DE ONDAS

J. M. GRASSA (*)

RESUMEN. El cálculo del transporte de sedimentos paralelo a la orilla precisa como dato básico las características del oleaje en el punto de rotura.

En muchos casos en la práctica de la Ingeniería de Costas, las Observaciones Visuales de Oleaje (OV) reportadas por barcos en ruta son el único dato disponible. La predicción de las principales características del oleaje en el punto de rotura a partir de estos datos implica el uso de una teoría de ondas o algún criterio empírico. Este trabajo trata de la aplicación de la teoría cnoidal de ondas a las evaluaciones de transporte a lo largo de la costa a partir de OV, señalando las principales diferencias cuantitativas y cualitativas que se observan con relación a la aplicación de otras teorías y fórmulas empíricas.

Finalmente, se estudia un caso práctico empleando las formulaciones descritas.

ABSTRACT. Longshore sediment transport evaluations requires, as a basic input data, knowledge of the wave characteristic at the breakpoint.

In many cases in coastal engineering practice, wave observations made by ships are the only reliable wave data to be used. Prediction of the main wave parameters at the breakpoint from this deep water wave data implies the application of a wave theory or some empirical criteria. This piece of work deals with the application of cnoidal wave theory for this fundamental step in longshore transport evaluations, pointing out the main differences when compared with transport results, obtained using other theories and empirical formulas.

Finally, a practical case is studied using the described formulations.

1. INTRODUCCION

Las observaciones visuales (OV) de oleaje tomadas por barcos en ruta y recopiladas por instituciones meteorológicas constituyen la fuente más amplia de información disponible para la caracterización del clima marítimo en la mayoría de los casos que se presentan en la práctica profesional de la ingeniería de costas.

La contrapartida a la abundancia de datos es la escasa calidad que en ocasiones presentan y las incertidumbres que plantea su interpretación.

Las OV han sido empleadas en el cálculo del transporte de sedimentos paralelo a la orilla mediante la ecuación del CERC (6) en función de la

altura y oblicuidad del oleaje en aguas profundas, posiblemente la única ecuación de transporte computable manualmente:

$$Q = k H_o^{2.5} \cos^{0.25} \alpha_o \sin (2 \alpha_o) \quad (1.1)$$

siendo Q el volumen transportado, k una constante y H_o , α_o la altura de ola significativa y oblicuidad en aguas profundas.

Esta ecuación es deducible a partir de la básica expresión en función del flujo de energía del oleaje en rotura:

$$Q = k (E C_g)_o \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (1.2)$$

siendo $(E C_g)_o$ el flujo de energía del oleaje en el punto de rotura, α_b la oblicuidad y k una constante.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Jefe de la sección de Estudios Litorales del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX).

La ecuación (1.1) se obtiene aplicando las siguientes hipótesis adicionales:

- La energía E en rotura viene dada por la teoría lineal.
- La celeridad de la onda C , y la celeridad de grupo C_g , son iguales y toman el valor propuesto por Galvin:

$$C = C_g = (2 g H_b)^{1/2} \quad (1.3)$$

(este valor es superior al que predice la teoría lineal en un 25 %, si se considera el criterio de rotura de McCowan).

- El coeficiente de shoaling toma el valor:

$$K_s = 1,30 \quad (1.4)$$

- El coeficiente de refracción es igual a:

$$K_r = (\cos \alpha)^{1/2} \quad (1.5)$$

Con ello se consigue deducir una fórmula sencilla y fácil de aplicar con las OV. Sin embargo, pueden aparecer algunas imprecisiones debido a:

- Aplicabilidad de la teoría lineal en el punto de rotura.
- Valor de la celeridad de grupo, C_g . El valor propuesto es un 25 % superior al que resulta de la teoría lineal (supuesto de aplicación el criterio de rotura de McCowan) y en consecuencia no consistente con la asunción previa.
- Constancia del coeficiente de shoaling. Cabe pensar que este valor sea función, en primera aproximación, del peralte del oleaje. Por tanto, el valor propuesto puede conducir a errores en determinados casos.
- Valor del coeficiente de refracción. El valor considerado restringe la aplicación de la ecuación (1.1) a casos de reducida oblicuidad en rotura.

Además, la ecuación (1.1) no puede tener en cuenta la influencia de otros factores en la tasa de transporte, tales como:

- Período del oleaje.
- Tamaño de los sedimentos.
- Pendiente de la playa.

Finalmente, la ecuación (1.1) no puede en forma alguna proporcionar una idea sobre la distribución transversal del transporte.

Por otra parte, cálculos de transporte realizados en diversos puntos de la costa mediterránea española mediante esta sencilla formulación han dado en general resultados por exceso respecto a los que cabía esperar en base a los datos disponi-

bles sobre la cinemática en esas mismas zonas. Un trabajo del CEPYC (6) llegó a proponer la siguiente relación:

$$Q_{\text{medido}} = 0,76 Q_{\text{calculado}} \quad (1.6)$$

comparando los resultados de (1.1) con acrecciones experimentadas en playas apoyadas en algunos diques.

Los oleajes que arriban a las costas mediterráneas españolas se caracterizan por poseer períodos muy reducidos, siendo 5 o 6 segundos las cifras más frecuentes, debido a las limitaciones de longitud de fetch que impiden el desarrollo de períodos mayores y a las características de los vientos.

Teniendo en cuenta la influencia del período del oleaje en la magnitud del flujo de energía, cabe esperar que oleajes de período reducido y elevado peralte transporten menos que los de mayor período.

Esta diferencia, sin embargo, puede ser relativamente reducida, ya que al aumentar el peralte del oleaje, la oblicuidad en rotura se incrementa, produciéndose un efecto compensatorio en la tasa de transporte.

Las limitaciones expuestas de la ecuación (1.1) han justificado la realización de un trabajo en el CEPYC (9), con la finalidad de aplicar directamente la ecuación (1.2), u otras formulaciones basadas en las características del oleaje en rotura, directamente con las OV, esperando que ello produzca estimaciones de transporte más precisas y sensibles.

Los pasos principales en el trabajo han sido:

- Aplicación de diferentes teorías de ondas para la predicción de los parámetros del oleaje en rotura a partir de OV.
- Aplicación de diferentes criterios de rotura.
- Aplicación de diversas formulaciones de transporte.
- Comparación de resultados.

El presente resumen trata principalmente de la aplicación de la teoría enoidal a la predicción de las características del oleaje en rotura y las consecuencias de ello en las tasas de transporte calculadas, discutiendo los resultados y comparándolos con los obtenidos al aplicar otras metodologías.

Es posible argumentar que dada la escasa calidad de las OV e incluso de las formulaciones sencillas de transporte, constituye un esfuerzo desproporcionado intentar aplicar teorías complejas como la enoidal al cálculo del transporte sólido.

Sin embargo, hay algunas razones que lo justifican:

A un primer nivel, un resultado del estudio puede ser el desarrollo de una fórmula simple de transporte, similar a (1.1) pero más precisa en algunos casos particulares, con gran interés para la práctica profesional.

En segundo lugar, es de esperar que en breve plazo, será ampliamente disponible información direccional precisa sobre el oleaje en aguas profundas, existiendo siempre la necesidad de calcular a partir de la misma las características del oleaje en rotura.

2. OBTENCION DE LAS CARACTERISTICAS DEL OLAJE EN ROTURA

2.1. OBSERVACIONES GENERALES

En forma general, las asunciones que permiten predecir las características del oleaje en el punto de rotura a partir de datos en aguas profundas son:

- Irrotacionalidad del vector número de onda, K .
- Conservación del flujo de energía, F .
- Criterio de rotura.

Asumiendo un estado estacionario del campo de oleaje e isotropía del medio de propagación (ausencia de corrientes y difracción).

Estas ecuaciones son relativamente independientes de la teoría de ondas que se emplee y aplicables a una configuración de los fondos arbitraria. En este trabajo y dado su objeto se ha considerado el caso particular de batimetría rectilínea y paralela a la costa, con lo que la ecuación de irrotacionalidad del número de onda se convierte en la Ley de Snell:

$$K \sin \alpha = \text{cte.} \quad (2.1)$$

siendo K el número de onda y α la oblicuidad del oleaje con la costa.

Asimismo, la conservación del flujo de energía se traduce en la simple ecuación:

$$F \cos \alpha = \text{cte.} \quad (2.2)$$

donde F es el flujo de energía del oleaje. ($F = E C_g$, siendo E la energía del oleaje y C_g la celeridad de flujo de la energía.)

En cuanto a criterios de rotura, la mayoría de expresiones propuestas pueden escribirse en la forma adimensional:

$$Hb/Db = f(Kb/D, m) \quad (2.3)$$

donde H es la altura de ola, D la profundidad, m la pendiente del fondo, f una función arbitraria y la minúscula b indica valores en el punto de rotura.

Entre estos criterios tienen particular interés para el presente trabajo aquellos que toman como variable la pendiente, ya que a través de su influencia en las características del oleaje en rotura, se producirá una modificación en la tasa de transporte sólido que puede ser cualitativamente correcta.

Estas ecuaciones deben resolverse de acuerdo con la teoría elegida, que se traducirá en una expresión para el flujo de energía, F (en función de la altura de ola, número de onda, profundidad y frecuencia del oleaje) y una relación de dispersión que ligue la frecuencia, número de onda, profundidad de propagación (en el caso de teoría lineal) y altura de ola (para las teorías cnoidal o de Stokes de orden superior).

A continuación se presentan las relaciones de dispersión y expresiones del flujo de energía para las teorías lineal, stokes 3, cnoidal y onda solitaria.

2.2. TEORIA LINEAL

$$W^2 = G K T^* \quad (2.4)$$

$$F = (1/8)(H)^2 R G (W/K) (0.5 + (K D/S2^*)) \quad (2.5)$$

siendo W la frecuencia, G la aceleración de la gravedad, T^* la función tangente hiperbólica de $(K D)$, R la densidad específica del fluido y $S2^*$ el seno hiperbólico de $(2 K D)$.

2.3. TEORIA STOKES 3 ORDEN

De acuerdo con (10),

$$(W)^2 = G K T^* (1 + B (L)^2) \quad (2.6)$$

$$F = (R G/16)((W)^3 (L)^2/((K)^4 (S^*)^2))$$

$$(4(S^* C^* + K D) + (L)^2 ((S^* C^* + K D)$$

$$(-20(C^*)^6 + 16(C^*)^4 + 4(C^*)^2 + 9)$$

$$/(4(S^*)^6 + S2^* (16(C^*)^4 + 2(C^*)^2 + 9)$$

$$/(4(S^*)^4))) \quad (2.7)$$

siendo los símbolos S^* , C^* y T^* las funciones hiperbólicas seno, coseno y tangente de $(K D)$, B es un coeficiente de valor:

$$B = (8(C^*)^4 - 8(C^*)^2 + 9)/(8(S^*)^4) \quad (2.8)$$

L es la raíz positiva real de:

$$L((L)^2 + B33) = H K/2 \quad (2.9)$$

y $B33$ es un coeficiente de valor:

$$B33 = 3(8(C^*)^6 + 1)/(64(S^*)^6) \quad (2.10)$$

2.4. TEORIA CNOIDAL

Según (13) en el primer orden de aproximación se tiene:

$$(W)^2 = G(K)^2 D(1 + (HA/D)) \quad (2.11)$$

$$F = (RG/16) (H)^2 B/K \quad (2.12)$$

Siendo A y B parámetros función del número de Ursell ($U = H(L)^2/(D)^3$), a través del parámetro elíptico, m y las integrales elípticas de primera y segunda especie, Ke y Ee .

$$U = (16/3) m(Ke)^2 \quad (2.13)$$

$$A = (2/m) - 1 - 3 Ee/(m Ke) \quad (2.14)$$

$$B = (1/(m)^2) ((3(m)^2 - 5m + 2 + (4m - 2)(Ee/Ke)/3 - (1 - m - Ee/Ke)^2) \quad (2.15)$$

2.5. ONDA SOLITARIA

Esta teoría presenta idénticas ecuaciones a las de la teoría cnoidal con el valor del Número de Ursell tendiendo a infinito.

2.6. ALGUNOS ASPECTOS EN EL USO DE ESTAS TEORIAS

La diferencia quizás básica entre estas teorías es la naturaleza de las relaciones de dispersión. La teoría lineal asume que la dispersión se produce tan sólo en el dominio de las frecuencias, mientras que las teorías cnoidal y Stokes de orden superior al segundo consideran dispersión en el dominio frecuencial y de amplitudes. Finalmente, la teoría de la onda solitaria asume que la dispersión se produce únicamente en el dominio de la amplitud, constituyendo de alguna manera el polo opuesto de la teoría lineal.

Un primer aspecto a destacar sobre la aplicación de estas teorías es la diferencia conceptual entre validez matemática y física de cada teoría, como han señalado diversos autores, no garantizando la solución matemática estricta de las ecuaciones planteadas en cada caso el sentido físico de la solución obtenida, en la medida en que se violen las asunciones de partida de esa teoría.

Desde un punto de vista matemático, sólo la teoría lineal es aplicable en todo el dominio de profundidades. Las teorías de Stokes de orden superior quedan restringidas a aguas profundas o de transición y las ondas cnoidales son calculables tan sólo en profundidades relativamente reducidas.

Ninguna de las teorías de onda expuestas en los puntos anteriores es aplicable, desde un punto de vista físico, al punto de rotura. Sin embargo, algunas teorías satisfacen en mayor medida que otras las condiciones que se dan en las cercanías de ese punto.

La teoría más simple aplicable a la deducción de las características de la onda en rotura a partir de datos en aguas profundas o intermedias es la teoría lineal. Ha sido por tanto empleada en multitud de casos para este objeto, obteniendo la altura de ola y oblicuidad de la onda en rotura, necesaria para el cálculo del transporte, a partir de datos de sensores situados en profundidades intermedias y aplicando la teoría lineal entre ese punto y el de rotura o incluso empleando las simplificaciones propias de la teoría lineal para aguas someras.

Sin embargo, la teoría lineal es claramente inadecuada para el estudio de ondas en zonas próximas al punto de rotura, ya que aquí la longitud de onda es mucho mayor que la profundidad y la altura de ola es una fracción apreciable de la misma, contrariamente a las asunciones de partida de la teoría.

La teoría cnoidal asume por el contrario que la longitud de onda es mayor que la profundidad, satisfaciendo al menos una de las características del oleaje cerca del punto de rotura.

Dado que las teorías cnoidal y solitaria no admiten su aplicación a aguas profundas, para su empleo en este caso debe establecerse la constancia del flujo de energía perpendicular a la costa y la validez de la ley de Snell obteniendo sus términos en aguas profundas de acuerdo con otra teoría, por ejemplo la lineal o Stokes de superior orden. Este «acuerdo» entre diferentes teorías ha sido ampliamente analizado en (12), (13) y (14).

Las teorías de Stokes de orden superior al primero, plantean un específico problema de cálculo, al no ser fácil encontrar un procedimiento iterativo convergente para su resolución en pequeñas profundidades, además de su escasa validez desde un punto de vista físico en profundidades reducidas. Tienen sin embargo interés para el tema de este trabajo, ya que permiten predecir el flujo de energía del oleaje en aguas profundas (en las que la teoría cnoidal no es aplicable) con mayor precisión que la teoría lineal.

En el extremo opuesto a la teoría lineal se encuentra la teoría de la onda solitaria, de aplicación relativamente sencilla, pero con sentido físico tan sólo para ondas que rompen con Números de Ursell muy elevados, en general ondas de peralte muy reducido.

2.7. APLICACION DE LA TEORIA CNOIDAL

Hay muy escasos trabajos publicados sobre aplicación de teorías distintas de la lineal para la evaluación del transporte de sedimentos. El trabajo (15), empleando la denominada teoría cnoidal pone de manifiesto los posibles errores que pueden derivarse del análisis convencional de los registros de oleaje obtenidos en aguas poco profundas. El análisis de Fourier puede conducir a subestimaciones importantes de la altura de ola, al ser el oleaje fuertemente no lineal en estas zonas. Problemas similares han sido señalados en (16), que destacan la necesidad de considerar la dispersión en amplitudes que se producen en la zona de rotura.

La diferencia en la predicción de valores en rotura por aplicación de estas diferentes teorías no tiene tan sólo un interés académico. Los valores en rotura que da la teoría cnoidal difieren notablemente de los correspondientes a teoría lineal. Sus notas características son las siguientes:

- Celeridades y longitudes de onda notablemente superiores a las que daría la teoría lineal.

- Oblicuidades en rotura mucho mayores que las dadas por la teoría lineal, de acuerdo con la característica anterior y la Ley de Snell.
- Alturas en rotura superiores a las predichas por la teoría lineal.

La figura 1 se ha realizado tomando los resultados experimentales de (17) sobre celeridades de fase en el punto de rotura para ondas monocromáticas generadas en un canal de ensayos con números de Iribarren entre 0,08 y 0,56, que corresponden a rotura en spilling o a estados intermedios entre spilling y plunging.

Se han calculado para los datos presentados la celeridad de onda de acuerdo con las teorías lineal, cnoidal y según el criterio de Galvín ($C = (2GH)^{1/2}$), representándose los valores de celeridad medida (eje x) y calculada (eje y). Como se ve, la teoría lineal predice valores notablemente inferiores a los medidos, con un error medio del 22 %. El criterio de Galvín por el contrario sobrevalora la celeridad en todos los casos estudiados, con un error medio del 14 %. La teoría de ondas

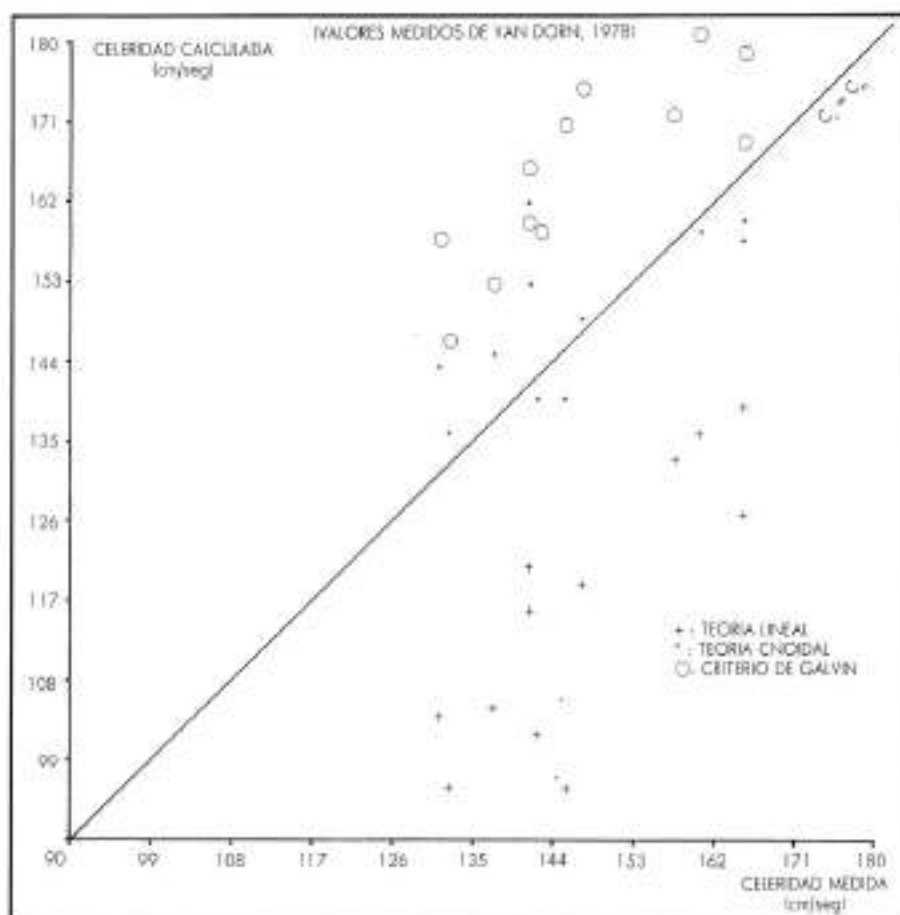


FIGURA 1. Comparación entre valores medidos y calculados de celeridad en el punto de rotura.

solitaria daría resultados aún mayores que los obtenidos con el criterio de Galvin.

La teoría cnoidal se ajusta de forma mucho más precisa a los resultados experimentales, dando un error medio del 3 %, con errores tanto por exceso como por defecto.

Analizando los resultados cnoidales, el error en los resultados de Galvin puede ser explicado teniendo en cuenta que la expresión de Galvin es equivalente a la celeridad de una onda cnoidal con número de Ursell del orden de 2.000, un orden de magnitud mayor que los valores que se dan en los casos estudiados en (18), y asimismo un orden de magnitud mayor que los números de Ursell cerca del punto de rotura para la mayoría de las condiciones de oleaje en las costas mediterráneas españolas.

Este hecho es de la mayor importancia, ya que la ecuación (1.1) del CERC asume en su deducción la expresión de Galvin.

Para valores del número de Iribarren superiores, la corrección de la predicción cnoidal se degradará probablemente en forma notable, ya que en definitiva esta teoría asume ondas simétricas que se propagan sin perder la simetría, lo que puede ser una buena aproximación en el caso de rotura en spilling, pero es claramente inapropiado para la rotura en plunging.

Los trabajos experimentales de (14) confirman que en general, para oleajes que rompen a profundidades adimensionales menores de $KD = 0,63$, la teoría cnoidal proporciona una predicción de la celeridad mucho mejor que la dada por la teoría lineal.

El valor de la celeridad condiciona la oblicuidad de la onda en rotura, que es el aspecto que tiene una mayor influencia en la capacidad de transporte de sedimentos por el oleaje, siendo las diferencias entre teorías de gran importancia para la evaluación lo más aproximada posible del transporte sólido.

Como primera demostración de estas diferencias cuantitativas, las figuras 2, 3 y 4 muestran la cifra de transporte para oleajes de diferentes peraltes, especificando una altura y oblicuidad determinadas, y empleando teoría lineal y cnoidal para su propagación hasta rotura. El transporte llega a ser en este caso más de un 50 % superior para los oleajes de peralte más bajo con propagación cnoidal, disminuyendo la diferencia progresivamente para los oleajes de peralte más elevado que rompen en profundidades adimensionales mayores.

La figura 4 muestra asimismo una de las dificultades del cálculo: para oblicuidad mayor de 54 grados en grandes profundidades no ha sido posible obtener solución cnoidal.

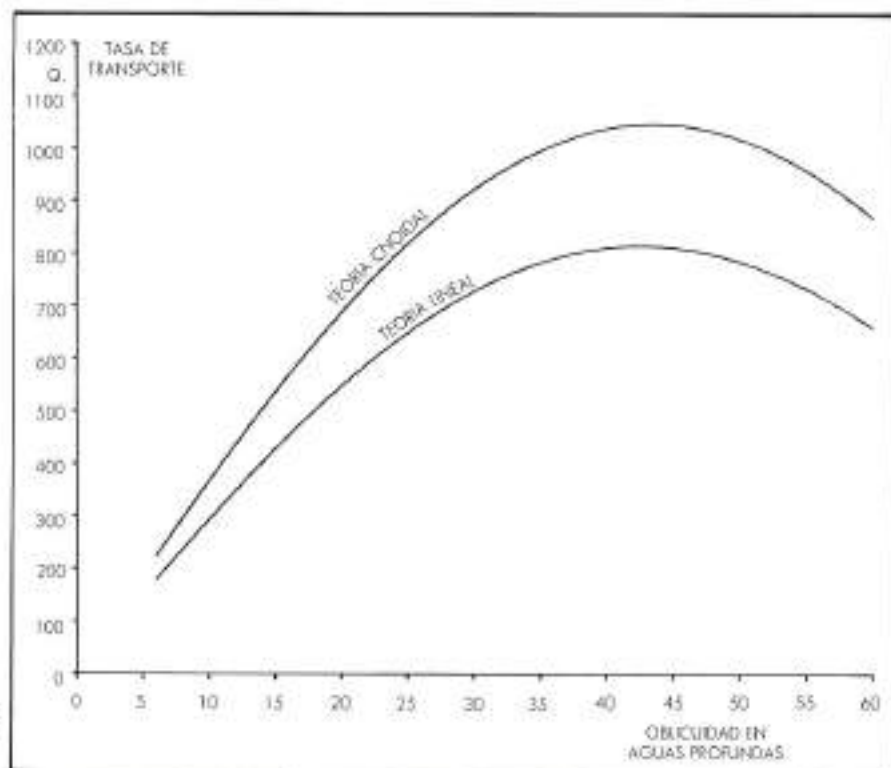


FIGURA 2. Tasa de transporte para teoría lineal y cnoidal.
($H_0 = 1$ m, $T = 5$ seg.)

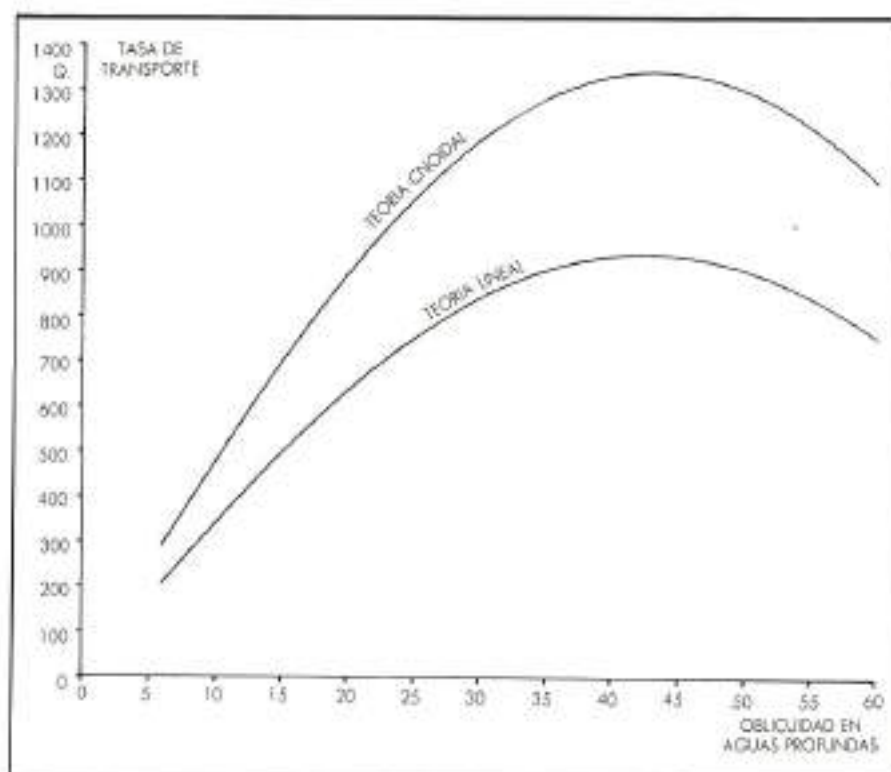


FIGURA 3. Tasa de transporte para teoría lineal y ondul. $H_0 = 1,0$ m, $T = 10$ seg.

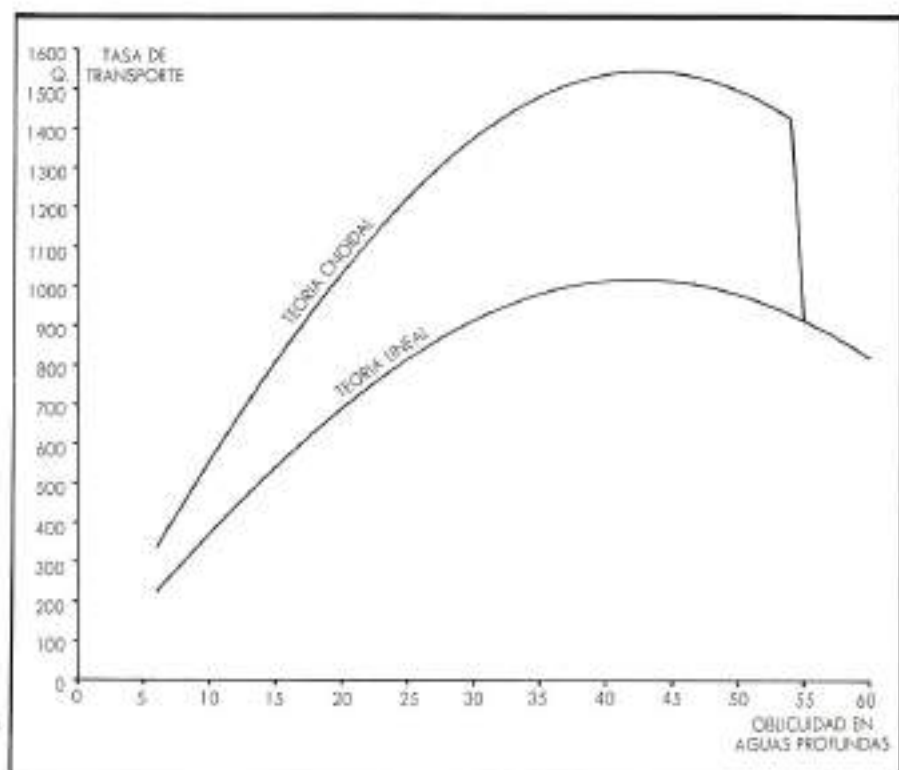


FIGURA 4. Tasa de transporte para teoría lineal y ondul. $H_0 = 1,0$ m, $T = 15$ seg.

Un inconveniente en el uso de la teoría cnoidal es su rango reducido de aplicación (desde un punto de vista de resolución numérica de las ecuaciones). Para números de Ursell muy reducidos ($U < 50$ aproximadamente) la celeridad de la onda puede hacerse imaginaria, al tomar el coeficiente A valores negativos. Sin embargo, en estos casos, que corresponden a ondas que rompen a profundidades adimensionales KD elevadas (oleajes de peralte muy elevado) las teorías de Stokes pueden proporcionar resultados correctos. Las referencias citadas sobre este tema contienen abundantes ejemplos sobre esta problemática.

Además, para valores de U mayores de 10.000, el parámetro elíptico m toma valores tan próximos a la unidad que su diferencia puede quedar fuera del rango de los ordenadores trabajando en simple precisión. Este caso se produce para oleajes de muy reducido peralte.

Para oblicuidades en aguas profundas muy elevadas, la solución cnoidal puede no existir, ya que la oblicuidad correspondiente se hace imaginaria.

Pese a estos problemas, la obtención de las características de una onda cnoidal en el punto de rotura es una tarea abordable con un microordenador en la mayoría de los casos.

La mayor dificultad en el proceso iterativo de cálculo de las características en rotura consiste en la obtención del parámetro elíptico m y las inte-

grales elípticas K_e y E_e para un valor dado del número de Ursell. Para su obtención se ha empleado, en una primera fase, el método de la media aritmético-geométrica (1), que permite obtener las integrales elípticas en función del parámetro elíptico, pasando a emplear finalmente unas aproximaciones polinómicas de la misma fuente (1) que proporcionan aproximaciones de suficiente precisión con menor esfuerzo computacional.

Otro problema que se presenta es la elección de la aproximación inicial. En este caso se ha comprobado que la consideración de la solución lineal como dato de partida no conduce siempre a un proceso convergente, por lo que se ha tomado como aproximación inicial la solución correspondiente a la teoría de ondas solitarias, con resultados satisfactorios.

3. CRITERIOS DE ROTURA

Adicionalmente al empleo de la teoría más precisa posible para la evaluación de las características del oleaje (fundamentalmente la oblicuidad), es preciso establecer una relación adicional (criterio de rotura) entre los parámetros del oleaje que permita localizar su posición.

Ello tiene gran importancia: un criterio que establezca la rotura a profundidades mayores dará como resultado una mayor oblicuidad de la onda en rotura y por consiguiente mayor capacidad de

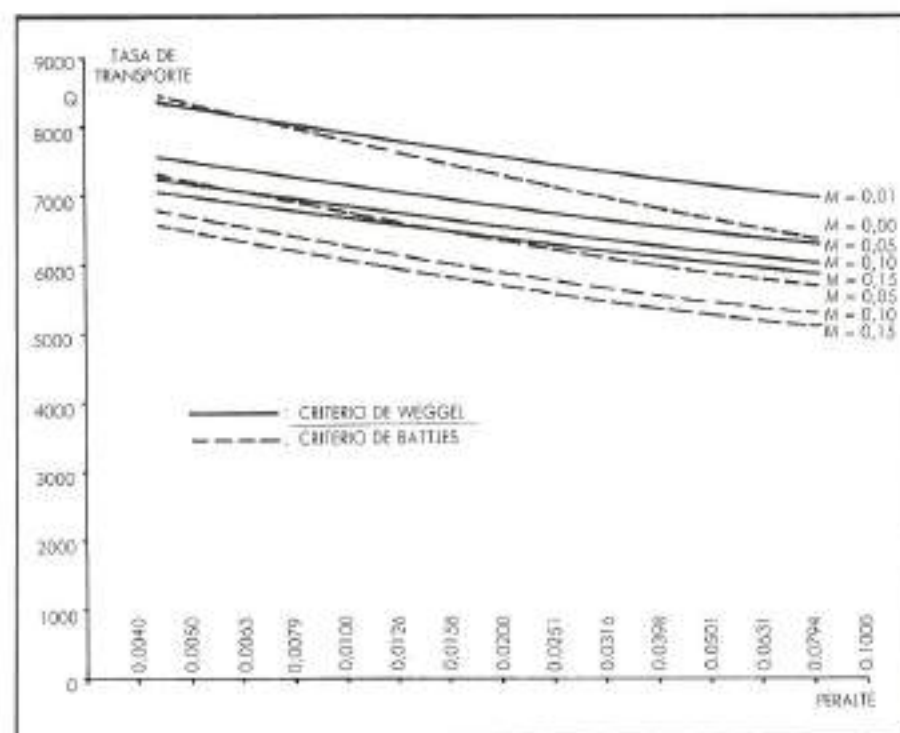


FIGURA 5. Transporte en función del peralte para diferentes pendientes.

transporte para una misma onda, sea cual sea la teoría de ondas que se aplique.

Asimismo, los criterios que tienen en cuenta la influencia de la pendiente en la rotura, desplazan hacia la orilla o hacia el mar el punto de rotura en función de ésta, variando por tanto la oblicuidad por este concepto, con lo que la influencia de la pendiente de playa en el transporte de sedimentos puede ser tenida en cuenta al menos en una forma cualitativa.

Las figuras 5 y 6 han sido realizadas para mostrar este efecto. En 5 se han empleado los criterios de Weggel y Battjes, para calcular el transporte de sedimentos con pendientes de 0, 5, 10 y 15 %, y con unas determinadas condiciones de oleaje en aguas profundas: oblicuidad 70 grados y peraltes (H_0/LO) comprendidos entre 0,004 y 0,100. En la figura se comprueba cómo el aumento de pendiente disminuye la capacidad de transporte, si bien en una cantidad reducida, de acuerdo con la opinión de la mayoría de los expertos.

La formulación de transporte empleada ha sido la clásica:

$$Q = K F b \sin ab \cos ab \quad (3.1)$$

Donde K es una constante.

La figura 5 muestra también un cálculo similar empleando el criterio de Battjes, en función del número de Iribarren. Los resultados para el mismo

conjunto de valores son cualitativamente similares, si bien este criterio muestra una dependencia algo menor respecto a las pendiente de la playa.

En ambos casos se observa cómo el transporte disminuye ligeramente al aumentar el peralte del oleaje.

4. FORMULACIONES DE TRANSPORTE Y TEORIAS DE OLAJE

4.1. DISCUSION DE LAS FORMULACIONES DEL CERC

Teniendo en cuenta las ecuaciones (1.2) y (2.2) e indicando el subíndice «o» aguas profundas se puede escribir:

$$Q = k (E C_g \cos a)_o \sin ab \quad (4.1)$$

Independientemente de la teoría de oleaje que se aplique, y por tanto el único dato que se requiere en rotura para la aplicación de (4.1) es la oblicuidad de la onda.

A partir de la ecuación (1.2) el CERC ha desarrollado y presentado en sucesivas ediciones del Shore Protection Manual (6) una serie de ecuaciones aplicables con diversos conjuntos de datos del oleaje. Estas ecuaciones aceptan algunas de las predicciones propias de la teoría lineal para su deducción, junto a hipótesis empíricas, por lo que es interesante estudiar su grado de coherencia con las teorías de oleaje que aquí se están aplicando.

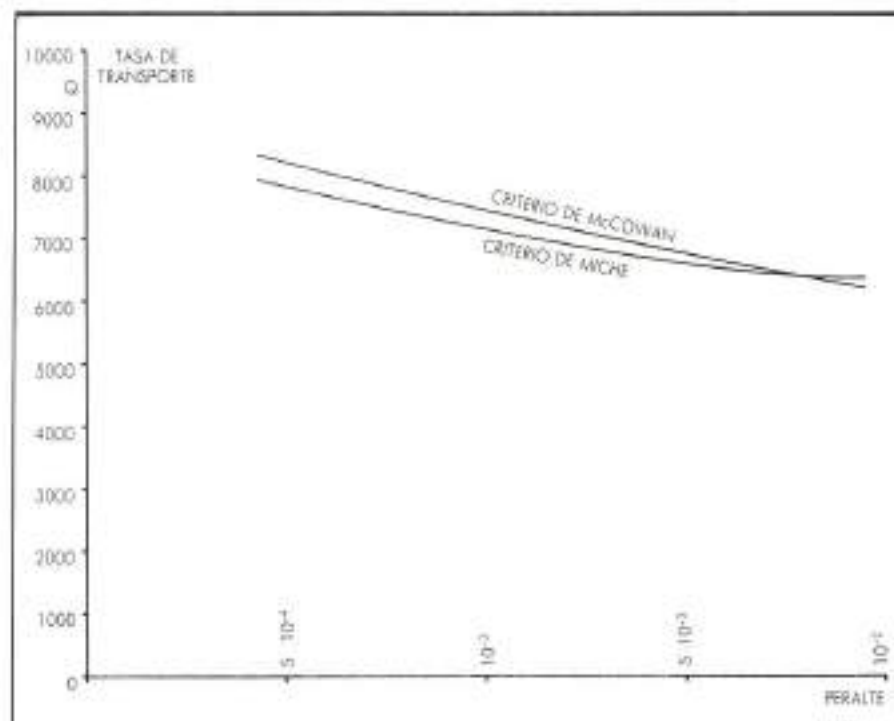
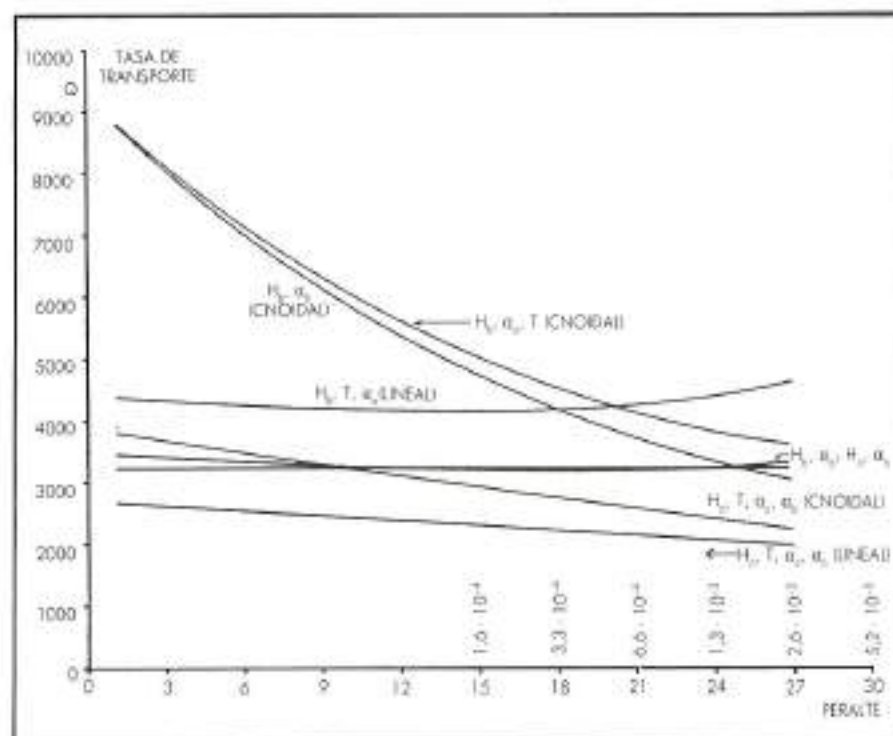


FIGURA 6. Transporte en función del peralte.


 FIGURA 7. ($H_o = 3$ m; $a = 10^\circ$ L)

La figura 7 muestra los resultados de aplicar las cuatro ecuaciones del CERC con datos en aguas profundas propagados hasta rotura conforme a las teorías lineal y enoidal. Como conclusión, las formulaciones del CERC no resultan consistentes con la teoría lineal o enoidal en ningún sentido.

En (8) se han obtenido las expresiones analíticas correspondientes a las diferencias en los resultados de estas formulaciones para el caso de su cómputo en base a valores en grandes profundidades propagados hasta rotura de acuerdo con la teoría lineal. Como conclusión, cabe señalar que las formulaciones del CERC no son coherentes con la teoría lineal y por tanto no es correcto, a partir de datos en profundidades indefinidas, obtener las características en rotura según la teoría lineal y aplicar con ellos otras formulaciones de transporte del CERC distintas de la expresión en función de H_o , a_o , que es la específicamente preparada para su empleo con datos en aguas profundas.

Dado que la teoría lineal no es capaz de predecir correctamente las características en rotura para la mayoría de los casos, la no consistencia de las formulaciones del CERC con ella no debe entenderse en absoluto como una indicación de las limitaciones de las mismas, sino que constituye una buena señal de sus posibilidades.

Cabe por tanto concluir que no es correcto aplicar las formulaciones del CERC distintas de la co-

rrespondiente a H_o , a_o a datos en aguas profundas propagados hasta el punto de rotura según la teoría enoidal o lineal.

Queda por tanto como posibilidad para la aplicación de formulaciones en rotura con observaciones visuales de oleaje las formulaciones primitivas, ecuaciones 4.1 o 4.2. Un primer hecho a destacar es que estas ecuaciones deben aplicarse (9) con la ola de altura media cuadrática, H_{rms} , mientras que las ecuaciones del CERC se computan con la altura significativa, H_s .

Debido al procedimiento empleado para pasar de altura media cuadrática a altura significativa en la obtención de las fórmulas del CERC, éstas dan resultados ligeramente superiores a los de 4.1 o 4.2, para coeficientes equivalentes. En efecto, la transformación consiste (6, pág. 4-96) en dividir por 2 el término P_1 para transformarlo en P_1s , con lo que el nuevo coeficiente k' se hace igual a:

$$k' = k/2 \quad (4.3)$$

La división por 2 es coherente con la relación entre altura visual y altura significativa y la expresión de la energía para la teoría lineal. Sin embargo, si para un mismo oleaje se propaga desde grandes profundidades a rotura la ola significativa y la media, las oblicuidades resultantes en rotura son mayores para la significativa, por lo que en es-



CONSTRUCCION Y SERVICIOS

CAPITAL SOCIAL: 4.140.242.000 Pts.



OBRAS MARITIMAS





CENTRALES ELECTRICAS • AGRONOMIA • OBRAS HIDRAULICAS
• CARRETERAS • PUERTOS Y COSTAS • ARQUITECTURA Y URBANISMO
GEOLOGIA Y GEOTECNIA • MEDIO AMBIENTE • PLANTAS INDUSTRIALES



inypsa

INFORMES Y PROYECTOS, S.A.

INGENIEROS CONSULTORES

MADRID

General Díaz Portier, 41
Teléfono: (91) 400 45 60*
Télex: 42496 inyp E
28001 MADRID

BARCELONA

Gran Vía de Carlos III, 124
Teléfono: (93) 205 08 62
Télex: 97809 inyp E
08034 BARCELONA

tas condiciones la formulación del CERC dará resultados algo superiores a la 4.1 con altura media cuadrática.

En (8), se ha deducido el valor de la desviación de resultados en el caso de aplicación de la teoría lineal. Para el caso de que se pueda considerar que ambas olas, significativa y media rompen en profundidades reducidas ($KD < 0,25$) y con oblicuidades pequeñas, el nuevo coeficiente debería ser:

$$k' = k/2,38 \quad (4.4)$$

En vez de dividido por 2. Por ello, en estas condiciones la formulación del CERC puede llegar a dar resultados un 20 % superiores a la equivalente en función de la altura media cuadrática.

4.2. MODELO DE BAILLARD

El procedimiento expuesto en este trabajo permite el empleo de las OV con cualquier modelo de transporte que tome como datos de partida las condiciones del oleaje en el punto de rotura.

Un desarrollo reciente de gran interés de la ecuación 4.1 ha sido presentado por (2), analizando la dependencia del coeficiente k respecto a la pendiente de playa, velocidad de caída de los sedimentos y oblicuidad de rotura.

Este análisis se ha realizado a partir del modelo generalizado de transporte del mismo autor (3). Ello proporciona adicionalmente una buena justificación teórica a las formulaciones del tipo 4.1. La expresión final para el coeficiente k resulta:

$$k = 0,05 + 2,6 (\sin \alpha)^2 + 0,007 U_{mb}/W \quad (4.5)$$

Siendo U_{mb} la velocidad de pico del fluido junto al fondo asociada al movimiento oscilatorio provocado por el oleaje y W la velocidad de caída de los sedimentos.

El autor ha obtenido este resultado mediante calibración con la mayoría de datos disponibles hasta la fecha. Dentro del trabajo (9) se ha aplicado esta formulación a otros conjuntos de datos de campo no considerados en (2) con excelentes resultados.

Asimismo, es posible discriminar a partir de esta nueva ecuación de transporte los volúmenes transportados por fondo y suspensión. La figura 8 muestra los porcentajes de sedimentos transportados en suspensión en función del cociente U_{mb}/W y α . Estos resultados, cualitativamente correctos, se han obtenido directamente a partir de la expresión propuesta por Bailard.

La posibilidad de separar las cifras de transporte por fondo y en suspensión es trascendental para el correcto contraste de la fórmula con datos de campo, en función del tipo de instrumental empleado para medir el transporte de sedimentos.

La relativa simplicidad de la formulación general de Bailard ha hecho posible su aplicación con los datos visuales para la obtención de la distribución transversal del transporte de sedimentos paralelo a la orilla, constituyendo un sencillo descriptor detallado de esta magnitud.

Las figuras 9 y 10 presentan la aplicación de este modelo más general a una ola, para dos distintos tamaños del sedimento. Su comparación muestra cómo el aumento de tamaño del sedimento incrementa considerablemente la importancia relativa del transporte por fondo.

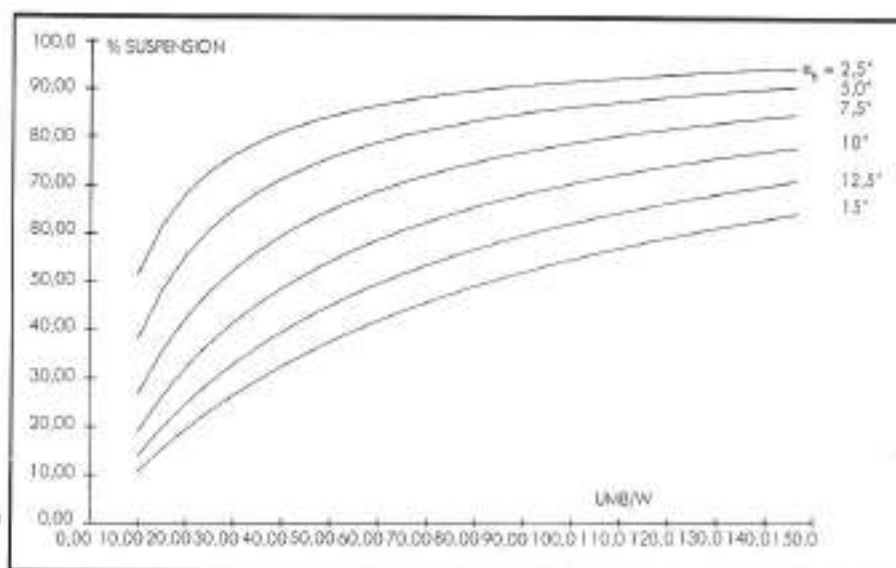


FIGURA 8. Porcentaje transporte en suspensión en función de U_{mb}/W y oblicuidad en rotura.

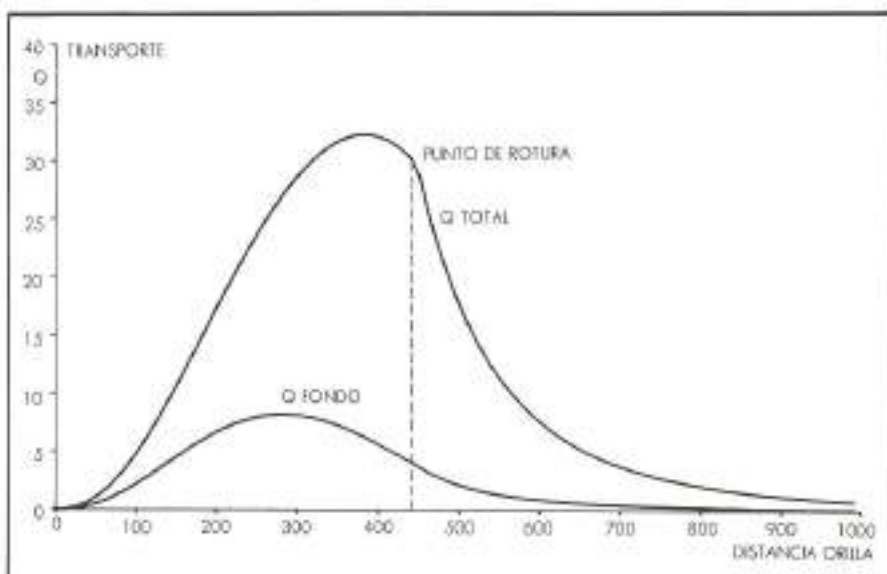


FIGURA 9. Distribución de Boford.
 $H_0 = 3$ m, $T = 10$ seg, $\alpha_0 = 30^\circ$,
 Pendiente = 0,01
 $D_{50} = 0,2$ mm.

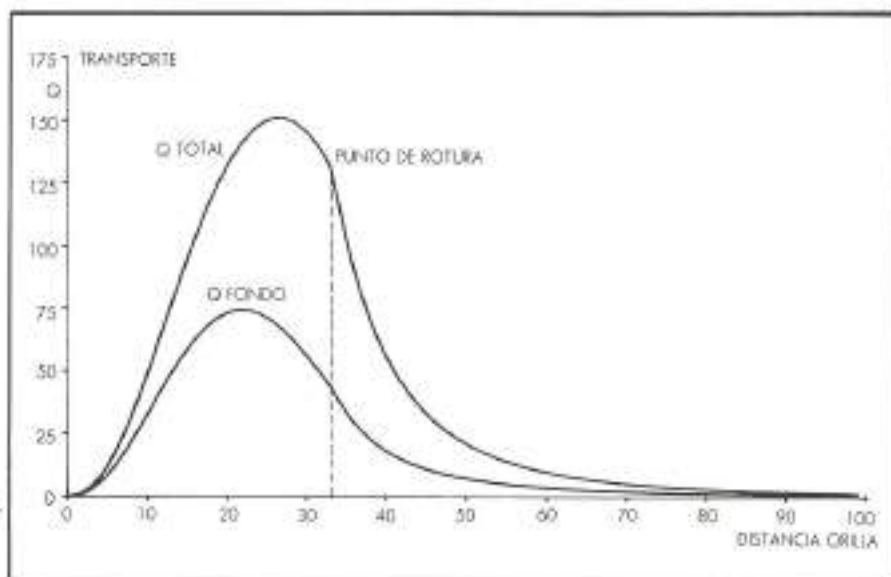


FIGURA 10. Distribución de Boford.
 $H_0 = 3$ m, $T = 10$ seg, $\alpha_0 = 30^\circ$,
 Pendiente = 0,10,
 $D_{50} = 1,5$ mm.

5. APLICACION PRACTICA

Dentro del ámbito del trabajo al que se ha hecho repetida referencia en estas páginas, se ha desarrollado un programa para el cálculo del transporte de sedimentos empleando las OV de oleaje contenidas en el banco de datos del CEPYC y fórmulas simples de transporte. A continuación se van a mostrar los resultados de su aplicación al cálculo del transporte en la costa del Maresme.

El Maresme (véase la figura 11) es un tramo costero con orientación NE-SO que se extiende desde el delta del río Tordera al norte hasta la ciudad de Barcelona al sur.

Este tramo de costa baja, arenosa, está sometida a un clima de oleaje que condiciona un transporte neto de sedimentos hacia el sur.

La construcción en los últimos 50 años (5) de numerosas obras en la costa ha provocado interrupciones en la continuidad del transporte sólido. Al constituir el río Tordera la fuente más significativa de sedimentos del tramo, estas interrupciones han provocado la acumulación de sedimentos al NE de los obstáculos, y las correspondientes erosiones al sur.

En la actualidad, los tramos más al sur del Maresme presentan abundantes zonas en las que la

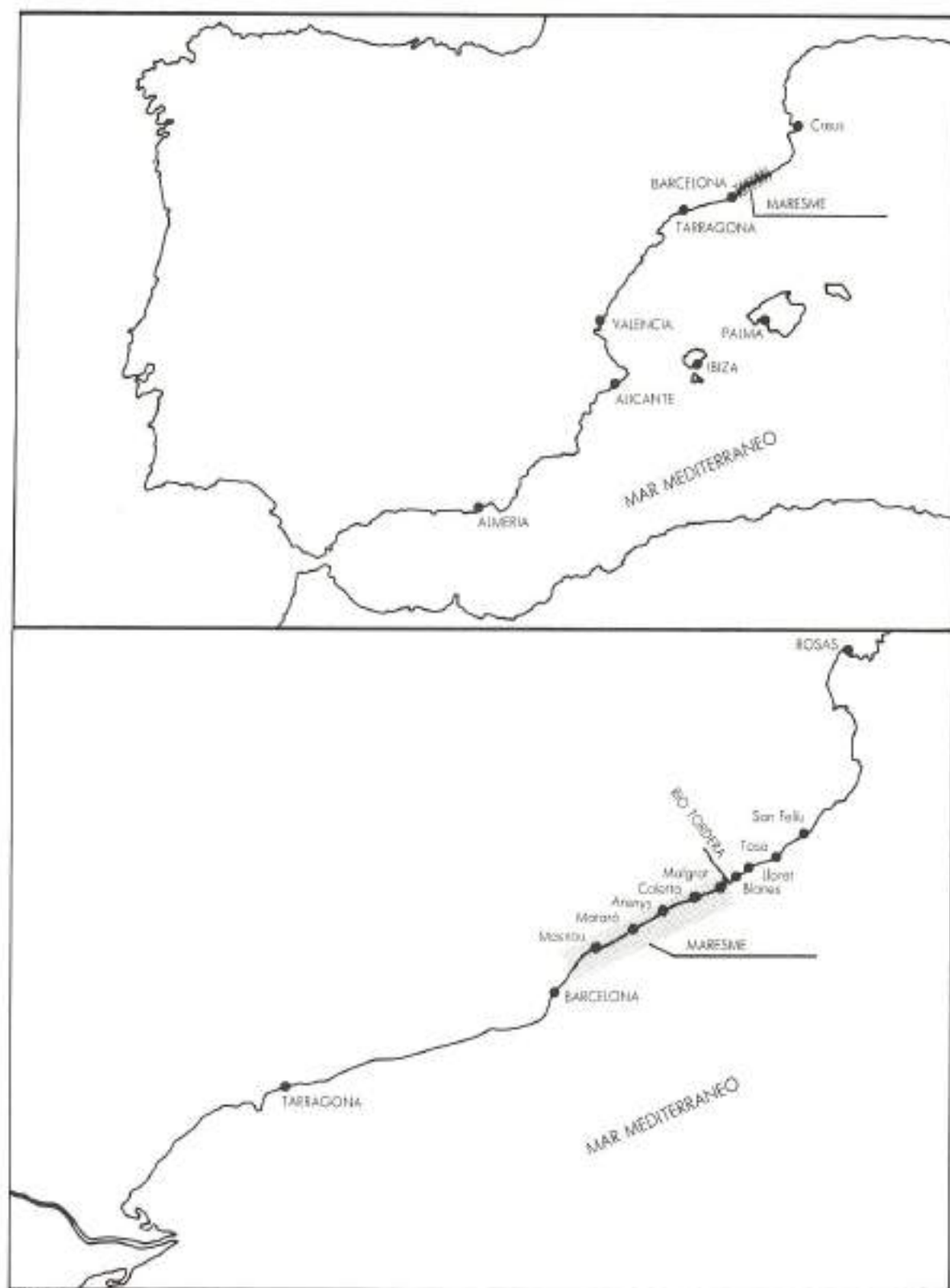


FIGURA 11.

playa ha desaparecido, siendo sustituida por escollos longitudinales de defensa, en un proceso progresivo.

Para paliar estos problemas, la DGPC del MOPU financió en 1986 una importante alimentación artificial en un tramo de cerca de 10 kilómetros al sur del tramo, sin establecer ningún tipo de obras complementarias de retención de los sedimentos. Esta zona de la costa había sido ya estudiada en detalle en (11).

Debido a ello, las sucesivas recargas de arena que serán necesarias para mantener el estado del tramo vendrán condicionadas por el volumen de transporte neto de sedimentos en este tramo de costa.

La alineación de costa en el tramo regenerado es N 67 E-S 67 O. La configuración de la costa implica las siguientes limitaciones de fetch:

Límite Norte: N 67 E

Límite Sur: S 43 O

Se ha tomado como tamaño medio de los sedimentos 0,6 mm y como pendiente de la playa 5 % para el cálculo de la distribución del transporte.

Las OV consideradas han sido tomadas entre los paralelos 40,1 y 40,4 N y entre los meridianos 2,1 y 2,5 E. El número y distribución de las observaciones es el siguiente:

Sea:

Número de calmas: 1.757

Número de válidas: 2.659

Swell:

Número de calmas: 4.276

Número de válidas: 552

Las observaciones son procesadas por el programa en forma individual, para cada dirección, período y altura y conforme a las opciones seleccionadas (formulación de transporte, teoría de propagación, criterio de rotura, etc.) e integradas en una tabla similar a la que se presenta en la Tabla 1.

La Tabla 1 muestra los resultados de la aplicación de la fórmula del CERC en función de H_0 , a_0 a este conjunto de datos. Los resultados de transporte se presentan en forma de tabla alturas-sectores de oleaje (ángulos medidos desde el norte).

En forma resumida, los resultados son:

Transporte bruto: 225.000 m³/año

Transporte neto: 58.000 m³/año

FORMULACION DE TRANSPORTE: CERC EN FUNCION DE H_0 , a_0
TEORIA DE OLAJE: PROPAGACION ONDUL. CRITERIO DE ROTURA: MCCOWAN
NORMAL A LA COSTA: 157. LIMITES DE FETCH: 67. Y 223.
SEA: Frecuencia/Total (%)

	67-90	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223
.5	1.067	1.004	1.042	.301	.990	3.374	1.256
1.0	2.014	.883	.540	.132	.424	1.200	.392
1.5	.556	.181	.045	.011	.035	.045	.009
2.0	.313	.181	.021	.005	.017	.045	.000
2.5	.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.0	.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010
	4.601	2.310	1.445	.449	1.476	4.663	1.756
transporte de sedimentos							
	67-90	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223
.5	1.936	3.182	2.395	130	-1326	-10420	-3274
1.0	10844	14563	4417	323	-3291	-20967	-57888
1.5	8344	8221	1633	71	-728	-2180	-2353
2.0	9519	16898	1565	73	-745	-4476	-1637
2.5	1848	0	0	0	0	0	-2850
3.0	1457	0	0	0	0	0	-2256
	33498	42794	12101	598	-6088	-38044	-18228
transporte bruto = 145230							
transporte neto = 24651							

FORMULACION DE TRANSPORTE: CERC EN FUNCION DE H_0 , a_0
NORMAL A LA COSTA: 157. LIMITES DE FETCH: 67. Y 223.
SWELL: Frecuencia/Total (%)

	67-90	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223
.5	.556	.580	.746	.097	.318	.642	.287
1.0	1.370	.767	.414	.106	.349	.642	.135
1.5	.318	.124	.021	.005	.016	0.000	.009
2.0	.175	.021	0.000	.010	.002	0.000	.009
2.5	.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.0	.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2.430	1.512	1.181	.217	.715	1.284	.440
transporte de sedimentos							
	67-90	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223
.5	.529	1690	1714	.42	-426	-1983	-749
1.0	6841	12978	5387	260	-2649	-11217	-1085
1.5	4713	5047	742	38	-332	0	-365
2.0	5321	1932	0	134	-1303	0	-749
2.5	5670	0	0	0	0	0	0
3.0	1323	0	0	0	0	0	0
	23836	22247	7543	468	-4766	-13290	-3946
transporte bruto = 76191							
transporte neto = 32546							

TABLA 1. Tasas de transporte según (1, 11)

La Tabla 2 muestra el resultado de aplicar la fórmula 4.2 con los datos de oleaje propagados conforme a la teoría cnoidal. De las 565 ondas propagadas, más del 95 % han admitido solución cnoidal. Para las que no la admiten, el programa las computa automáticamente conforme a la teoría lineal.

Los resultados son:

Transporte bruto: 183.000 m³/año
Transporte neto: 48.000 m³/año

En este caso se ha partido de una tabla de OV con datos agrupados en sectores de 30 grados. Para distribuir los datos dentro de cada sector, cada OV se propaga desde 5 puntos distribuidos uniformemente en el sector integrando el resultado según el método de Newton-Cotes.

Pese a la mucho mayor complejidad de los cálculos, los resultados han sido obtenidos en menos de 4 minutos en un microordenador.

Los resultados son notablemente inferiores a los obtenidos aplicando la formulación del CERC, de acuerdo con las argumentaciones realizadas en este trabajo. Es interesante observar la relación entre los valores obtenidos por aplicación de las fórmulas (1.1) y (1.2):

$$Q_{\text{bruto ec. (1.2)}} = 0,81 Q_{\text{bruto ec. (1.1)}} \quad (1.1)$$

$$Q_{\text{neto ec. (1.2)}} = 0,83 Q_{\text{neto ec. (1.1)}} \quad (1.1)$$

Estas relaciones se aproximan notablemente a la relación (1.3) propuesta en (4), y tenderían a indicar el gran interés que puede tener la aplicación de la ecuación (1.2) a los datos visuales de oleaje empleando la teoría cnoidal de ondas para su propagación hasta rotura.

Sin embargo, hay que señalar que este caso presentado es probablemente muy poco adecuado para la validación de la metodología propuesta. En el Maresme, los oleajes más importantes por alturas y frecuencias de presentación provienen de direcciones con oblicuidades extremadamente elevadas respecto de la costa, lo que hace dudar de la capacidad predictiva de las formulaciones. Será por tanto necesario contrastar los resultados para otros puntos de la costa mediterránea española.

Finalmente se ha aplicado la fórmula de Bailard, obteniendo los resultados de la Tabla 2, que en forma resumida son los siguientes:

Transporte bruto: 350.000 m³/año
Transporte neto: 149.000 m³/año

Estas cifras son muy superiores a las obtenidas anteriormente, debido precisamente a la depen-

FORMULACION DE TRANSPORTE: EQ. (1.2)							
TEORIA DE OLAJE: PROPAGACION CNOIDAL. CRITERIO DE ROTURA: MCCOWAN							
NORMAL A LA COSTA: 157. LIMITES DE FETCH: 67. Y 223.							
SEA Frequencies (Total (%))							
	67-90.	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223
.5	1.667	1.064	1.042	.301	.990	1.374	1.256
1.0	2.014	.883	.340	.132	.404	1.200	.390
1.5	.556	.181	.045	.011	.035	.045	.069
2.0	.313	.181	.023	.005	.017	.045	.020
2.5	.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.0	.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010
	4.601	2.310	1.449	.449	1.476	4.666	1.756
transporte de sedimentos							
	67-90.	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223
.5	1479.	2760.	2006.	108.	-1111.	-9014.	-2977.
1.0	9531.	11608.	3399.	236.	-2421.	-16181.	-4731.
1.5	7154.	6127.	1165.	47.	-487.	-1739.	-1956.
2.0	7978.	11674.	1065.	46.	-468.	-3674.	-1357.
2.5	1649.	0.	0.	0.	0.	0.	-2363.
3.0	1321.	0.	0.	0.	0.	0.	-1729.
	29112.	32172.	7595.	437.	-4487.	-30639.	-14914.
transporte bruto = 119346.							
transporte neto = 19268.							
FORMULACION DE TRANSPORTE: EQ. (1.2)							
TEORIA DE OLAJE: PROPAGACION CNOIDAL. CRITERIO DE ROTURA: MCCOWAN							
NORMAL A LA COSTA: 157. LIMITES DE FETCH: 67. Y 223.							
SWELL Frequencies (Total (%))							
	67-90.	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223
.5	.556	.580	.746	.097	.318	.642	.387
1.0	1.370	.767	.414	.106	.349	.642	.135
1.5	.318	.124	.021	.005	.016	0.000	.009
2.0	.175	.021	0.000	.010	.032	0.000	.009
2.5	.095	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.0	.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2.430	1.512	1.181	.217	.715	1.384	.440
transporte de sedimentos							
	67-90.	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223
.5	523	1521.	1493.	55.	-356.	-1712.	-680.
1.0	6308.	11142.	3587.	195.	-1996.	-8836.	-1664.
1.5	4198.	4447.	503.	38.	-263.	0.	-400.
2.0	4714.	1335.	0.	99.	-1019.	0.	-534.
2.5	4720.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
3.0	1099.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	21563.	19444.	5942.	354.	-3636.	-10551.	-3278.
transporte bruto = 63767.							
transporte neto = 28840.							

TABLA 2. Tasas de transporte según (1.2).

FORMULACION DE TRANSPORTE BAILARD NORMAL A LA COSTA: 157. LIMITES DE FETCH: 67. Y 223. SWELL Frecuencia/Total (%)							
67-90	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223	
.5	.556	.580	.746	.097	.318	.642	.267
1.0	1.270	.787	.414	.106	.349	.642	.135
1.5	.318	.124	.021	.005	.016	0.000	.009
2.0	.175	.021	0.000	.010	.032	0.000	.009
2.5	.095	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.0	.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.430	1.512	1.181	.217	.715	1.284	.440	
transporte de sedimentos							
67-90	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223	
.5	.784	.240	.103	.9	-.147	-.206	-.139
1.0	12232	20069	4045	.50	-.694	-.13659	-.1797
1.5	9642	10035	689	.7	-.126	0	-.420
2.0	11049	.3963	0	.26	-.514	0	-.1734
2.5	9829	0	0	0	0	0	0
3.0	3157	0	0	0	0	0	0
46193	36469	5749	.91	-.1779	-.15745	-.7190	
transporte bruto = 115216 transporte neto = 65769							
FORMULACION DE TRANSPORTE BAILARD TEORIA DE OLAJE PROPAGACION ENOIDAL CRITERIO DE ROTURA MCCOWAN NORMAL A LA COSTA: 157. LIMITES DE FETCH: 67. Y 223. SEA Frecuencia/Total (%)							
67-90	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223	
.5	1.667	1.064	1.047	.301	.993	1.374	1.256
1.0	2.014	.883	.340	.132	.434	1.200	.390
1.5	.556	.161	.045	.011	.035	.045	.039
2.0	.313	.181	.023	.005	.017	.045	.020
2.5	.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.0	.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014
4.661	2.310	1.449	.449	1.476	4.865	1.756	
transporte de sedimentos							
67-90	90-120	120-150	150-157	157-180	180-210	210-223	
.5	.3478	.4246	1324	.16	-.457	-.10316	-.5186
1.0	22543	24309	2832	.37	-.1258	-.25363	-.11508
1.5	17535	15127	1219	.8	-.298	-.2476	-.4735
2.0	21230	33469	1304	.8	-.319	-.4679	-.3504
2.5	3735	0	0	0	0	0	-.5956
3.0	2832	0	0	0	0	0	-.4907
70373	77151	6799	.69	-.2231	-.42935	-.35785	
transporte bruto = 235374 transporte neto = 73271							

TABLA 3. Modelo simple de Bailard.

dencia del coeficiente k respecto a la oblicuidad (ecuación 4.5), que en este caso es elevadísima. Cabe por tanto dudar de la aplicabilidad de 4.5 a este caso tan extremo.

Se ha aplicado también la formulación más general de Bailard, con los siguientes resultados:

Transporte bruto: 235.000 m³/año

Transporte neto: 91.000 m³/año

Que no se diferencian de los anteriores tanto como la formulación simplificada de Bailard.

No es posible en este caso comprobar cuál de las cifras obtenidas es la más precisa, si bien los resultados del seguimiento de este tramo que en la actualidad desarrolla el CEPYC sobre la evolución del tramo proporcionarán en breve información complementaria al respecto.

La Tabla 3 muestra la distribución transversal del transporte obtenida aplicando la formulación generalizada de Bailard. Es destacable la reducida distancia a la orilla a la que se produce el transporte de sedimentos. Debido a las pequeñas alturas de ola, la práctica totalidad del transporte se desarrolla entre la orilla y la batimétrica: 3 metros.

6. CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo, cabe resaltar las siguientes consideraciones:

1. Las observaciones visuales de oleaje pueden ser aplicadas para el cálculo del transporte de sedimentos paralelo a la orilla con formulaciones de transporte que emplean parámetros del oleaje en rotura, siempre y cuando la predicción de estos valores en rotura se haga mediante una teoría de oleaje aplicable en las cercanías del punto de rotura, como la enoidal.
2. Es posible afirmar que la predicción de estas características según la teoría lineal conducirá a resultados erróneos en la mayoría de los casos.
3. No es posible aplicar a las OV otras formulaciones del CERC que no sean las que toman como datos la altura y oblicuidad en aguas profundas.
4. El modelo de Bailard es una poderosa herramienta para los estudios de transporte de sedimentos, pudiendo proporcionar fácilmente una idea sobre la distribución del transporte perpendicular a la costa. Sin embargo, las diferencias obtenidas en este caso deben ser estudiadas.

Adicionalmente, queda un cierto número de cuestiones para futuros trabajos:

1. Aplicación y contraste del procedimiento de

cálculo presentado en otros puntos de la costa y contraste con observaciones de campo.

2. Consideración de la fricción en la obtención de las características en rotura.

3. Consideración de otras formulaciones de transporte, como las de Bijker (3) y Deigaard (7).

4. Investigación sobre la aplicación conjunta de datos escalares de boyas registradoras con distribuciones direccionales obtenidas mediante OV.

5. Generalización del programa para cálculo sobre batimetrías realistas, considerando las componentes de transporte de oblicuidad, variación de altura de ola a lo largo de la costa y variación de la oblicuidad.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo cuyos resultados presenta este artículo ha sido financiado por la DGPC del MOPU.

A lo largo de numerosas conversaciones, el doctor Antonio LECHUGA, Jefe del Sector de Costas del CEPYC, ha aportado al autor numerosas ideas que han enriquecido el trabajo. Asimismo, ha revisado los sucesivos avances del trabajo. Se desea agradecer especialmente esta colaboración.

Don Alfredo Hernández ha colaborado en el desarrollo de los programas de ordenador, facilitando la obtención de las OV de la base de datos del CEPYC.

Finalmente, se agradece al Profesor Felipe MARTINEZ, Director del CEPYC, su apoyo durante la realización del trabajo.

BIBLIOGRAFIA

1. ABRAMOWITZ y STEGUN, 1964, «Handbook of mathematical functions and tables», Dover.
2. BAILLARD, J. A., 1984, «A simplified model for longshore sediment transports», Proc. 19th Conf. Coastal Eng., ASCE, N.Y.
3. BAILLARD, J. A., 1981, «An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach», Journal of Geophysical Research, Vol. 86 No. C11, pp. 10.938-10.954.
4. BLIKER, E. A., 1971, «Longshore transport compu-

tations», Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering, ASCE, Vol. 97, No. WW4, Nov., 1971, pp. 687-701.

5. CEPYC, 1978, a, «Estudio de Dinámica Litoral de la Costa Peninsular Mediterránea y Onubense: Provincias de Barcelona y Girona» (no publicado).

6. CEPYC, 1978, b, «Estudio de Dinámica Litoral de la Costa Peninsular Mediterránea y Onubense: Provincias de Alicante, Valencia y Castellón» (no publicado).

7. CERC, 1984, «Shore Protection Manual», Department of the Army, Corps of Engineers.

8. DEIGAARD, R., FREDSOE, J. y HEDEGAARD, I. B., 1986, «Mathematical model for Litoral Drift», Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 112, No. 3, May, 1986.

9. GRASSA, J. M., 1987, «Observaciones visuales de oleaje y transporte sólidos», Centro de Estudios de Puertos y Costas (no publicado).

10. KOMAR, P. D. e INMAN, D., 1970, «Longshore sand transport on beaches», Journal of Geophysical Research, Vol. 75, No. 30.

11. LE MEHAUTE, B. y WEBB, L. M., 1964, «Periodic gravity waves over a gentle slope at a third order of approximation», 9th Conf. on Coastal Eng., ASCE, N.Y.

12. LECHUGA, A. y ALMENAR, J., 1983, «Estudio de dinámica litoral para el Plan de Ordenación del tramo de costa comprendido entre el embarcadero de Premiá de Mar y el Puerto Deportivo de Masnou», Centro de estudios de Puertos y Costas (no publicado).

13. SKOVGAARD, O. y PETERSEN, M. H., 1977, «Refraction of Cnoidal Waves», Coastal Engineering, 1, pp. 43-61.

14. SVENDSEN, I. A., 1974, «Cnoidal waves over a gently sloping bottom», Ins. Hydrodyn. Hydraul. Eng. (ISVA), Tech. Univ. Denmark, Lyngby, S.P., 6.

15. SVENDSEN, I. A. y BUR HANSEN, J., 1977, «Deformation up to breaking of periodic waves on a beach», Proc. 15th Conf. Coastal Eng., Honolulu, Hawaii, ASCE, N.Y.

16. SWART, D. H. y FLEMING, C. A., 1980, «Longshore water and sediment movement», Proc. 17th Conf. Coastal Eng., ASCE, N.Y.

17. THORNTON, E. B. y GUZA, R. T., 1982, «Energy saturation and Phase speeds Measured on a natural beach», Journal of Geophysical Research, Vol. 87, No. C12.

18. VAN DORN, W. G., 1978, «Breaking invariants in shoaling waves», Journal of Geophysical Research, Vol. 83, No. C6.


 PEDIDOS: Contra reembolso ☐ — Cheque adjunto ☐
TRANSPORTATION NOISE REFERENCE BOOK

 Nelson, P. —3372—
 1987 ed. 450 págs. 17.278 pts.

CONTENIDO: Introduction and physical assessment. The effects of transportation noise on man. Road traffic noise. Train noise. Aircraft noise. Decision making and transport noise control. Environmental appraisal and economic instruments.

CREEP AND SHRINKAGE OF CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES

 Šmerda, Z. —7341—
 1988 ed. 300 págs. 19.504 pts.

CONTENIDO: Experimental findings and discussion on creep and shrinkage. Theoretical and practical prediction of creep and shrinkage. Analysis at cross-sectional level. Analysis of structures with fully acting cross-sections. Structural members and structures in which cracks may develop. Effects of shrinkage and creep on structures and measures to be adopted to minimize their unfavourable influence.

MANAGING CONSTRUCTION WORLDWIDE. 3 Vols.

Lansley, P.R. —9374— 22.578 pts.

VOLUME 1: SYSTEMS FOR MANAGING CONSTRUCTION. 1987 ed. 635 págs.

Serving the client: Some strategic questions. Results from research. The developing countries. Competition and co-operation. Planning for industrial development. Planning and scheduling. Planning and controlling resources, especially finance. Etc.

VOLUME 2: PRODUCTIVITY AND HUMAN FACTORS IN CONSTRUCTION. 1987 ed. 500 págs.

Factors influencing productivity. New tools for productivity. The state of the art and new concepts. Productivity on site. Organisation and environment: the company. Organisation. Environment and the projects. Etc.

VOLUME 3: CONSTRUCTION MANAGEMENT AND ORGANISATION IN PERSPECTIVE. 1988 ed. 295 págs.

GEOTECHNICAL MODELING AND APPLICATIONS.

 Sayed, S.M. —9920—
 1987 ed. 457 págs. 9.328 pts.

CONTENIDO: Geotechnical engineering. Modeling the behavior of geomaterials. Dynamics of porous media. Static and cyclic response of interfaces for analysis and design of soil-structure interaction problems. Stress, degradation, and shear strength of granular material. Analysis of shallow foundation. Static and dynamic analyses of axially and laterally loaded piles and pile groups. Etc.

HYDROLOGIC FREQUENCY MODELING.

 Singh, V.P. —5054—
 1987 ed. 645 págs. 17.490 pts.

CONTENIDO: Flood frequency analysis. Empirical flood frequency models. Mixed distributions. Rainfall frequency analysis. Entropy in flood frequency analysis. Parameter estimation. Selection of flood frequency models. Multivariate stochastic models. Indexes.

PARKING. Handbook of environmental design.

 McGluskey, J. —20619—
 1987 ed. 278 págs. 11.660 pts.

CONTENIDO: Introduction. The local environment. Parking in residential areas. Parking and urban areas. Parking and shopping. Parking in the countryside. Definition of terms. Surface materials. Cleaning surfaces. Petrol interceptors. Kerb heights and sections. Material for delineating parking stalls. Slope retention and retaining walls. Vehicle characteristics. Volume of parking provision. Surface car parking: layout dimensions. Parking for the disabled. Bus and coach facilities. Lorry parking. Parking in housing schemes. Etc.

BUS AND COACH OPERATION. 5.^a ed.

 Faulks, R.W. —7216—
 1987 ed. 259 págs. 9.328 pts.

CONTENIDO: Historical background. The infrastructure. Vehicle design. Organization and management. Statutory controls. The planning process. Commercial practices. Schedule compilation. Fare collection. Operational control. Finance. The future.

COMPUTER IN RAILWAY MANAGEMENT.

 Murthy, T.K.S. —3909—
 1987 ed. 224 págs. 11.236 pts.

COMPUTERS RAILWAY OPERATIONS.

 Murthy, T.K.S. —3913—
 1987 ed. 336 págs. 15.052 pts.

CONNECTIONS IN STEEL STRUCTURES. Behaviour, Strength and Design.

 Bjorhovde, R. —9039—
 1988 ed. 398 págs. 11.130 pts.

CONTENIDO: Local analysis of joints. Mathematical models. Classification. Frame analysis. Frame stability and simplified methods. Design requirements. Data base organization. Research and development needs.

ESTUDIOS NUMERICOS DE AGITACION INTERIOR

IGNACIO BERENGUER PEREZ (*)

RESUMEN. La fiabilidad de un estudio depende básicamente de los datos empleados y de la fiabilidad de las técnicas empleadas.

El punto de partida de los estudios de perturbaciones en los puertos es la información obtenida sobre la ola a partir de las observaciones visuales de aguas profundas o por medidas realizadas en las proximidades de la costa. En el caso primero hay que propagar la información hacia el punto de interés con modelos de refracción si se desea obtener un mejor conocimiento de las características de la ola a la entrada al puerto. En ambos casos son muy útiles las relaciones entre las alturas de olas medidas y observadas para obtener una idea aproximada de sus características direccionales.

Según esto se puede valorar la perturbación en el puerto utilizando modelos numéricos incluyendo la reflexión, difracción, refracción y efectos del «shoaling». Existirá una garantía en el caso de que el modelo se haya calibrado frente a modelos físicos pero la garantía completa se obtendrá cuando la calibración del modelo se realice con datos reales. Dos de los objetivos principales de un puerto son las maniobras y el atraque seguro de los barcos. Las técnicas numéricas apoyan las simulaciones del comportamiento de los barcos dentro del puerto haciendo disponible las estimaciones más fiables de la capacidad de maniobra para diferentes tipos de barcos en distintas condiciones.

ABSTRACT. *The reliability of a study depends basically on the data employed and on the reliability of the study techniques.*

Harbor disturbance studies starting point is the wave information obtained from deepwater visual observations sets of data or from buoy measurements in the vicinity of the coast. In the former case information must be propagated towards the point of interest with refraction models, if we want a best knowledge of wave characteristics at the entrance of the harbor. In both cases relationships between measured and observed wave heights are useful to obtain an approximate idea of directional characteristics of waves.

Thereafter, harbor disturbance can be evaluated using numerical models including reflection, diffraction, refraction and shoaling effects. There will be a guarantee in the case that the model has been calibrated against physical models, but the complete guarantee will be obtained when the calibration of the model is carried out with real data.

Ship safe mooring and manoeuvring are two of the main purposes of a harbor. Numerical techniques support simulations of the behaviour of ships inside harbor installations making available more reliable estimations of the ability of manoeuvring for different types of ships in various conditions.

1. DESCRIPCION GENERAL

La fiabilidad de todo estudio de ingeniería marítima depende, aparte de las técnicas utilizadas, de la propia fiabilidad de los datos de la naturaleza empleados. En el caso de estudios de agitación la acción principal es el oleaje y, generalmente, los

datos de oleaje han sido tomados en zonas alejadas a la de estudio, por lo que es necesario modelizar previamente la aproximación de ese oleaje hasta la zona en la que vamos a comenzar el estudio de agitación.

En el interior de una instalación portuaria los fenómenos que mayor incidencia tienen en la propagación del oleaje son diferentes a los que gobiernan su propagación por mar abierto. Por ello los modelos para simular una y otra fase de la propagación son distintos.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de la División de Estudios Portuarios del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX).

Primeramente es la refracción, el shoaling y la fricción los fenómenos que alteran las características del oleaje en tanto que posteriormente difracción y reflexiones se incorporan como fenómenos más importantes.

Por ello en el CEPYC-CEDEX los estudios de agitación se dividen en las dos fases mencionadas, empleándose distintos modelos numéricos.

2. SIMULACION DE LA APROXIMACION DEL OLAJE

El modelo empleado está basado en la publicación del Laboratorio de Hidráulica de Delft realizada por J. C. W. Berkhoff titulada «Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Water Waves».

En ella se parte de la formulación general de la onda lineal que utiliza las ecuaciones de continuidad y de movimiento en forma euleriana de un fluido ideal.

La ecuación de la continuidad está basada en el principio de la conservación de la masa, o del volumen cuando la densidad es constante. Este principio enuncia que el cambio de masa en un volumen fijado por unidad de tiempo es igual al cambio de masa en el mismo volumen debido al cambio de densidad más el flujo de masa por unidad de tiempo a través de la superficie exterior del mencionado volumen.

Las ecuaciones del movimiento están basadas en el principio de Newton que especifica que el cambio de cantidad de movimiento en un volumen por unidad de tiempo iguala a la fuerza total actuando en ese volumen.

Sobre estas ecuaciones se aplican las consideraciones de que la masa permanece constante, que el fluido es homogéneo (densidad constante) y que el movimiento del fluido es irrotacional, con lo cual se llega a la ecuación de continuidad para un fluido incompresible y homogéneo (ecuación de Laplace), y a la ecuación del movimiento de Bernoulli sometida al campo gravitatorio, en la forma que a continuación se incluye:

$$\Delta \Phi = 0 \text{ siendo } V = \nabla \Phi$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) + \frac{p}{\rho} + g \cdot z = 0$$

Para resolver estas ecuaciones desconociendo la función potencial Φ y la presión p es necesario dar las condiciones de control en el dominio de solución.

Una primera condición asume que la elevación de la superficie libre es $z = \eta(x, y, t)$ y que para una partícula de ella es válida la siguiente condición cinemática:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$$

$$z = \eta(x, y, t).$$

Una segunda condición es que la presión en la superficie es la atmosférica y por tanto $p = 0$.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) + g \eta = 0; z = \eta(x, y, t).$$

Una tercera condición se establece por la consideración de que el fondo es impermeable y por tanto que la velocidad perpendicular a él es nula.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0; z = -h(x, y).$$

El hecho de que las dos primeras condiciones son no-lineales y que éstas se impongan sobre una no conocida superficie libre, hace muy difícil encontrar una solución para este problema. Por ello es conveniente linealizar las condiciones de contorno por medio de un desarrollo en serie con respecto a un parámetro pequeño (pendiente de oleaje: $\gamma = H/L_0$).

Una vez linealizadas las ecuaciones es posible buscar una solución a ellas que sea armónica en el tiempo del tipo:

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_1(x, y, z)$$

$$\cos \omega t + \Phi_2(x, y, z) \sin \omega t$$

siendo ω la frecuencia angular del oleaje. Esta expresión se puede también enunciar $\Phi = \Phi_1 + i\Phi_2$, siendo $\Phi = \text{Re}(\Phi e^{-i\omega t})$ que ha de cumplir la condición

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0 \quad z = 0.$$

Si lo que deseamos es encontrar una formulación para el fenómeno de la refracción hemos de asumir una variación suave del fondo y que la variación de potencial existente en el plano horizontal carece de importancia comparada con la existente en el vertical.

Tras una serie de manipulaciones matemáticas se llega a obtener las coordenadas de la ortogonal, en función de la distancia a lo largo del rayo, la fase y la amplitud.

Con este modelo y a partir de una batimetría definida en una malla rectangular (ver figura 1), se pueden propagar los ortogonales del oleaje disponiendo de cuatro alternativas:

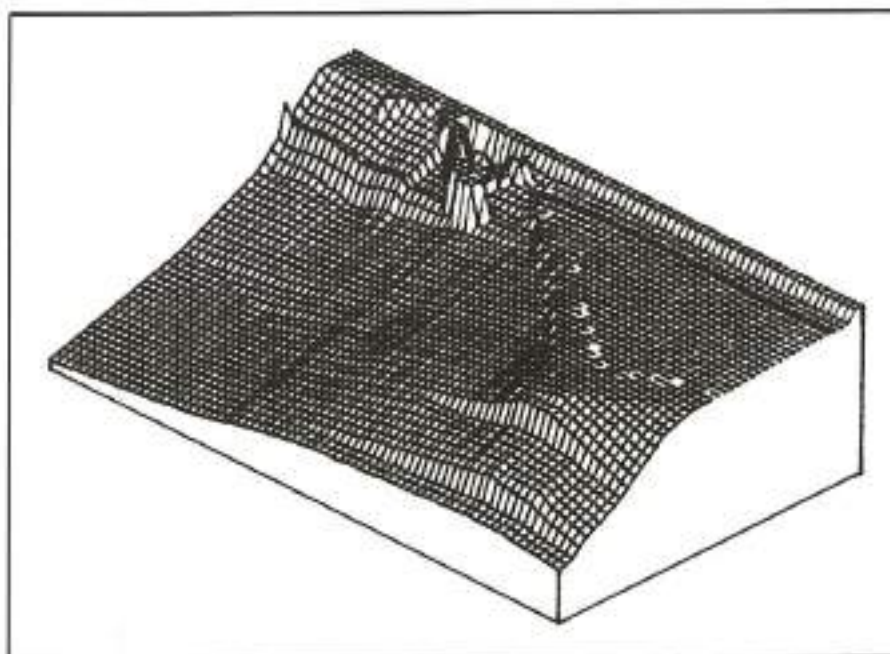


FIGURA 1. Representación tridimensional de la batimetría.

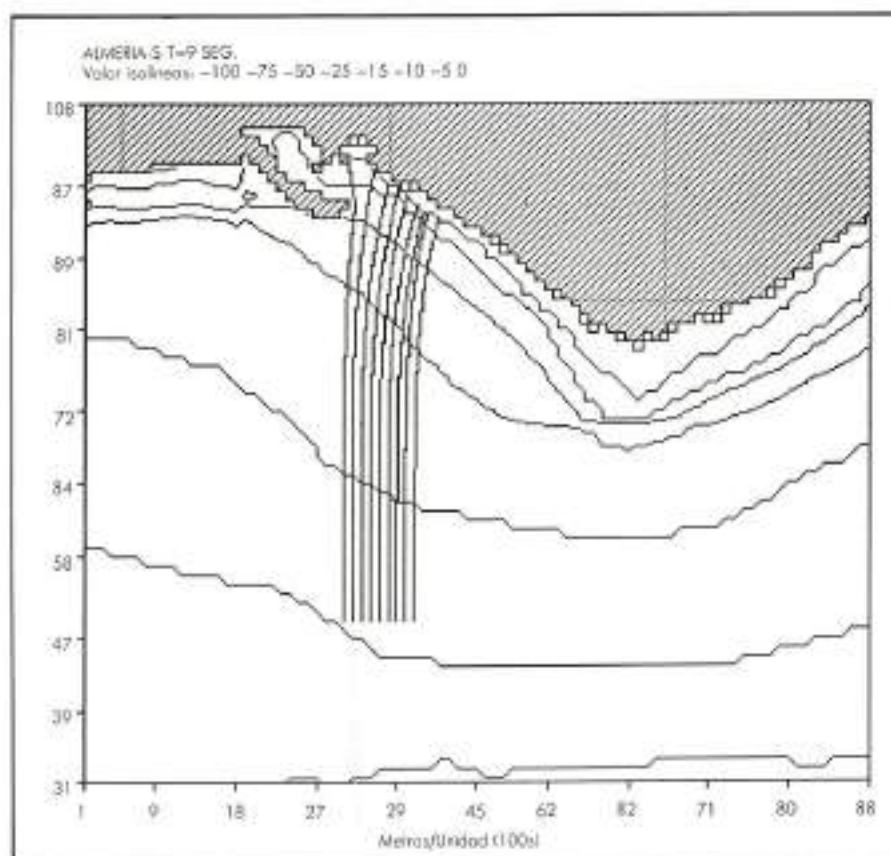


FIGURA 2. Propagación de las ortogonales del corte.

- Propagación de un frente de oleaje.
- Propagación desde un punto con distintas direcciones.
- Propagación desde un punto con distintos períodos.
- Propagación desde un punto con distintas direcciones y períodos.

De esta propagación se puede obtener una representación gráfica (figura 2) o una salida impresa de los resultados archivados.

Es posible realizar un tratamiento de los resultados obtenidos del modelo de refracción con objeto de que los valores específicos obtenidos en lugares puntuales sirvan para caracterizar de modo uniforme la agitación en toda la zona o en una parte de ella. Ello se consigue a través de promedios en zonas rectangulares de dimensiones varias o por medio de una nueva descomposición de una zona de estudio por medio de una malla.

3. ESTUDIOS DE AGITACION INTERIOR

Dentro de los métodos numéricos de propagación de flujos el más completo y exacto existente actualmente es el S'21 MK.8, desarrollado por el Danish Hydraulic Institute y adquirido en España por el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.

El modelo matemático System 21 Mark 8 (S'21 MK.8) es un sistema de modelación numérica para las variaciones del nivel del agua y de flujos en estuarios, bahías, puertos y áreas costeras.

Simula flujos bidimensionales de distribución vertical homogénea a partir de la batimetría y de otras condiciones auxiliares relevantes en cada caso (coeficientes de resistencia, campos de vientos, condiciones hidrográficas en los contornos, etcétera).

El S'21 MK.8 resuelve las ecuaciones, integradas verticalmente, de conservación de volumen o masa y de cantidad de movimiento (ecuaciones de St. Venant).

A lo largo de los diques se utiliza una porosidad menor que la unidad para simular una reflexión parcial de las ondas cortas.

La porosidad y los términos de Boussinesq, así como términos correctores del error de truncamiento de un orden mayor para el esquema en diferencias finitas, son sólo aplicadas en simulaciones de ondas cortas o de pequeña amplitud.

La solución del sistema de ecuaciones se consigue finalmente por medio del algoritmo de doble barrido (una especial forma de la conocida eliminación Gaussiana).

Aunque el S'21 está basado en lo que esencialmente son ecuaciones para aguas poco profundas,

se ha comprobado que también proporciona buenas soluciones para ondas de tipo intermedio cuya razón H/L (profundidad/longitud de onda) sea menor o igual a 0,2.

El rango teórico de aplicación de las ecuaciones utilizadas en el S'21 MK.8, como fue determinado por Abbott, Petersen y Skorgaard (1978), se muestra en la figura 3.

El S'21 MK.8.HD se puede aplicar al estudio de los siguientes problemas tipo:

- Propagación del oleaje en el interior de instalaciones portuarias incluyendo los efectos de refracción, difracción, reflexión y con oleajes regular e irregular.
- Investigación de resonancias en puertos y zonas costeras.
- Propagación de la onda de marea.
- Simulación y predicción de tormentas y huracanes.
- Condiciones hidrodinámicas en estudios de contaminación y sedimentación.
- Condiciones hidrodinámicas de recirculación salina o calórica.

Por lo que se refiere a entradas, es decir, al oleaje con el que queremos resolver el modelo, admite oleajes tanto de tipo regular, con cualquier combinación de altura y período, como irregular, bien sea por medio de series temporales o por medio de un espectro o distribución energético-frecuencial del oleaje de la que a su vez se obtendrá una serie temporal.

Las salidas primarias del S'21 son la elevación de la superficie del agua y la velocidad del flujo medio en dos direcciones ortogonales, para cada uno de los puntos de la malla que constituyen el modelo.

A partir de esta salida primaria se pueden conseguir gran cantidad de formas de presentación de resultados.

El proceso seguido en el CEPYC-CEDEX para la realización de una simulación con el modelo consta de las siguientes actuaciones:

FASE I: Preparación de la simulación.

- Elaboración de una batimetría por medio de una malla rectangular (ver figura 4).
- Elaboración de un mapa de porosidades en la misma malla.
- Elaboración de un mapa de eddy coefficients en la misma malla.
- Elaboración de un mapa de nivel de super en la misma malla.
- Elaboración de un mapa de resistencias de fondo en la misma malla.

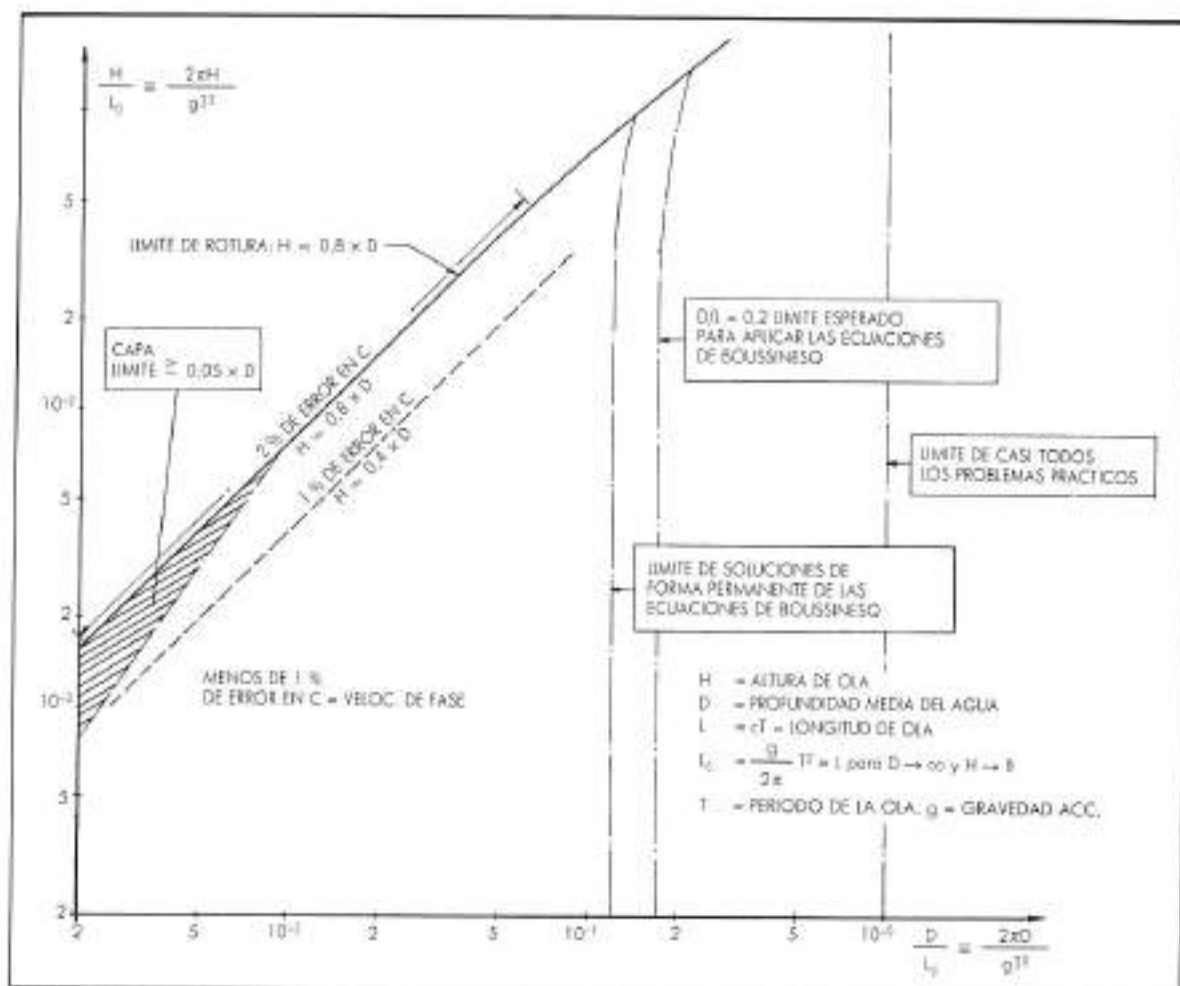


FIGURA 3. Rango de validez de las ecuaciones de S'21 (Abbot et al. 1978).

— Preparación mediante la unidad de inicialización del modelo del archivo de entrada a la unidad de computación.

FASE II: Ejecución de simulación.

— Utilizando como fuente de datos el archivo antes mencionado se ejecuta la unidad de computación de la cual se obtienen una serie de archivos de datos.

FASE III: Presentación de resultados.

Aparte de poder obtener una salida impresa del modelo, los resultados del mismo pueden ser expuestos de forma gráfica.

Con criterio general vamos a distinguir tres tipos de representaciones gráficas de resultados según que éstas se realicen en una, dos o tres dimensiones.

A. Representaciones unidimensionales.

Como ejemplos podemos citar:

- Elevación de la superficie libre en todo momento de la simulación en un punto situado en el interior de un puerto sometido a oleaje (registro de oleaje en un punto) (figura 5).
- Elevación de la superficie libre en todo momento de la simulación en un punto situado en un estuario sometido a la acción de la marea (onda de marea en un punto).
- Módulo de velocidad de flujo en un punto durante toda la simulación.
- Dirección del flujo en un punto durante toda la simulación.
- Elevación de la superficie libre en un instante dado en todos los puntos de una recta situada en el interior del modelo coincidente con la malla.

B. Representaciones bidimensionales.

Como ejemplos podemos citar:

- Isolíneas de alturas de onda máxima, signifi-

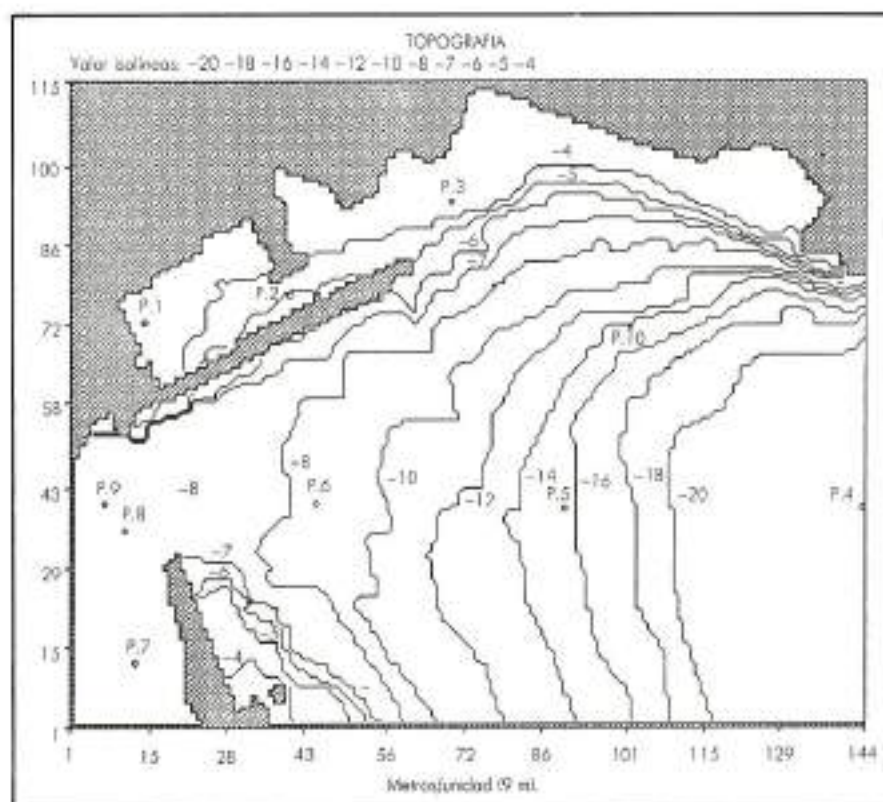


FIGURA 4. Representación bidimensional de la batimetría.

cante o media en todos o en parte de los puntos de la malla durante el período de simulación.

— Isolíneas de altura significativa relativa a otro valor prefijado o al valor existente en otro pun-

to prefijado en todos o en parte de los puntos de la malla durante el período de simulación (figura 6).

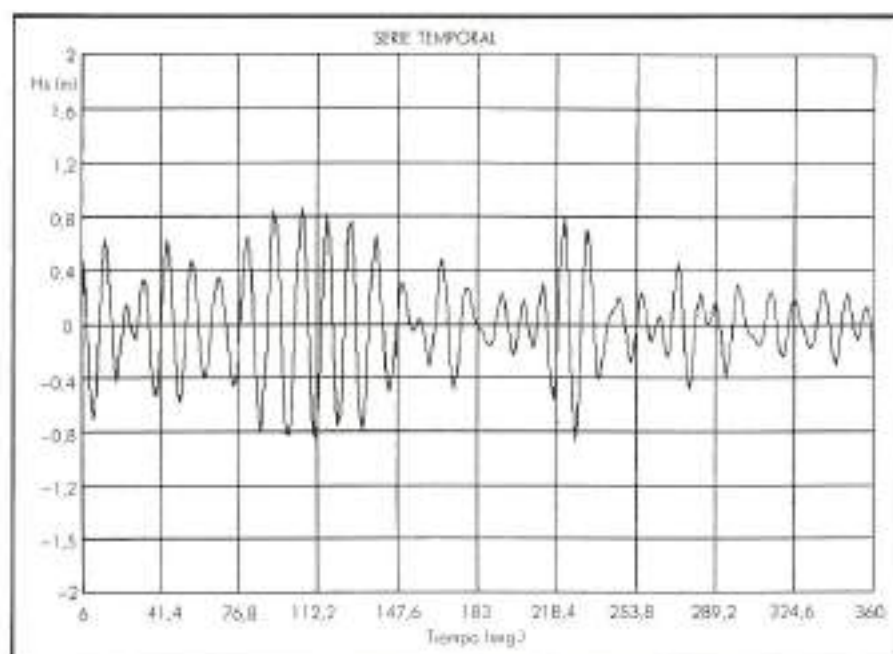


FIGURA 5. Serie temporal en un punto de al interior del modelo.

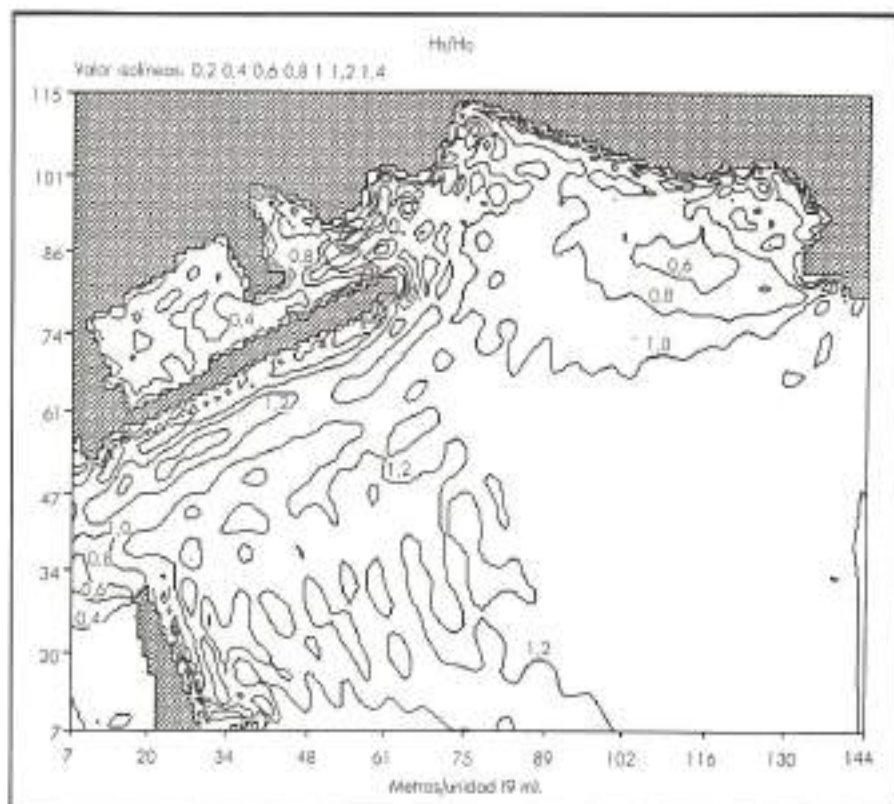


FIGURA 6. Alturas significantes relativas a la entrada del oleaje.

- Mapa de elevaciones de la superficie en un instante determinado.
- Mapa de flechas de la dirección y velocidad de la corriente en todos o en parte de los puntos en un instante determinado.
- Batimetría simulada.

- Representación en mapas de intervalos de distinto valor de cualquiera de las variables utilizadas.

C. Representaciones tridimensionales.
Como ejemplos podemos citar:

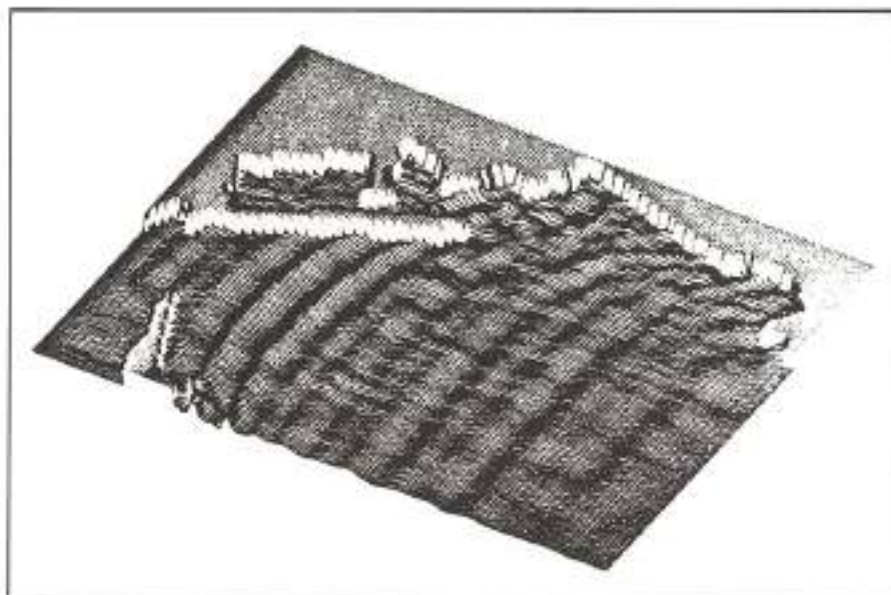


FIGURA 7. Erosión de agitación en un instante de la simulación.

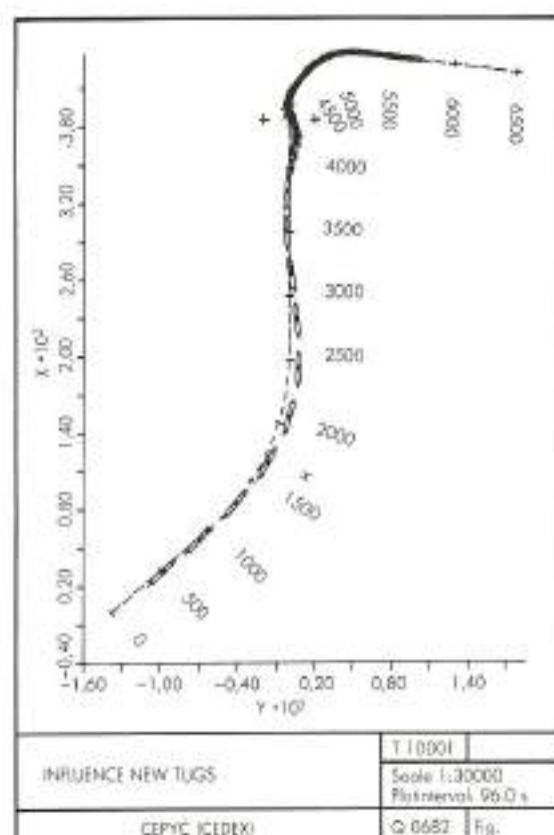


FIGURA 8. Representación bidimensional del curso de un buque.

— Representación de la altura de onda máxima, significativa o media en todos o en parte de to-

dos los puntos durante el periodo de simulación.
— Representación de la elevación de la superficie en un instante determinado (figura 7).
— Representación de la batimetría.

4. ESTUDIOS DE MANIOBRABILIDAD DE BARCOS

Uno de los objetivos últimos de un puerto es proporcionar a las embarcaciones una zona de amarre adecuada para la operación del barco y una vía de acceso segura a dichos amarres.

La simulación numérica de la maniobrabilidad de los buques se ha convertido en una herramienta útil y solicitada, por ello el CEDEX ha adquirido el modelo SHIPMA desarrollado por Delft Hydraulics Laboratory.

El modelo permite evaluar el comportamiento del buque durante sus maniobras de entrada y salida de puerto. Para ello, se aportan como datos los contornos de la costa y la disposición del puerto, así como las características hidrodinámicas, propulsivas y aerodinámicas del buque objeto de estudio.

Se incluyen también las condiciones físicas y ambientales en las que se desarrolla la maniobra (oleaje, viento, corriente, etc.).

En consecuencia, el modelo reproduce con gran exactitud las características del prototipo, por lo que sus movimientos se desarrollan en condiciones muy semejantes a las reales.

La representación del comportamiento del buque se lleva a cabo en pantallas gráficas o en plotter. (Ver figura 8.)



CUBIERTAS Y MZOV, S.A.

COMPANÍA GENERAL DE CONSTRUCCIONES



CUALQUIER TIPO DE OBRA...



EN CUALQUIER LUGAR DEL MUNDO

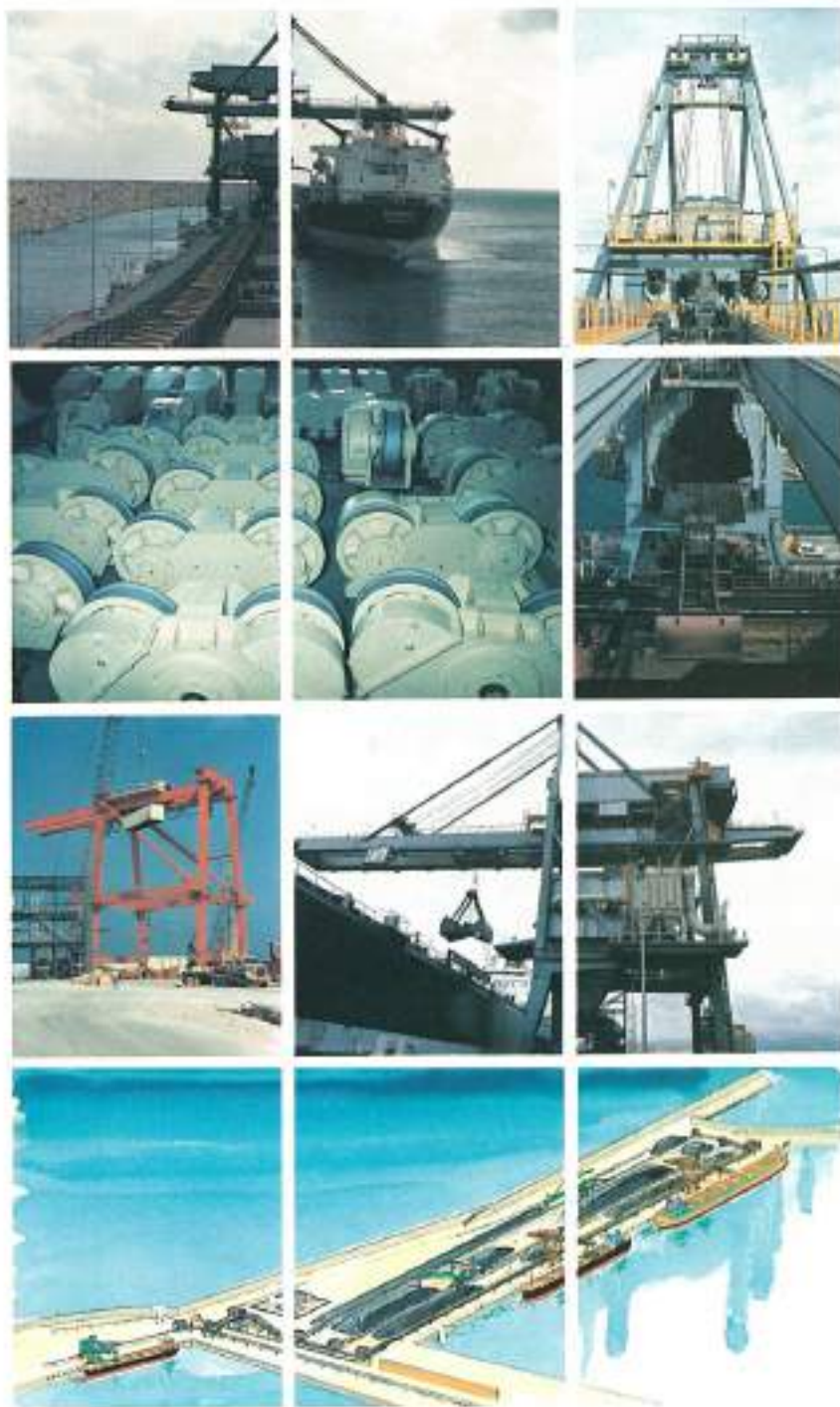


EQUIPAMIENTO DE PUERTOS

En equipamiento para puertos IMENOSA ofrece desde instalaciones completas y complejas como un puerto granelero a máquinas concretas como descargadoras de carbón o minerales.

Entre otros muchos equipos cabe destacar:

- Grúas descargadoras de mineral.
- Grúas para contenedores.
- Grúa de puerto.
- Instalaciones portuarias para descarga y almacenaje.
- Terminales de graneles.



imenoSa
INDUSTRIAS MECANICAS DEL NOROESTE, S.A.
GRUPO INI

Apartado 397 - 15480 FERROL
Tel. (981) 34 30 11
Telex 85534 AIND-E
Telefax (981) 34 32 58

Zurbarán, 28 - 28010 MADRID
Tel. (91) 410 71 97
Telex 44749 IMENO-E
Telefax (91) 410 73 94