

Análisis a largo término del clima de oleaje. Aplicación al diseño, construcción y explotación de obras marítimas^(*)

Por AGUSTIN SANCHEZ-ARCILLA y
JOSE LUIS ESTRADA LLAQUET

Departamento de Puertos.
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Cataluña.

La construcción, mantenimiento y explotación de la mayor parte de las obras y estructuras marítimas depende generalmente de la secuencia de calmas y tormentas en la mar. Esta evolución del clima de oleaje va asociada a valores de intensidad media (muy alejados de los valores extremos utilizados en el diseño) pero con una frecuencia media/alta de presentación. Ello implica una repercusión importante en la economía y plazos temporales correspondientes a la actividad estudiada.

El objetivo de este artículo es aplicar a las operaciones en el mar antes citadas un modelo teórico del comportamiento secuencial del clima de oleaje. Este modelo fue obtenido en un artículo anterior aplicando la teoría de procesos aleatorios a la curva de estado de mar. El énfasis está, aquí, en la aplicación práctica del modelo al campo de la ingeniería marítima. Tras revisar selectivamente (i.e. obteniendo las variables más significativas y sus correspondientes valores umbral) la explotación portuaria, dragados, construcción de diques en talud, etc., se aplica el modelo (con datos reales) al análisis de la influencia de los temporales en la explotación y rendimiento de un terminal para contenedores en un puerto español.

1. INTRODUCCION: NECESIDAD DE CONOCER LA EVOLUCION DE CALMAS Y TORMENTAS

Es frecuente encontrarse, tanto en la fase de construcción de obras marítimas, como en las operaciones de explotación de un puerto o terminal, o, en general, en cualquier operación en el mar, con situaciones del oleaje que dificultan o impiden totalmente la realización de tales operaciones. La trascendencia práctica de esta situación es considerable, tanto desde el punto de vista económico directo, como desde el cumplimiento de los plazos previstos. Es asimismo cierto que estas condiciones o situación del mar no son, en la mayoría de los ca-

sos, estados extremos que amenacen a la seguridad y a la estabilidad de las construcciones, instalaciones o artefactos. Se trata simplemente de niveles de agitación intermedia o incluso baja en lo que a intensidad se refiere, pero que, como tales, tienen en contrapartida y con frecuencia una alta probabilidad de presentación.

Es evidente que el conocimiento de estos estados del mar, sus características y sus parámetros definitorios pueden ser de gran trascendencia a la hora de acometer la ejecución de una obra, o de establecer un compromiso en relación con un plazo de ejecución, pudiendo llegar, en ocasiones, a condicionar un determinado tipo de diseño de una estructura, en el caso de que las exigencias constructivas de aquella puedan ser determinantes en relación con el clima de oleaje.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de mayo de 1986.

Desde el punto de vista de la explotación de un puerto o terminal, la presencia de temporales con una orientación e intensidad determinadas puede reducir notablemente el rendimiento de la instalación, o la de todo el puerto en conjunto, al disminuir su operatividad. Este hecho habrá de obligar, lógicamente, a que el problema sea tenido en cuenta en la fase de planificación y «layout» del puerto, a fin de poder sopesar las ventajas e inconvenientes de una situación más expuesta, que obligue a mayor número de días de ataque perdidos, frente a aquella otra situación en que se reduzcan los días perdidos, como consecuencia de existir mejores condiciones de abrigo, lo que a su vez obligará a diques mayores y más costosos.

Queda, pues, patente la gran trascendencia que pueden tener estos niveles de oleaje en las operaciones en el mar. El conocimiento de los mismos y, en concreto, de las variables y parámetros que los caracterizan será por ello fundamental. Se trata, en realidad, del conocimiento de las variables relacionadas con lo que se ha dado en llamar el comportamiento secuencial de los estados de mar. De entre éstas, las más significativas desde el punto de vista del problema que nos ocupa son:

- a) Duración de las tormentas, definidas como el tiempo en que H_s (altura de ola significativa, que mide la energía del mar) excede a un determinado nivel.
- b) Duración de las calmas, suceso opuesto del anterior.
- c) Intensidad máxima prevista para un temporal o tormenta.
- d) Tiempo medio entre inicio de tormentas.
- e) Rango de variación de la H_s en una tormenta, etc.

Con frecuencia, el conocimiento que se tiene de ellas es, en la mayoría de los casos, muy pobre. Los análisis que se hacen suelen basarse en funciones de distribución de probabilidad empíricas para las variables de interés, y requieren, por consiguiente, una adecuada calibración. Esta llega a ser una tarea difícil si, como es frecuente, sólo existe un volumen limitado de datos.

Sánchez-Arcilla [1], ha desarrollado una aproximación teórica al problema de la predicción del comportamiento secuencial de los estados

de mar. La desarrolla aplicando la teoría de procesos aleatorios a la curva de evolución de H_s , $H_s(t)$, también llamada curva de estados de mar. Por consiguiente, su validez está restringida a períodos estacionarios de esta curva (meses y estaciones de verano e invierno). Ha sido propuesta como alternativa a los modelos semiempíricos existentes y se considera especialmente conveniente para los casos en que se dispone de muy pocos datos.

En el presente trabajo se propone, por una parte, una aproximación teórica al problema de la predicción del comportamiento secuencial de los estados de mar, de acuerdo con [1]. Así se obtendrán las correspondientes funciones de distribución de probabilidad (FDP) teóricas. Estas funciones constituirán, por otra parte, las herramientas para resolver algunos de los problemas más frecuentes que se plantean como consecuencia de la incidencia del oleaje sobre las operaciones en el mar.

2. HERRAMIENTAS: MODELO PARA ANÁLISIS A LARGO-TÉRMINO

La teoría de procesos aleatorios, examinada por ejemplo en [6], ha sido ampliamente usada para análisis a corto término del clima del oleaje [7,8]. En estudios a largo término (escala de tiempos de meses y años) ha sido más raramente usada, siendo una excepción la referencia [3]. Las razones son, probablemente, la restricción a que el proceso sea estacionario (que limita la validez de la teoría a meses y estaciones) y la dificultad en asimilar la evolución de los estados de mar a un proceso gaussiano.

Esta dificultad apenas aparece en estudios a corto término si se considera la superficie del mar $\eta(t)$ (desplazamiento de la superficie libre en función del tiempo) como una suma de un gran número de ondas sinusoidales [8]. Sin embargo, es difícil considerar a $H_s(t)$ (curva de estados de mar) como una suma de gran número de componentes y, por consiguiente, no existen razones aparentes para asimilar esta curva a un proceso gaussiano.

La evolución a largo término de los estados de mar es un proceso dimensional caracterizado por las variables (H_s , T_z , m_j , ...), siendo:

H_s = altura de ola significativa.

T_z = período de paso por cero ascendente.

m_j = momento de orden j de la función de densidad espectral $S(\omega)$,

$$m_j = \int_0^{\infty} S(\omega) \omega^j d\omega$$

Aquí lo estudiaremos como un proceso unidimensional, definido exclusivamente por $H_s(t)$ por ser esta variable la más significativa en muchos de los análisis. Esta es también la aproximación usada en las referencias [3] y [4] para análisis a largo término de las condiciones del oleaje.

El conjunto del modelo que se desarrolla aquí, ha sido obtenido estableciendo una especie de paralelismo entre las variables del modelo a corto-término y las que aquí se proponen para largo-término. La explicación y demostración de las fórmulas que se plantean pueden encontrarse en [1].

Asimismo, en [1] se explica como el modelo ha sido probado con seis años de datos de oleaje (1975 a 1980) registrados en las inmediaciones de la entrada del puerto de Bilbao. La boya, una Datawell, estaba colocada a una profundidad media próxima a los 30 metros. La boya y el equipo de transmisión eran calibrados cada seis meses, simultáneamente con el cambio de baterías. La función de transferencia de la boya no fue especialmente investigada, aceptando los valores dados por los suministradores. Se tomaban grabaciones de 10-20 minutos cada 3-4 horas dependiendo del año. Se usaron dos filtros simples actuando en ratios de altura y períodos, principalmente para eliminar grabaciones con grandes incrementos de ruido. La H_s fue obtenida con un análisis estadístico convencional, siguiendo el método de Tucker.

Para asegurar la estacionariedad el análisis fue llevado a cabo para períodos de tiempo de meses y estaciones. Sólomente se consideraron dos estaciones: Invierno, desde el 1.º de octubre hasta el 31 de marzo, y verano, desde el 1.º de abril hasta el 30 de septiembre.

Para cada uno de ellos se calcularon los siguientes parámetros, como input para el modelo:

H_s medio = nivel medio de la curva $H_s(t)$.

m_0 = varianza de la curva $H_s(t)$ con respecto a su nivel medio.

ϵ = anchura espectral, evaluada a partir del número de máximos y pasos por cero ascendente [9].

T = tiempo medio entre inicio de tormentas, definidas con respecto a H_s medio.

Las variables utilizadas y las conclusiones generales obtenidas fueron las siguientes:

1. Curva de evolución de estados de mar $H_s(t)$

Esta curva es continua y aleatoria. En [1] fue probado empíricamente que además se trata de una función estacionaria y gaussiana. Se concluye así que H_s puede ajustarse a una FDP normal.

$$\text{Prob}(H \leq H_s) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0}} \int_{-\infty}^{H_s} \exp\left(-\frac{H_s^2}{2m_0}\right) dH_s \quad [1]$$

2. Intensidad de los picos de tormentas (Figura 1)

Deberían seguir una distribución normal si todos los procesos considerados fueran de banda ancha con ϵ (medida de la anchura espectral del proceso) próxima a 1.0.

Los input requeridos para esta distribución son:

H_s medio = media de $H_s(t)$ para el período considerado.

m_0 = varianza de $H_s(t)$ para el período considerado.

La hipótesis de distribución normal fue probada para todos los meses y estaciones de invierno y verano, encontrando un acuerdo satisfactorio.

$$\text{Prob}(m \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) dx \quad [2]$$

$m = \frac{H_M}{\sqrt{m_0}}$, donde H_M se define a partir de

Intensidad de pico = H_s medio + H_M

3. Rango de variación de H_s en una tormenta (Figura 1)

Sigue una distribución de Rayleigh. El input requerido es m_0 .

$$\text{Prob}(m \leq x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{8}\right), \quad x \geq 0 \quad [3]$$

$$m = \frac{\text{Rango de variación de } H_s}{\sqrt{m_0}}$$

Fue comprobada para todos los meses y estaciones de verano e invierno, encontrándose un acuerdo satisfactorio.

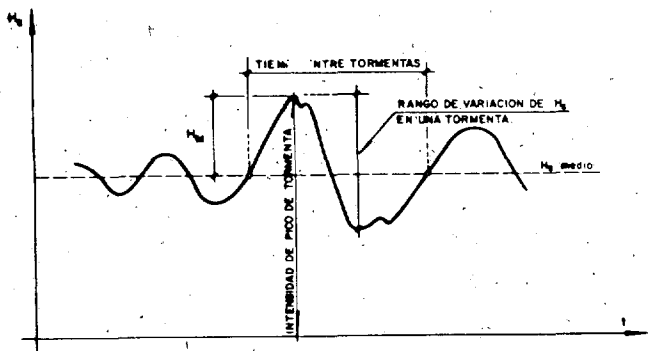


Figura 1. — Definición de las Variables: «Rango de Variación de H_s en una Tormenta», «Tiempo entre Tormentas» e «intensidad de pico de Tormentas».

4. Tiempo entre inicio de tormentas

El tiempo entre inicio de tormentas se define en relación con el nivel medio, H_s medio. (Ver Figura 1).

Los inputs requeridos son:

H_s , medio.

$\bar{T}$, tiempo medio entre inicio de tormentas.

ϵ , anchura espectral.

Se obtuvo un acuerdo satisfactorio, (1), para la distribución de CNEXO en la hipótesis de muestra estacional, pero no en el caso de la mensual (a causa del pequeño tamaño de esta muestra).

Distribución de CNEXO

$$\text{Prob}\left(\frac{T}{\bar{T}} \leq x\right) = \int_0^x \frac{\alpha^3 a^2 x}{[(x^2 - \alpha^2)^2 + \alpha^4 a^2]^{3/2}} dx \quad [4]$$

con
$$a = \frac{\epsilon}{(1 - \epsilon^2)^{1/2}}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} [1 - (1 - \epsilon^2)^{1/2}]$$

donde

T = período de tiempo entre inicio de tormentas.

$\bar{T}$ = valor medio de T .

ϵ = anchura espectral.

5. Ratio medio de crecimiento y decay de una tormenta.

Es el valor medio de la relación entre el rango de variación de H_s y el tiempo entre tormentas. Los inputs requeridos son T y m_0 .

Tan sólo se encontró un ajuste cualitativo a la distribución de Rayleigh para el parámetro

$$\frac{H}{T^2}$$

6. Número medio de tormentas consecutivas excediendo un cierto nivel (j_1) (Figura 2)

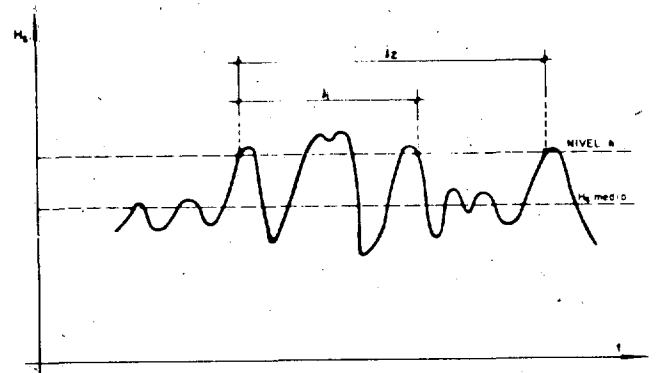


Figura 2. — Definición de las variables «Número Medio de Tormentas consecutivas, excediendo en cierto nivel (j_1)» y «Número Medio de Tormentas entre grupos, excediendo un cierto nivel (j_2)».

Su obtención viene definida por

$$E(j_1) = \frac{1}{P}, \quad \sigma(j_1) = \frac{Q}{P} \quad [5]$$

en donde $\text{Prob}(H_s \leq h) = P$ y $Q = 1 - P$

E = valor medio

σ = desviación standard.

El input requerido es la FDP de H_s a largo término.

Para este parámetro, como para el siguiente, las tormentas están definidas con respecto al nivel medio, H_s medio.

7. Número medio de tormentas entre grupos excediendo un cierto nivel (j_2) (Figura 2)

Su obtención viene definida por

$$E(j_2) = \frac{1}{P} + \frac{1}{Q};$$

$$\sigma(j_2) = \left(\frac{P}{Q^2} + \frac{Q}{P^2} \right)^{1/2} \quad [6]$$

con los mismos significados que para el caso de j_1

El input requerido es la FDP de la H_s a largo término.

Tanto este parámetro (j_2) como el anterior (j_1) mostraron un pobre acuerdo con los datos.

8. Duración media de tormentas

La duración media de tormentas respecto a un nivel h , $d_s(h)$, puede ser evaluada como sigue:

$$d_s(h) = \frac{[1 - p(h)] D}{\lambda(h - H_s \text{ medio}) D} =$$

$$= \frac{1 - p(h)}{\lambda(h - H_s \text{ medio})} \quad [7]$$

donde

$\lambda(h) = n.^{\circ}$ medio de pasos por el nivel h por unidad de tiempo = $n.^{\circ}$ esperado de tormentas al nivel h .

Se define [1] como $\lambda(h) =$

$$= \left(\frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{h^2}{2m_0} \right) \quad [8]$$

$\lambda(h - H_s \text{ medio}) = n.^{\circ}$ medio de pasos por el nivel $h - H_s$ medio por unidad de tiempo = $n.^{\circ}$ esperado de tormentas al nivel $h - H_s$.

D = duración del período de tiempo considerado.

$p(h)$ = probabilidad definida en el apartado 6.º

La expresión anterior no es más que la relación del tiempo total de tormentas en el nivel h al número esperado de tormentas en aquel nivel, λ .

Es preciso remarcar que el parámetro $\lambda(h)$ sólo tiene validez para niveles $h > H_s$ medio.

9. Duración media de calmas

La duración media de calmas respecto a un nivel h , $d_c(h)$, viene dada por

$$d_c(h) = \frac{p(h)}{\lambda(h - H_s \text{ medio})} \quad [9]$$

Ambas variables, d_s y d_c , pueden ajustarse a una distribución de Weibull.

4. APLICACION PRACTICA DEL MODELO

En los puntos siguientes vamos a tratar someramente de aquellas obras o actividades cuyas características de diseño, construcción o uso pueden verse afectadas por las condiciones del oleaje.

Distinguiremos entre:

- Incidencia sobre la explotación de un puerto o terminal, lo cual está directamente relacionado con su lay-out.
- Incidencia sobre el diseño y construcción de las obras y operaciones marítimas.

Por sus características especiales, desde el punto de vista de este trabajo, trataremos independientemente el caso de los diques de abrigo del resto de las obras y operaciones marítimas. Esto es así porque los diques (muy especialmente los diques en talud) son obras que, durante su construcción, pueden verse directamente afectadas por la acción del oleaje (incluso para ni-

veles inferiores del mismo) por encontrarse, eventualmente, en esa fase de construcción, con zonas que están sólo en parte protegidas o desprotegidas. Además de esto, el proceso de construcción de un dique puede verse indirectamente afectado por la incidencia negativa del oleaje sobre los artefactos y medios necesarios para la construcción. Esta última faceta es la que habremos de considerar para el caso del resto de las obras y operaciones en el mar en general. Dentro de éstas nos dedicaremos expresamente al caso de los dragados por su representatividad, al incidir de forma muy directa la acción del oleaje.

4.1 Explotación de un puerto o terminal, incidencia en el Lay-Out

Es sabido que las operaciones de carga y descarga de buques sólo pueden realizarse por debajo de unos determinantes niveles de agitación, que son función de diversas variables, entre las que destacan:

- El tamaño y tipo de barco (pequeñas embarcaciones, cargueros, portacontenedores, LNG, barcos de LPG, buques tanque, etc.)
- Capacidad de operación de los sistemas de carga y descarga.
- Sistemas de amarre y defensa.
- Características del propio oleaje.

Superadas dichas condiciones admisibles de agitación el barco no podrá operar: incluso puede suceder que se vea obligado a abandonar el puesto de atraque o el propio puerto, en algún caso. En tales situaciones, el rendimiento del terminal puede verse afectado negativamente de una forma ostensible. En la figura 3 puede verse como varía el rendimiento de una operación de carga de contenedores con el movimiento del barco (surge).

Será preciso, en consecuencia, reducir no tan sólo los niveles de agitación que se producen directamente por el oleaje incidente, sino también aquellos que se producen (amplifican) por acciones indirectas (reflexión, resonancia), que pueden ser importantes aunque las condiciones del oleaje incidente sean admisibles (aparentemente).

Hará pues falta definir, en primer lugar, el gra-

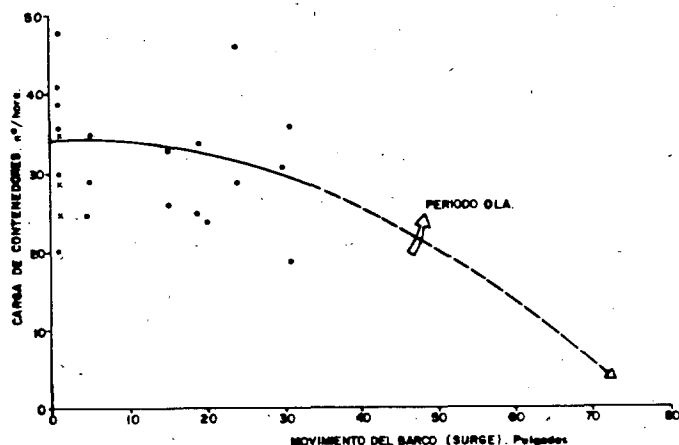


Figura 3.—Relación entre el rendimiento de carga y el movimiento del barco (surge), para un barco de contenedores [19].

do de abrigo que se juzga necesario para cada puesto de atraque o dársena. Se necesita saber la máxima altura de ola que permite realizar operaciones. Para ello es preciso tener en cuenta las condiciones de agitación admisibles en función del tipo de barco. Le Mehauté, [19], da un serie de datos que pueden servir para una clasificación indicativa de los límites de agitación. Dichos datos se resumen en la Tabla n.º 1, en donde las alturas de ola deben entenderse como máximas. Pueden variar según el tipo de amarre y defensa.

TABLA N.º 1

ALTURAS DE OLA MAXIMAS ADMISIBLES EN METROS, EN FUNCION DEL TIPO Y DEL TAMAÑO DE UN BUQUE, REALIZANDO OPERACIONES DE CARGA Y/O DESCARGA EN ATRAQUE

TIPO DE BUQUE	TAMAÑO DEL BUQUE TPM × 10 ³			
	< 30	30 — 100	100 — 250	> 250
Embarcación de recreo	0,2 — 0,4			
Embarcaciones para pesca comercial	0,8			
Buques de carga general	0,7			
Bulkcarriers				
carga	0,8	1,2		
descarga	0,8	1,0		
Portacontenedores ..	0,5	0,5		
Buques de LNG y LPG	0,5	0,7		
Buques tanque y VLCC				
en pantalán convencional	—	0,3	0,5	0,5
en boya múltiple	—	0,6	0,6	—
en torre fija	—	1,5	2,0	2,5
en monoboya	—	2,0	2,5	2,7

Será preciso conocer, a continuación, las condiciones del oleaje incidente, y en concreto la distribución probabilística del oleaje, incluyendo direcciones. Es de resaltar el hecho, por otra parte obvio, de que tan sólo deberán ser considerados aquellos oleajes cuya orientación sea tal que se produzca agitación en el puesto de atraque objeto de estudio.

Desde el punto de vista del presente trabajo interesará tener información para la zona de estudio, como mínimo de las siguientes variables:

- 1.^a Altura de ola significativa H_s (t)
- 2.^a Tiempo entre inicio de tormentas.
- 3.^a Duración media de calmas.
- 4.^a Duración media de tormentas.
- 5.^a Intensidad de picos de tormentas.

El conocimiento de las variables 2.^a, 3.^a y 4.^a proporcionará una idea bastante real de las posibilidades de utilización del terminal, desde el punto de vista del atraque y de la posibilidad de realización de operaciones de carga y descarga.

La intensidad de los picos de las tormentas permitirá hacer hipótesis en relación con los esfuerzos en los amarres y el riesgo de rotura de los mismos. Asimismo, y dado el riesgo que se puede producir para determinados niveles de agitación, podrían servir como pauta en relación con la oportunidad de sacar el buque fuera del puerto.

4.2 Obras de abrigo

A los efectos de este trabajo se distinguirán dos tipos de obras de abrigo:

- Diques en talud.
- Diques verticales (se incluirán aquí los diques mixtos).

4.2.1 Diques en talud

Como es sabido, los diques en talud están constituidos por un núcleo de productos de cantera sin clasificar, vertido en el emplazamiento proyectado, protegiendo los taludes con varias capas de escollera clasificada, siendo la última (especialmente del lado de mar abierto) o bien de escolleras de gran peso o bien de piezas de hormigón.

El núcleo constituye la parte central de la sección del dique y representa su mayor volumen.

Tanto el material de núcleo como las escolleras es posible colocarlas por dos procedimientos de vertido diferentes: terrestre o directo y marítimo.

Desde el punto de vista de la incidencia del oleaje, en la construcción de un dique en talud se plantean dos tipos de problemas fundamentales:

1. Relativos a la estabilidad de los materiales depositados en la sección en construcción.
2. Relativos a las posibilidades de trabajo de las embarcaciones, artefactos y medios auxiliares en general, necesarios para la ejecución de la obra (vertido marítimo, especialmente).

El primero de los problemas puede ser trascendental en determinadas circunstancias. Depende de dos variables fundamentales:

- Características del oleaje.
- Tamaño de los materiales.

El dique es una obra especialmente vulnerable durante su ejecución frente a oleaje cuya intensidad puede ser notablemente inferior a la de cálculo. La actuación de este oleaje puede producir (según su intensidad) un desplazamiento de los materiales de menor tamaño en relación con el lugar teórico de vertido, lo que hará que su función sea inútil. Ante esta circunstancia pueden adoptarse diversas soluciones:

1. Que el «avance» sea mínimo. Es decir, interesa construir a sección lo más completa posible.
2. Mejora del tipo de material, aumentando su tamaño, especialmente los tamaños menores, de forma que sea posible seguir avanzando sin pérdidas sustanciales. Ello, no obstante, podría obligar en algún caso a un desaprovechamiento parcial de los materiales de la cantera.
3. Vertido marítimo de los materiales, lo que es posible hasta unas determinadas profundidades mínimas (limitadas por el calado de los gánguiles cargados), que pueden oscilar entre 4 ó 5 metros. Respecto a la estabilidad de los materiales depositados por este medio es sabido que, para profundidades del orden de la altura de la ola incidente y mayores, la acción destructiva del oleaje es ya prácticamente despreciable.

El resto de la sección hasta la cota de coronación deberá completarse por vertido directo, cuando las condiciones del mar lo permitan.

El avance por vertido marítimo es menos sensible al oleaje que el vertido directo, perdiéndose menos días de trabajo por el primer procedimiento que por el segundo. También es un procedimiento más caro.

A pesar de lo anterior las condiciones del mar pueden ser, en ocasiones, suficientemente duras como para que debe detenerse la ejecución del avance. Estas detenciones pueden alcanzar en algunos casos a períodos de tiempo largos como puede ser toda una estación invernal. Es imprescindible en estos casos la construcción previa de un morro provisional que habrá que desmontar o demoler parcialmente al reanudarse los trabajos.

En cuanto a las posibilidades de trabajo de los elementos flotantes: (gánguiles, pontonas, gabarras, cabrias, etc.), es evidente que, cuanto más en calma esté el mar más perfecto será su trabajo y mayor su rendimiento. La precisión de los vertidos marítimos dependerá, asimismo, de las características del oleaje con el que estemos trabajando. En el caso de un gánguil, es preciso tener en cuenta que el tiempo de vertido (apertura y vaciado), es del orden de 4 ó 5 veces el período de la ola [27].

A partir de determinados oleajes su actuación se hará imposible y deberá detenerse la ejecución de la obra. Los gánguiles utilizados suelen tener un franco bordo muy escaso y sus condiciones de utilización a plena carga están limitadas a estados de mar con H_s inferior a los 2,00 metros [26]. Se volverá sobre este punto al hablar de los dragados.

Las anteriores consideraciones habrán de ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar la sección del dique y de establecer el plazo de la obra y su programa de trabajos. Si a lo anterior añadimos el hecho de que se trata de una obra lineal, es evidente que estamos ante un tipo de obra en la que las condiciones de diseño, las fases y métodos de construcción y el plazo de ejecución están directamente interrelacionados y condicionados por la presencia del mar.

De lo anterior se deduce la gran trascendencia que tiene el conocer el máximo acerca de

los estados de mar que puedan condicionar la construcción de nuestra obra. Será, por tanto, del máximo interés el llegar a poseer, al menos para la zona de proyecto, información sobre las variables siguientes:

- 1.^a Curva de estados de mar $H_s(t)$.
- 2.^a Tiempo entre inicio de tormentas.
- 3.^a Duración media de las calmas.
- 4.^a Duración media de las tormentas.
- 5.^a Intensidad de picos de las tormentas.
- 6.^a Número medio de tormentas consecutivas.

El conocimiento de las cuatro primeras variables permitirá efectuar una correcta planificación de la obra dentro del plazo previsto, de forma que se podrán establecer con realismo los medios necesarios para alcanzar los rendimientos y ritmos precisos.

La intensidad de picos de las tormentas nos facilitará información acerca de cuando determinados artefactos y medios auxiliares en general, pueden estar sometidos a niveles de oleaje que hagan peligrar su estabilidad, lo que podría ser muy grave para la obra. Puede informar asimismo acerca de los tamaños mínimos necesarios de los materiales para que el avance sea eficaz.

El número medio de tormentas consecutivas y su duración pueden constituir una herramienta adecuada a la hora de establecer una correcta política de reparaciones.

4.2.2 Diques Verticales

Están constituidos por un muro, normalmente de hormigón, que descansa sobre un cimiento formado por escollera con capacidad portante y de reparto de tensiones suficiente.

Lo usual es que el muro se construya a base de bloques de hormigón superpuestos o más frecuentemente, en la actualidad, de cajones flotantes.

En ambos casos, el diseño obliga a una razonable perfección de la ejecución, por lo que se refiere al aspecto geométrico. Esto sólo se puede conseguir cuando se dan unas condiciones de mar prácticamente en calma. La consecuencia inmediata es que en determinadas áreas marítimas pueden producirse grandes períodos de tiempo en que no sea posible realizar las ope-

raciones de fondeo de los bloques o cajones. Para el caso de cajones flotantes, en [26] se establece que la altura de ola significativa en la maniobra de fondeo de un cajón deberá ser inferior a $H_s = 1,5$ metros, que parece elevada, siendo la velocidad del viento, asimismo, inferior a fuerza 4.

La ejecución de la escollera de cimientos planteará problemas similares, desde el punto de vista de nuestro estudio, a los de ejecución de un dique mediante vertido marítimo.

Las variables de interés serán básicamente las mismas que las mencionadas para los diques de talud.

4.3 Dragados

El efecto del oleaje en el equilibrio de una draga tiene una considerable influencia en relación con la eficacia de la operación y con la capacidad para mantener la posición en el lugar de dragado.

Los problemas más importantes que se plantean son:

- Esfuerzos importantes en los elementos de apoyo, amarre y fondeo.
- Pérdida de la posición de dragado.
- Pérdida de contacto de la cabeza de dragado con el material a dragar.
- Dificultades con la tubería flotante, por su sensibilidad al efecto del oleaje, en las dragas de succión.
- Dificultades de mantenimiento de la posición de una barcaza o gánguil al lado de la draga en la operación de carga de material, debido al excesivo movimiento de la barcaza (surging) que además no está en fase con el de la draga. Ello produce, además, considerables esfuerzos de amarre.
- Adicionalmente debe tenerse en cuenta que las dragas de rosario son especialmente inestables debido a su alta superestructura. El movimiento indebido del barco causa problemas por el golpeteo del rosario con el fondo, quedando afectada negativamente la eficacia del dragado. Finalmente las barcazas y gánguiles son afectados por las condiciones del oleaje tanto cuando están en ruta para el verti-

do, como en la propia operación de vertido.

Está universalmente aceptado que el comportamiento de una draga sometida al efecto del oleaje depende de un gran número de variables, tales como:

- Orientación de la embarcación en relación con la dirección del oleaje.
- Características dinámicas de la embarcación, tales como período de pitch, etc.
- Sistemas de amarre y fondeo.
- Características del propio oleaje: Altura, período, longitud de onda.
- Factores humanos.
- Distancia desde el lugar de dragado a las aguas abrigadas más próximas, o a un puerto.
- Duración de períodos de condiciones adversas, etc.

TABLA N.º 2

LIMITACIONES IMPUESTAS SOBRE EL EQUIPO DE DRAGADO POR LA ACCIÓN DEL OLEAJE, [21]

Equipo de dragado	Alturas de ola en m (período 6-8 seg.)	
	Alturas límites para operaciones eficaces	Alturas por encima de las cuales las operaciones son peligrosas y/o muy ineficaces
Pontona de perforación (flotante)	1,0	1,5
Pontona de perforación (sobre patas) trabajando	2,0	3,5
Pontona de perforación (sobre patas) en movimiento	1,0	2,0
Draga de pala	0,3	0,6
Draga retroexcavadora	0,4	0,8
Draga de rosario	0,4	1,0
Draga de almeja (autopropulsada)	2,5	3,5
Draga de almeja	0,4	1,0
Draga de succión con cortador (pequeña)	0,2	0,5
Draga de succión con cortador (grande)	0,4	0,8
Draga de succión en marcha (pequeña)	1,5	2,5
Draga de succión en marcha (grande)	2,0	4,0
Bote para tripulación (pequeño) en marcha	0,6	1,2
Bote para tripulación (pequeño) transfiriendo personal	0,6	1,2
Bote para tripulación (grande) en marcha	2,5	4,5
Bote para tripulación (grande) transfiriendo tripulación	1,0	1,0

Existe muy poca información disponible que relacione los factores físicos del oleaje con la capacidad de las estructuras flotantes para realizar sus funciones, a pesar de que actualmente existen modelos matemáticos capaces de simular razonablemente el comportamiento de cuerpos flotantes con geometría arbitraria (información adicional puede encontrarse en [25]). Una razón de lo anterior puede ser el hecho de que con frecuencia predominan los factores humanos. Con las mismas condiciones físicas y de equipo, una tripulación trabajará mientras que otra se lamentará de que no puede hacerlo, [2,2].

Las condiciones de trabajo y limitaciones que han sido registradas se han resumido en la tabla siguiente, tomada de [21]. Se basan en olas de períodos de 6 a 8 segundos y es aplicable a dragado de suelos y roca pretratada. Si ha de dragarse roca virgen de forma directa, las limitaciones serán normalmente más severas. De forma análoga, si los períodos son mucho mayores de 8 segundos su efecto será mucho mayor y las alturas de ola limitativas serán menores que las expresadas.

De todos los tipos de draga el que mejor se adapta a las condiciones más severas de oleaje es sin duda la draga de succión en marcha (trailer), prácticamente la única que puede actuar con cierta regularidad y garantía en condiciones de mar abierto.

A la vista de todo lo anterior y desde el punto de vista de la ejecución de obras de dragado y en general de operaciones en el mar en que se utilicen embarcaciones y artefactos, será del mayor interés conocer la siguiente información asociada al oleaje:

- 1.^a Distribución de H_s .
- 2.^a Tiempo entre inicio de tormentas.
- 3.^a Duración media de calmas.
- 4.^a Duración media de tormentas.
- 5.^a Intensidad de pico de tormentas.

Los números 2.^a, 3.^a y 4.^a permitirán hacer una planificación adecuada y realista del trabajo a ejecutar.

La 5.^a informará en relación con las condiciones de seguridad y estabilidad de los artefactos.

5. EJEMPLO DE APLICACION

A continuación se plantea un ejemplo mediante el cual se pretende mostrar más claramente al lector las características del uso del modelo y las posibilidades del mismo.

Los datos del problema, si bien teóricos, han sido obtenidos a partir de valores reales registrados en un punto de la costa del Norte de España.

Supóngase que, en cierto puerto del Norte de España, se ha planteado la necesidad de construir un nuevo muelle para una futura terminal de contenedores. La zona prevista al efecto se encuentra relativamente próxima a la bocana, por lo que existe cierta agitación para determinadas orientaciones de los temporales.

Se pretende conocer como van a influir dichos temporales en la explotación y/o rendimiento del terminal, supuesta su construcción en aquel punto.

Lo primero que hará falta conocer es el oleaje en la zona objeto de estudio, durante un cierto tiempo definido por el modelo.

El conocimiento de dicho oleaje se podrá tener de dos maneras distintas:

- 1.^a Midiendo directamente el oleaje con un registrador en la zona de estudio.
- 2.^a Midiendo el oleaje con un registrador en la zona exterior (caso frecuente) y mediante un modelo preferentemente numérico trasladar dicho oleaje al lugar de estudio, en el interior del puerto (considerando, naturalmente, la reflexión, difracción, refracción y posiblemente fricción con el fondo).

En el ejemplo planteado los datos de partida provienen, como ya fue dicho, de valores obtenidos de un registro en mar abierto en un punto situado en las inmediaciones de la costa en el Norte de España. Fueron tomados a lo largo de toda una estación invernal. Como ha quedado explicado, para la aplicación del modelo es necesario obtener los siguientes datos, siendo sus valores para condiciones de mar abierto, los que se indican a continuación.

La FDP de la H_s para el período de tiempo

considerado fue la siguiente:

H_s (metros)	$P(H \leq H_s)$
1	0,48
2	0,80
3	0,96
4	0,994
5	0,9998

los restantes datos necesarios son:

$$\epsilon = 0,9738$$

$$m_0 = 1,645 \text{ m}^2.$$

$$H_s \text{ media} = 1,7367 \text{ metros.}$$

$$m_2 = 1,3955 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{horas}^{-2}.$$

$$T = 117,84 \text{ horas.}$$

A partir de estos datos, en mar abierto, y a los solos efectos simplificativos del problema se van a considerar los siguientes valores para el punto estudiado del interior del puerto (obsérvese que la simplificación realizada es arbitraria):

Para la FDP de H_s , se supondrán los siguientes valores, en donde las alturas de ola se reducen una quinta parte para una probabilidad fija:

H_s (metros)	$P(H \leq H_s)$
0,20	0,48
0,40	0,80
0,60	0,96
0,80	0,994
1,00	0,9998

La gráfica se representa en la figura adjunta en papel probabilístico normal.

ϵ seguirá siendo el mismo:

$$\epsilon = 0,9738$$

m_0 se reducirá una quinta parte

$$m_0 = \frac{1,645}{5} = 0,3290$$

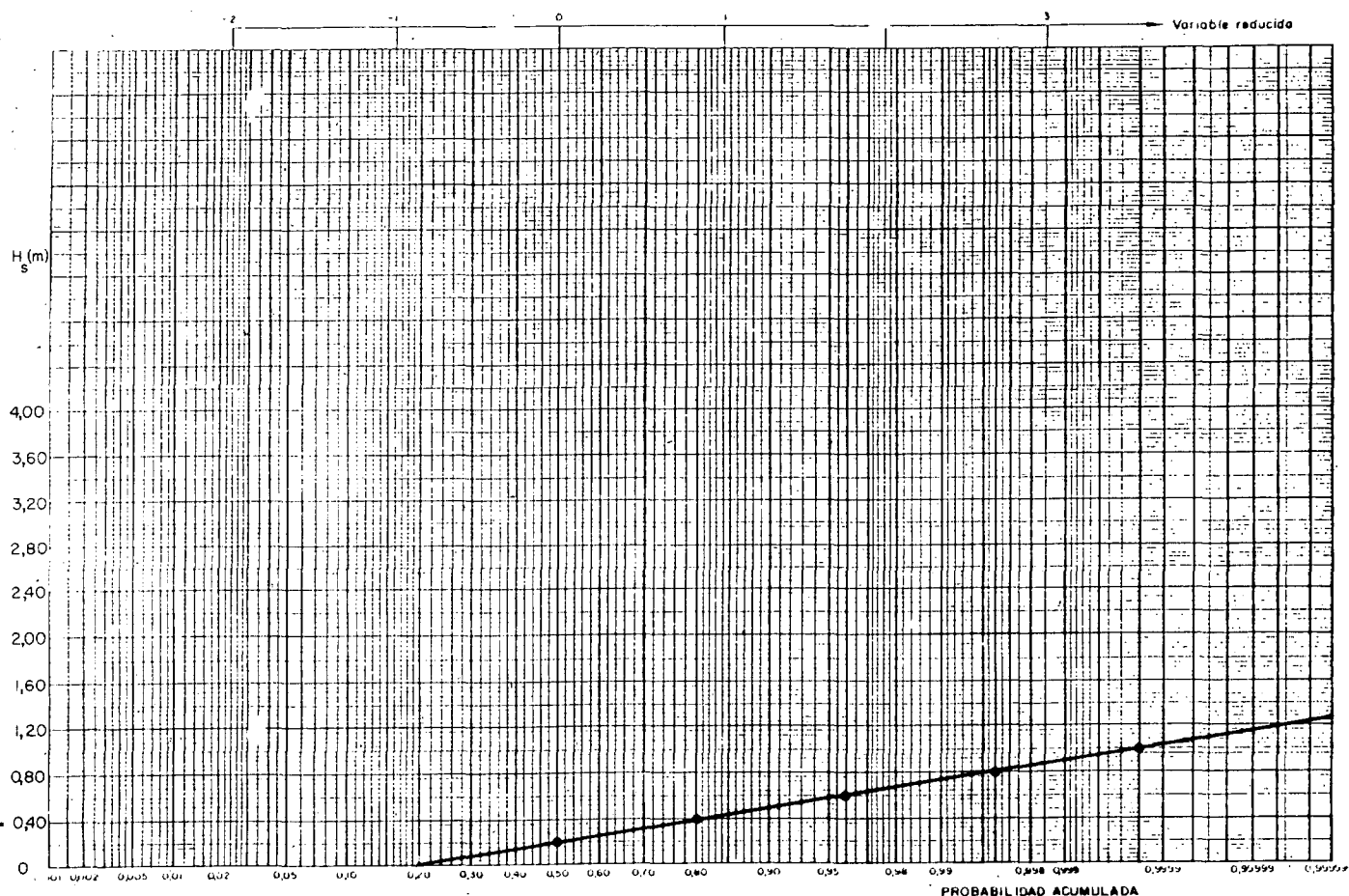


Figura 4.—Función de distribución de H_s .

$\bar{T}$ se reducirá también en una quinta parte

$$\bar{T} = \frac{117,84}{5} = 23,56 \text{ horas}$$

$$m_2 = \frac{m_0}{T^2} = \frac{0,3290}{23,56^2} = 5,92 \times 10^{-4}$$

Para H_s media, a la vista de la forma de su función de distribución, se adoptará el valor H_s media = 0,2370 m.

Se obtendrán a continuación los diferentes parámetros que interesa.

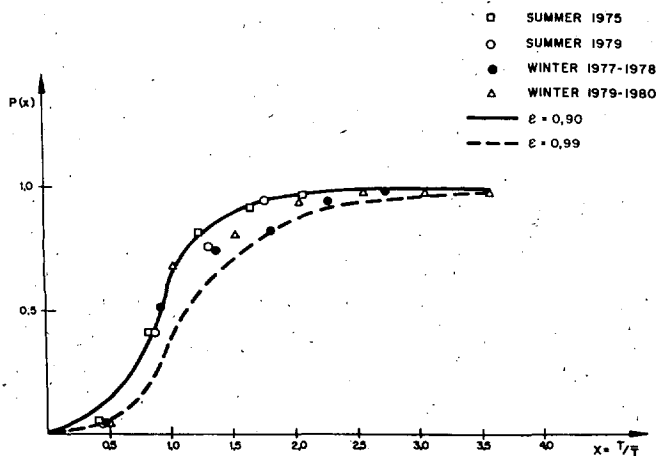


Figura 5. — Curvas de ajuste de una distribución de CNEXO al tiempo de inicio entre tormentas [1].

abscisas del ábaco, $\frac{T}{\bar{T}}$	ordenadas $P(x)$
$0,5 = \frac{T}{23,56} \rightarrow T = 11,78 \text{ horas}$	0,120
$1 = \frac{T}{23,56} \rightarrow T = 23,56 \text{ horas}$	0,4375
$1,5 = \frac{T}{23,56} \rightarrow T = 35,34 \text{ horas}$	0,750
$2 = \frac{T}{23,56} \rightarrow T = 47,12 \text{ horas}$	0,88
$2,5 = \frac{T}{23,56} \rightarrow T = 58,90 \text{ horas}$	0,95
$3 = \frac{T}{23,56} \rightarrow T = 70,68 \text{ horas}$	0,98
$3,5 = \frac{T}{23,56} \rightarrow T = 82,46 \text{ horas}$	0,99

1. Tiempo entre inicio de tormentas

Se podría aplicar directamente (4). Por comodidad, no obstante, se utilizará el ábaco de la figura 5, tomada de [1]. Esto es lo mismo que suponer que si $\bar{T}$ se reduce a la quinta parte respecto a mar abierto, las diferentes T se reducen todas asimismo en la misma proporción.

Los valores anteriores indican que la probabilidad de que el tiempo T entre tormentas sea menor que el número que lo indica en horas (columna de la izquierda), es el valor que se expresa en la columna de la derecha. Por ejemplo: La probabilidad de que el tiempo entre tormentas sea menor de 11,78 horas 0,120 (Téngase en cuenta que las tormentas vienen aquí definidas en relación con el nivel medio H_s medio).

2. Duración media de tormentas

$$ds(h) = \frac{1 - p(h)}{\lambda(h - H_s \text{ media})}$$

De la tabla n.º 1 se obtiene que el nivel máximo admisible de agitación para una terminal de contenedores corresponde a una altura máxima de $H_{\max} = 0,50$ metros. Este valor equivale, como es bien sabido, a un valor de la altura de ola significativa de aproximadamente la mitad, es decir

$$H_{\max} \approx 2 H_s$$

y en el ejemplo, $\frac{1}{2} \times 0,50 = 0,25$ metros.

Este será pues el nivel h máximo admisible, es decir, $h = 0,25$.

$$h - H_s \text{ media} = 0,25 - 0,2370 = 0,0130 \text{ m.}$$

$$\lambda(h - H_s \text{ media}) = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \exp\left(-\frac{h^2}{2m_0}\right)$$

sustituyendo

$$\lambda(h - H_s \text{ media}) = \sqrt{\frac{5,92 \times 10^{-4}}{0,3290}}$$

$$\exp\left(-\frac{0,25^2}{2 \times 0,3290}\right) = 0,0386$$

y por tanto $ds(h) = 15,54$ horas que indica que la duración media de las tormentas para el nivel $h = 0,25$ metros es de 15,54 horas, períodos de tiempo durante los cuales no será posible realizar operaciones de carga y/o descarga, por efecto del oleaje.

3. Duración media de las calmas

$$dc(h) = \frac{p(h)}{\lambda(h - H_s \text{ media})}$$

sustituyendo directamente se obtiene

$$dc(h) = \frac{0,40}{0,0386} = 10,36 \text{ horas}$$

4. Intensidad de pico de las tormentas

Supóngase que para alturas de ola de 2 metros el buque tendría serios problemas en el atraque ($H_s = 1$ m.) y en consecuencia debería abandonar el puerto. Se va a buscar el riesgo que existe de que se exceda el nivel de 1 m. para un temporal (tormenta) medio o típico. Este riesgo corresponderá al del pico de la tormenta siempre que esta no posea un gran número de picos (máximos locales) secundarios, lo cual ocurrirá para valores del umbral por encima (suficientemente) del nivel medio.

Se trata de una distribución normal

$$\text{Prob}(m \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) dx$$

$$m = \frac{H_M}{\sqrt{m_0}}$$

Altura pico = $H_M + H_s \text{ media}$;

Altura pico = $1,0 = H_M + 0,2370$;

$H_M = 1 - 0,2370 = 0,7630$ metros;

$m = \frac{0,7630}{\sqrt{0,3290}} = 1,3302$ y en las tablas de la

distribución normal $x = 1,3302$;

$\Phi = 0,90320 \rightarrow \text{Prob}(m \leq x) = 0,90320$;

El riesgo de que se exceda es del $1 - 0,90320 = 0,10$, es decir 10 %.

BIBLIOGRAFIA

1. SANCHEZ-ARCILLA, A.: «Long Term Analysis of Wave Climate Using Short-Term Techniques». 3rd. International Symposium on offshore Mechanics and Actic Engineering, ETCE, New Orleans, Louisiana, February 12-16, 1984.
2. BATTJES, J. A.: «Long-term Wave Statistics». IInd WEGEMT Graduate School, Norges Tekniske Hogskobe, Trondheim, 1979.
3. HOUMB, O. G., and VIK, I.: «Statistical Models for Estimating Storm Duration». Division of Port and Ocean Engineering. Norges Tekniske Hogskobe, Trondheim, 1975.
4. HOUMB, O. G., and VIK, I.: «On the Duration of Sea State». Report of the Ship Research Institute of Norway, Trondheim, 1977.
5. GRAHAM, C.: «The Parameterisation and Prediction of Wave Height and Wind Speed Persistence Sustistics for Oil Industry Operational Planning Purposes». Coastal Engineering, Vol. 6, Feb. 1962.
6. RICE, S. O.: «Mathematical Analysis of Random Noise», Selected papers on Noise and Stochastic Processes. Dover Publication Inc. 1954.
7. LONGUET-HIGGINS, M. S.: «On the Statistical Distribution of the Height of Sea Waves», Journal of Marine Research, Vol. 11, No. 3, 1952.
8. CARTWRIGHT, D. E., and LONGUET-HIGGINS, M. S.: «The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function», Proceedings of the Royal Society A., Vol. 237, 1965.
9. GODA, Y.: «Numerical Experiments on Wave Statistics with Spectral Simulation», Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 9, No. 3, Sept, 1970.
10. BRETSCHNEIDER, C. L.: «Wave Variability and wave Spectra for Windgenerated Gravity Waves», U.S. Army Corps. of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 113, 1959.
11. CAVANIE, A., ARHAN, M., and ERRATY, R.: «A. Statistical Relationship between Individual Height and Periods of Storm Waves», Proceeding Boss 76, Trondheim, 1976.
12. LONGUET-HIGGINS, M. S.: «on the Joint Distribution of the Periods and Amplitudes of Sea Waves», Journal Geophysical Research, Vol. 80, No. 18, June 1975.
13. OCHI, M. K.: «Wave Statistics for the Design of Ships and Ocean Structures». Proceeding SNAME, New York 1978.
14. FANG, Z. S., and HOGBEN, N.: «Analysis and Prediction of Long-term Probability Distributions of Wave Height and Periods», National Maritime Institute Report R 146, 1962.
15. OVERVIK, T., and HOUMB, O. G.: «A Note on the Distribution of Wave Steepness». Division of Port and Ocean Engineering. Norges Tekniske Hogskole, Trondheim, 1977.
16. EWING, J. A.: «Mean Length of Runs of High Waves». Journal of Geophysical Research, Vol. 78, No. 12 Apr. 1973.

17. NOLTE K. G.: «Statistics of Larger Waves in a Sea State», Proc. ASCE, WW4, Nov. 1979.
18. OCHI, M. K.: «Extreme Value of Wave and Ship Responses Subject to the Markov Chain Condition», Journal of Ship Research, Vol. 23, No. 3 Sept. 1979.
19. LE MEHAUTE, B.: «Wave Agitation Criteria for Harbours», Port's 77.
20. JANINI CUESTA, L.: «Construcción de obras de abrigo en los puertos». Revista de Obras Públicas. Abril 1979.
21. BRAY, R. N.: «Dredging. A Handbook for Engineers». Edward Arnold.
22. WIEGEL, R. L.: «Oceanographical Engineering. Pseintice-Hall».
23. BATTJES, J. A.: «Synthesis of design climate». Publicaciones de Breakwaters design and Construcción. 4-6. Mayo 1983. Londres.
24. MESTA, M. A.: «Specification of construction-climate». Publicación n.º 2 de «Breakwaters design and Construction». 4-6 Mayo 1983. Londres.
25. SANCHEZ-ARCILLA, A.: «Dinámica y Cinemática de estructuras y vehículos marinos». 1982. Servicio de Publicaciones MOPU.
26. Rodríguez Inciarte, Pedro: «Planificación de la construcción de diques verticales». II Curso de oceanografía y Obras Portuarias. Santander 1979.
27. VAREALA CARNERO, OVIDIO: «Construcción de obras de abrigo». II Curso de oceanografía y Obras Portuarias. Santander 1979.



Agustín Sánchez-Arcilla y Conejo



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Madrid y Doctor Ingeniero por la Universidad Politécnica de Catalunya. Ha realizado, también, estudios de post-grado y doctorales en universidades del Reino Unido, República Federal Alemana y Noruega. Ha trabajado en el Laboratorio de Puertos R. Iribarren (M.O.P.U.) y en el Departamento de Puertos, Costas e Ingeniería Oceanográfica de la Universidad Politécnica de Catalunya. Asimismo ha trabajado en colaboración con el Centro de Estudios de Costeros de la Universidad de California y realizado publicaciones científicas en diversas revistas, congresos y symposia, tanto nacionales como internacionales. Actualmente es Jefe del Departamento de Puertos, Costas e Ingeniería Oceanográfica de la Universidad Politécnica de Catalunya.

José Luis Estrada Llaquet



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (Promoción 1972). Tras dos años de práctica profesional a pie de obra en empresa constructora, entra en la Junta del Puerto de Tarragona como Ingeniero Contratado. Funcionario del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos desde el año 1977, ocupa la plaza de Jefe de la Sección de Proyectos y Obras de dicha junta del Puerto, cargo que desempeña en la actualidad. Desde el curso 1978-79 es, además, profesor Encargado de Curso de la asignatura Puertos, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.