

# Ingeniería Civil

NÚM. 163/2011

ISSN: 0213-8468



PEDRO SUÁREZ BORES,  
ingeniero, profesor, investigador  
y proyectista  
Premio Nacional de Ingeniería



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE FOMENTO

MINISTERIO  
DE MEDIO AMBIENTE  
Y MEDIO RURAL  
Y MARINO

**CEDEX**

CENTRO DE ESTUDIOS  
Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS

# Holcim lanza su nueva gama Supercem®

## Los cementos y hormigones que más valor aportan a sus obras

- ✓ **Durabilidad:** mejor impermeabilidad y resistencia a los ataques corrosivos
- ✓ **Eficiencia:** mayor desarrollo de resistencias y menor espesor de recubrimientos de las armaduras
- ✓ **Sostenibilidad:** mejor uso de recursos naturales y menos emisiones de CO<sub>2</sub>

Consulte todas las ventajas de Supercem® a su gestor comercial o entre en [www.holcim.es](http://www.holcim.es)

# Ingeniería Civil

NUM. 163 - JUL.AGO.SEP. - 2011



Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

Publicación incluida en el programa Editorial para 2011



MINISTERIO  
DE FOMENTO

SECRETARÍA  
GENERAL  
TÉCNICA

CENTRO DE  
PUBLICACIONES

## COMITÉ DE REDACCIÓN

### Presidente

Miguel González Portal

### Vocales

Enrique Dapena García

Víctor Elviro García

Antonio Lechuga Alvaro

Pablo Mira McWilliams

M<sup>a</sup> Angeles de Pablo Sanmartín

Francisco Javier Sainz de Cueto Torres

Francisco Sinis Fernández

Jaime Tamarit Rodríguez

## REDACCIÓN

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas  
Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid - Telf.: 913 35 72 69 - Fax: 913 35 72 49  
e-mail: [ingcivil@cedex.es](mailto:ingcivil@cedex.es)

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) no se hace responsable de las opiniones, teorías o datos publicados en los artículos de Ingeniería Civil, siendo ello responsabilidad exclusiva de sus autores.

## COORDINACIÓN DE PUBLICIDAD

Manuel Pombo Martínez

## PUBLICIDAD

Oronse, 6 - Telfs.: 915 55 36 93 - Fax: 915 56 40 60 - 28020 Madrid  
e-mail: [revistacivil@terra.es](mailto:revistacivil@terra.es)

**PRECIO DE ESTE EJEMPLAR: 12,25€**

I.S.S.N.: 0213-8468 - N.I.P.O.: 163-11-001-5

Depósito Legal: M-28150-1971 - AUTOEDICIÓN Y PUBLICIDAD



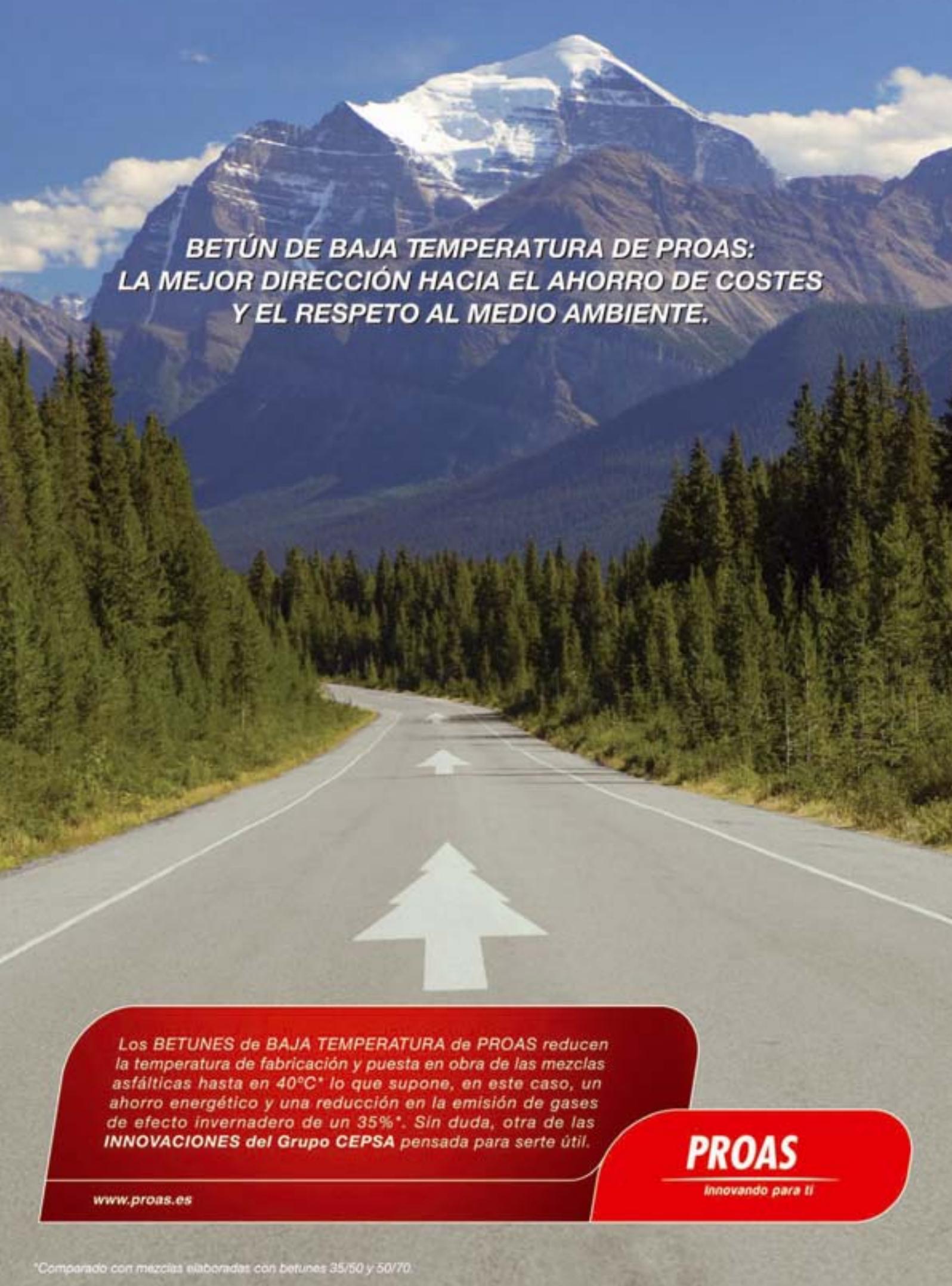
**NUESTRA PORTADA:** Pedro Suárez Bores, ingeniero, profesor, investigador y proyectista. Premio Nacional de Ingeniería 2002.

# SUMARIO

PEDRO SUÁREZ BORES, INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. Mariano Navas Gutierrez	3
UNA APROXIMACIÓN A LAS INVESTIGACIONES DE PEDRO SUÁREZ BORES. Antonio Lechuga Álvaro	5
ANEXO 1: OLA DE CÁLCULO. Pedro Suárez Bores	10
ANEXO 2: ACCIÓN DEL OLEAJE SOBRE LAS ESTRUCTURAS EXTERIORES. Pedro Suárez Bores	16
SEMBLANZA DE PEDRO SUÁREZ BORES. Galo F. Díez Rubio	33
PEDRO SUÁREZ BORES, INICIADOR DE LA MEDIDA SISTEMÁTICA DEL OLEAJE EN ESPAÑA. Mercedes Martínez Clemente, José Carlos Santás López y Luis Tejedor Martínez	41
PEDRO SUÁREZ BORES, PREMIO NACIONAL DE INGENIERÍA CIVIL DEL AÑO 2002. Manuel L. Martín Antón	47
SÍNTESIS FÍSICO-MATEMÁTICA DEL MÉTODO SISTÉMICO MULTIVARIADO. Pedro Suárez Bores	49
RECUERDOS DE PEDRO. Vicente Negro Valdecantos	63
PEQUEÑOS RECUERDOS DE LOS GRANDES MAESTROS. UNA INTRODUCCIÓN A UN ARTÍCULO INÉDITO DE PEDRO SUÁREZ BORES. Felipe Martínez Martínez	67
CONTRIBUCIONES ESPAÑOLAS RECIENTES A LA INGENIERÍA DE COSTAS. Pedro Suárez Bores	68
LA GESTIÓN INTEGRADA SOSTENIBLE DEL LITORAL EN LA ACTUALIDAD. José Luis Almazán Gárate y Carlos Foradada Rodríguez	75
EL PROBLEMA DEL DESLINDE DE LA ZONA MARÍTIMO TERRESTRE. J. Javier Díez y J. Víctor Monnot	89

En nuestra página web <[www.cedex.es](http://www.cedex.es)>  
encontrará las normas para la publicación de artículos





**BETÚN DE BAJA TEMPERATURA DE PROAS:  
LA MEJOR DIRECCIÓN HACIA EL AHORRO DE COSTES  
Y EL RESPETO AL MEDIO AMBIENTE.**

Los **BETUNES** de **BAJA TEMPERATURA** de **PROAS** reducen la temperatura de fabricación y puesta en obra de las mezclas asfálticas hasta en **40°C\*** lo que supone, en este caso, un ahorro energético y una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero de un **35%\***. Sin duda, otra de las **INNOVACIONES** del Grupo **CEPSA** pensada para serte útil.

[www.proas.es](http://www.proas.es)

**PROAS**

Innovando para ti

\*Comparado con mezclas elaboradas con betunes 35/50 y 50/70.

# Presentación

## Pedro Suárez Bores, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

El 25 de noviembre de 2010 falleció Pedro Suárez Bores, Ingeniero de Caminos Canales y Puertos y con él, sin duda, uno de los referentes de la ingeniería portuaria y costera en España.

Yo creo que todas las profesiones, también, naturalmente, los ingenieros de caminos y, seguramente, toda la ciudadanía en su conjunto, necesitan referentes que nos orienten sobre los valores, méritos y capacidades que deben alimentar nuestro día a día, en el ejercicio de nuestras actividades.

Es más, yo diría que es muy difícil querer una profesión sin querer a las personas que la ejercen o la han ejercido y, muy en concreto, las que han creado escuela, aquellas cuyos nombres están asociados al conocimiento en cada una de sus especialidades.

Cuando se habla de la fórmula de Iribarren, por ejemplo, nos estamos refiriendo a una expresión que nos permite calcular el peso de los bloques de los mantos de un dique sometidos a la sollicitación del oleaje, pero también nos estamos refiriendo a una persona, a sus estudios, a su capacidad de observación y análisis, a la aportación que ha hecho a la ingeniería, a la posibilidades que ha abierto en el cálculo y diseño de obras marítimas. De alguna forma, se le da cuerpo y alma a la fórmula, lo que ayuda a sentirse miembro de un colectivo.

Y no hace falta que la fórmula o método de diseño o cálculo lleve el nombre de su autor. Sabemos que detrás hay un ingeniero o unos ingenieros que han iluminado el camino que tenemos que recorrer los demás y que nos provoca un sentimiento de orgullo por la pertenencia a su mismo colectivo.

El compromiso con la profesión de estas personas constituye uno de sus sellos de identidad, su auténtica vocación, desde luego muy alejada de la estricta motivación económica, que ninguno puso como objetivo principal de su quehacer.

Cuenta José Borrel en el prólogo del libro de Juan Benet, *Prosas civiles*, que en una ocasión un periodista le preguntó a Benet por qué ejercía la ingeniería si ya era una de las más sólidas voces de la literatura en lengua castellana. Benet contestó: ¿y que quiere usted, que me dedique a la mendicidad? Esta respuesta aclara en primer lugar su desconfianza en vivir de la literatura, pero, conociendo su obra ingenieril y literaria, en modo alguno se puede deducir de ella que concibiera la profesión exclusivamente como un medio de vida. La profesión era parte de él, no existiendo, dada

su historia personal, posibilidad alguna de vivir si no era ejerciendo de ingeniero de caminos.

Para estas personas, como es el caso de Pedro Suárez Bores, no cabe definición más exacta y precisa que la de asociar a su nombre el título de ingeniero de caminos, canales y puertos, como no es posible referirse a Velázquez, por ejemplo, sin añadir su condición de pintor.

La ingeniería de caminos está llena de profesionales que han jugado ese papel, de forma que no sería lo que es en la actualidad, no desarrollaría el papel en la Sociedad que desempeña, sin el concurso de estas personas. Pedro Suárez Bores, este asturiano por vocación, nacido en Valladolid, es uno de ellos.

Sus méritos quedan perfectamente reflejados en la motivación del Jurado que le otorgó el Premio Nacional de Ingeniería en 2002:

*“Por su trayectoria como profesor, investigador y proyectista y por el conjunto de su aportación a la ingeniería de puertos y costas, a través de sus trabajos y estudios sobre las costas españolas, sobre la morfología del litoral y su gestión, el oleaje y las corrientes, a las que ha sabido añadir facetas de innovación tecnológica, que le convierten en pionero mundial en las redes exteriores de prevención de oleaje, en la clasificación y formulación de playas y en el análisis multi-variado para cálculos marinos, condiciones todas ellas que ponen de relieve aspectos singulares de entre los sociales, económicos, estéticos y tecnológicos que acompañan a las infraestructuras del transporte marítimo”.*

Pero, además, para nosotros los funcionarios del CEDEX, Pedro Suárez Bores es un doble referente. Durante diez años trabajó en lo que hoy se denomina Centro de Estudios de Puertos y Costas. Es un honor saber, y que se sepa, que en el CEDEX han trabajado personas de gran mérito y prestigio profesional, entre ellas Pedro Suárez Bores.

En vida, las enseñanzas y trabajos de Pedro Suárez Bores animaron a muchos de nosotros a entusiasmarlos con la ingeniería portuaria y costera. Estoy seguro que su memoria y fama seguirán animando a promociones jóvenes de ingenieros a seguir profundizando en el conocimiento y perfeccionamiento de esta especialidad de la ingeniería.

**MARIANO NAVAS GUTIERREZ**  
DIRECTOR DEL CEDEX



## grandes proyectos, nuevas fronteras

En Ineco la calidad, la innovación, la tecnología y el talento se unen para desarrollar grandes proyectos que contribuyen a la proyección internacional de la tecnología española.

# ineco

Referente en ingeniería y consultoría de transporte

Aeronáutico · Ferroviario · Transporte urbano · Carreteras  
Visítanos en [www.ineco.es](http://www.ineco.es)

# Una aproximación a las investigaciones de Pedro Suárez Bores

ANTONIO LECHUGA ÁLVARO (\*)

## 1. INTRODUCCIÓN

Como homenaje a la figura de Pedro Suárez Bores se nos presenta la oportunidad de tratar de ordenar sus estudios y sobre todo analizar las publicaciones más características para colocar su figura en el plano que sin duda se merece. Hay que tener en cuenta que muchos de los conceptos y muchas de las maneras de abordar la ingeniería marítima y costera en la actualidad tienen su origen en Pedro. Su papel revulsivo e innovador en los años sesenta del siglo pasado es casi legendario. Frente al tratamiento esencialmente monocromático del oleaje del gran Iribarren, Pedro supo ver los nuevos desarrollos que nos llegaban de fuera y que consistían, esencialmente, en la aproximación espectral del oleaje real. Ni que decir tiene que en esos años, su famosa publicación 4-B, "Introducción a la estructura del oleaje" causó estragos en la comunidad portuaria. Recuerdo en Junio de 1970 al entonces Director del Puerto de Valencia decir que la 4-B era chino manchú (dicho literalmente). Pues bien, al día de hoy, el menos estudioso de los portuarios se sorprendería si en las realizaciones y los cálculos que pasan por sus manos no se considerara la estructura espectral del oleaje. A esto último han colaborado muchos, pero el papel de ariete fue llevado a cabo por Pedro Suárez Bores.

Sus innovaciones, claro está, no se limitaron al oleaje sino que se extendieron por otros campos que iremos señalando entre los que destacaremos ahora sus estudios de playas.

Aunque aparecerá sin duda en otros trabajos de este monográfico es conveniente señalar que Pedro terminó la carrera de Ingeniero de Caminos en 1959 e ingresó en el Cuerpo en 1962. Prácticamente desde este año trabaja en el CEDEX, primero con Iribarren y a partir de 1967 con Casto Nogales. Desde finales de los sesenta hasta 1973 Pedro fue Subdirector del entonces llamado "Laboratorio de Puertos Ramón Iribarren". En 1974 sigue siendo Subdirector y actúa como Director en funciones. En 1975 es nombrado Director del Laboratorio D. Jaime González Pérez y Pedro deja el CEDEX para incorporarse de pleno a La Escuela de Caminos de la que era profesor desde casi el inicio de su carrera profesional al comienzo de los años sesenta del pasado siglo.

Las publicaciones de Pedro Suárez Bores admiten diversas clasificaciones. Una clasificación relativamente cómoda sería ordenarlas por series según la entidad editora (por ejemplo, la serie B del Laboratorio de Puertos, las publicaciones de la Escuela, otras ediciones, etc.). Alternativamente se pueden ordenar por fechas, y esto nos daría una idea de su "trayectoria vital", o por sus contenidos dividiéndolas en grupos más o menos homogéneos (oleaje y su estructura, flotadores, estudios generales, formas costeras y playas, método multivariado y estructuras, etc). Esta última ordenación es la que seguiremos en este trabajo.

Por último se ha querido aprovechar la oportunidad que brinda este número monográfico para reproducir íntegramente

dos interesantes trabajos de Pedro, Ola de Cálculo (1968) y Acción del Oleaje Sobre las Estructuras Exteriores (1968). Ambos trabajos se encuentran anexados al final de este artículo.

## 2. ESTRUCTURA DEL OLAJE

Quizás la publicación de Pedro Suárez Bores donde mejor se refleja su visión conjunta de la manera moderna de abordar el tratamiento del oleaje real sea la ya citada "Introducción a la estructura del oleaje" Laboratorio de Puertos CEDEX 1967. Esta publicación prologada por Casto Nogales y Olano establece una síntesis de sus estudios en esta área y al mismo tiempo un índice de sus realizaciones futuras. El esquema es simple, claro y conciso. La publicación se divide en tres partes:

- Parte 1. Descripción del oleaje.
- Parte 2. Previsión del oleaje.
- Parte 3. Regímenes de oleaje y de temporales.

En la primera parte, en la Introducción, se abordan muy brevemente dos temas cuyo tratamiento era bastante común en los estudios anteriores a esta fecha en todo el mundo: la onda teórica y la generación del oleaje. Los estudios sobre la onda teórica eran clásicos y se habían desarrollado fundamentalmente en el siglo XIX. En España Iribarren y Casto Nogales habían trabajado en ella. Pedro se centra en el desarrollo de la onda infinitesimal de Airy, citando también la llamada onda cnoidal y la onda solitaria.

En el apartado 2 de esta primera parte aparece la "Descripción espectral del oleaje". Comienza con un estudio teórico basado en el análisis generalizado de Fourier y describe fundamentalmente el espectro de frecuencias con indicación de los espectros direccionales. Ejemplos de espectros reales y el cálculo del periodo óptimo completan este apartado.

En el apartado 3 Pedro aborda la "geometría estadística del oleaje" en un intento de conseguir los modelos de probabilidad tanto de la superficie libre como de la altura de ola. Para ello parte de los sucesivos "momentos" de la distribución espectral, cerrando, por tanto el círculo de la descripción del oleaje real. Como no podría ser de otro modo la función de distribución es cogida es la de Rayleigh. El estudio teórico de dicha distribución da la serie de valores de las diferentes alturas del oleaje en función de una altura significativa que, generalmente, es la media del tercio de alturas más altas (cuadros 1.1 y 1.2 de esta publicación). Esto que hoy nos parece casi trivial, no lo era a mediados de los años sesenta del siglo pasado.

En la parte 2, "Previsión del oleaje", Pedro se esfuerza en la aplicación práctica de los apartados anteriores. Para ello en la Introducción, usando los conceptos de la acción del viento sobre la superficie líquida, llega a la definición de oleaje totalmente desarrollado, o, en caso contrario, de oleaje parcialmente desarrollado. Esto último, señala Pedro, puede producirse por estas tres alternativas:

1. Duración limitada. El Fetch mayor que el mínimo, pero el tiempo menor que el mínimo.

(\*) Dr. Ing. De Caminos, Canales y Puertos, Académico correspondiente. CEDEX.

## 2 - DESCRIPCIÓN ESPECTRAL DEL OLEAJE

### 2.1 - Espectro de energía del oleaje.

Sea  $\zeta(\vec{x}, t)$  la función que representa el desplazamiento de la superficie líquida con respecto al nivel medio - oleaje - y  $B(\vec{k}_1, \omega_1)$  su transformada de Fourier generalizada (TFG). Entonces

$$(1.5) \quad \zeta(\vec{x}, t) = \iiint B(\vec{k}_1, \omega_1) e^{-i(\vec{k}_1 \cdot \vec{x} - \omega_1 t)} d\vec{k}_1 d\omega_1$$

en donde  $\vec{x}$  y  $\vec{k}$  son la expresión vectorial del espacio y del número de onda respectivamente

$$(1.6) \quad \begin{aligned} \vec{x} &= (x, y) \\ \vec{k} &= \left( \frac{2\pi}{L} \cos\theta, \frac{2\pi}{L} \sin\theta \right) = \left( \frac{\omega^2}{g} \cos\theta, \frac{\omega^2}{g} \sin\theta \right) \end{aligned}$$

$\theta$  es la dirección de las ondas componentes y  $\omega = 2\pi/T$  es su frecuencia.

Ya que la integración se extiende a la totalidad del espacio tridimensional definido por los números de onda ( $\vec{k}$ ) y frecuencia ( $\omega$ ) una variación de ( $\vec{r}$ ) en ( $\vec{x}$ ) y de ( $\tau$ ) en ( $t$ ) no tendrá efecto, por lo tanto en el punto ( $\vec{x} + \vec{r}$ ;  $t + \tau$ ) tendremos

$$(1.7) \quad \zeta(\vec{x} + \vec{r}, t + \tau) = \iiint B^*(\vec{k}, \omega) e^{i(\vec{k} \cdot (\vec{x} + \vec{r}) - \omega(t + \tau))} d\vec{k} d\omega$$

Haciendo entonces

$$(1.8) \quad \begin{aligned} \vec{k}_2 &= \vec{k} - \vec{k}_1 \\ \omega_2 &= \omega - \omega_1 \end{aligned}$$

la función de covariancia del oleaje vendrá dada por

FIGURA 1. Introducción de la descripción espectral del oleaje. Publicación 4-B. P. Suárez Bores.

2. El Fetch menor que el mínimo.
3. Tanto el Fetch como la duración son menores que el mínimo.

En cada caso la problemática es distinta pero el tratamiento es análogo. Finalmente Pedro siguiendo, fundamentalmente, a Bretschneider establece los valores significantes del oleaje en función del Fetch, de la duración y de la velocidad del viento (cuadro 2.1 de la publicación).

En su evidente deseo de dar un contenido práctico e esta publicación, Pedro estudia de determinar la velocidad del viento, y sobre todo, como calcular el fetch en casos singulares, con obstáculos aislados o conectados a la costa.

Finalmente dentro de esta Parte 2, Pedro introduce el espectro teórico de cálculo que resulta ser el llamado PMK (Pierson, Moskowitz, Kitaigorodskii).

En la parte 3 la publicación 4-B aborda los "Regímenes de oleaje y de temporales". Entendiendo por el primero el porcentaje de tiempo que la altura significante excede cierto va-

lor en el año medio, y entendiéndose por el segundo, la frecuencia de presentación de la altura significante máxima que excede cierto valor. El primero es válido para estudios costeros y el segundo "esencial en el proyecto de las obras exteriores" (Suárez Bores). En esta parte 3 los ejemplos son de Saville en Cabo Cod y esto nos indica el convencimiento que tenía el autor de la necesidad de contar con datos propios.

En la publicación 5-B Ola de cálculo, 1968 también del Laboratorio de Puertos del CEDEX Pedro parte de la estructura del oleaje de la publicación que hemos comentado, pero hace hincapié en el estudio económico de las obras (diques de escollera) con lo que se aparta un poco del epígrafe que estamos tratando.

En los Apuntes de la Escuela de Caminos de 1964, "Estructura del oleaje" Pedro Suárez Bores trata los mismos temas que en la publicación 4-B pero con ejemplos más detallados. Aquí la parte A está dedicada a la descripción estadística, la parte B a la descripción espectral, la parte C a la previsión del oleaje y la parte D a los regímenes. Al ser estos

unos Apuntes de clase la claridad y la concisión no son tan evidentes como en la publicación 4-B. No obstante Pedro sigue interesado en las aplicaciones y con datos de uno y otro lado reconstruye ejemplos que ilustran la teoría.

Los Apuntes de clase de 1965, "Introducción a la estructura del oleaje" son, con algunas variaciones, equivalentes a la publicación del mismo título.

### 3. ESTUDIOS DE CARÁCTER GENERAL

Además de los estudios sobre oleaje que hemos comentado, Pedro acometió otra serie de estudios de carácter general en diferentes campos que pasamos a exponer a continuación:

Un trabajo titulado, "Notas sobre Mecánica de Fluidos" que constituye la publicación 1-B (1964) del Laboratorio de Puertos del CEDEX prologada por D. Ramón Iribarren Cavanillas y que es el conjunto de cuatro artículos bilingües español-ingleses y que como señala D. Ramón forman una unidad. Los títulos respectivos son, "1. Expresiones generales del esfuerzo cortante tangencial en régimen laminar", "2. Expresiones generales 'exactas' del coeficiente de fricción medio en movimientos permanentes, régimen turbulento, contorno liso", "3. Expresiones explícitas 'aproximadas' del coeficiente de fricción medio en movimientos permanentes, régimen turbulento, contorno liso.", y "4. Espesor de la capa límite en régimen turbulento, movimiento permanente, contornos liso y rugoso."

El trabajo titulado, "Ecuaciones generales de la Atmósfera e hidrosfera" que es la publicación 2-B (1967) del Laboratorio de Puertos del CEDEX. Esta publicación está prologada por Casto Nogales y constituye, según este una introducción a la estructura del viento en las capas bajas de la atmósfera. Esta publicación tiene los siguientes capítulos, "Dinámica de los medios deformables sobre la superficie terrestre", "Dinámica de la Fluido-esfera", "Ecuaciones generales del movimiento horizontal sobre la superficie terrestre" y "Ecuaciones del movimiento plano sobre la superficie terrestre."

"Estructura del viento en las capas bajas de la atmósfera", publicación 3-B (1967) del Laboratorio de Puertos del CEDEX. En este trabajo Pedro se vuelve a manifestar como un estudioso convencido de que para calcular es necesario conocer en profundidad. Tras una introducción expone la forma simplificada de las ecuaciones del movimiento, y a partir de aquí la estructura del viento en la atmósfera libre, la estructura del viento en la capa límite superficial, incluyendo el perfil de velocidades sobre el mar y la estructura del viento en la capa límite planetaria. Finalmente aborda el estudio del viento en ráfagas, tan importante en la práctica marítima.

### 4. DINÁMICA DEL FLOTADOR

Pedro dedicó considerable esfuerzo al estudio del "flotador". Su idea estaba clara: Profundizar en su conocimiento, como medio para mejorar el diseño de las instalaciones portuarias de atraque. En una serie de cuatro publicaciones del Laboratorio de Puertos del CEDEX los estudia con detenimiento. En la primera de estas publicaciones, la 8-B (1969) "Acción del viento sobre estructuras y flotadores" se parte de las consideraciones que aparecen en una previa publicación sobre la estructura del viento en el mar. A continuación se incide sobre el efecto del viento en el flotador, teniendo en cuenta la superficie de obra muerta y viva y los coeficientes de arrastre. Como ya ocurriera en publicaciones anteriores un apartado está dedicado al viento de cálculo.

En la publicación 9-B (1969) "Dinámica del atraque de flotadores" se estudia el impacto del flotador sobre las defensas en el muelle de atraque. Pedro estudia el impacto teórico se-

gún la velocidad y el rumbo del flotador, pero también lo que llama el impacto de cálculo según las características del muelle y su vida útil.

En la publicación 10-B (1969) del Laboratorio de Puertos del CEDEX, "Dinámica del flotador en áreas restringidas" se estudian los efectos de la navegación en canales o en masas de agua limitadas o con poca profundidad. Esta publicación comienza con el estudio de las ondas de acompañamiento u ondas Kelvin, tanto en profundidades indefinidas como en profundidades reducidas.

Por supuesto el objetivo de todos estos estudios es el apuntado al comienzo de apartado.

En la publicación 11-B (1969) "Ordenación de vías navegables" Pedro se impone como objetivo 'el dimensionamiento tanto en planta como en alzado de las "vías navegables"- canales, accesos a los puertos, etc...' según sus propias palabras. Trata fundamentalmente de la maniobrabilidad de los flotadores, el círculo de parada, distancia de parada, sobre-ancho de canales, etc, etc para asegurar un correcto diseño.

### 5. FORMAS COSTERAS

Pedro Suárez Bores en su faceta de Ingeniero de Costas estudió todos los aspectos que interactúan en la franja litoral. Algunas de sus contribuciones fueron realmente novedosas y causaron notable impacto en el mundo técnico científico.

Entre las publicaciones dedicadas en una u otra medida a la franja litoral destaca la 12-B (1970) "Introducción a la dinámica de los sistemas dispersos" del Laboratorio de Puertos del CEDEX, que sienta las bases del movimiento de los materiales granulares no cohesivos. Es un estudio sobre las granulometrías, ángulo de rozamiento interno, sedimentación y coeficiente de arrastre, como base para posteriores estudios de estabilidad.

En una publicación de 1963, "Geomorfología oceánica" del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX Pedro trabaja sobre la edad y la composición de los océanos y sobre todo sobre el eustatismo y la isostasia del mar pleistoceno. Desde nuestros tiempos de estudiante todos recordamos el énfasis de Pedro sobre las variaciones del nivel del mar.

En el trabajo, Hidráulica y Procesos Litorales de 1963 se encuentran las bases de la actual Ingeniería de Costas. Así, por ejemplo, en el apartado de Hidráulica Litoral aparece la teoría de Longuet-Higgins sobre la longshore-current que, por supuesto es la actualmente aplicable al transporte de sedimentos. En la parte de Procesos Litorales aparecen consideraciones absolutamente actuales sobre la erosión y la acumulación, el transporte litoral e incluso la solución de playa apoyada en un espigón (según la ecuación de transmisión del calor). Como vemos, todo perfectamente actual. Termina este trabajo con un epígrafe sobre clasificación y evolución de la costa dependiendo de la regresión o transgresión marina.

Llegamos a uno de los aspectos más valorados de la actividad investigadora de Pedro Suárez Bores como es su Clasificación de formas costeras.

La clasificación de formas costeras aparece, al menos en cuatro trabajos de Pedro:

1. Clasificación de formas costeras. Revista de Obras Públicas 3158 Junio 1978.
2. Clasificación de formas costeras: Formulación y matriz de evolución. ROP 3163 Noviembre 1978.
3. Shore classification-simple forms with prevailing wind wave action. Int. Congress IAEG-AIGI Madrid 1978.
4. Formas Costeras. ETS ING Caminos, Canales y Puertos 1980.

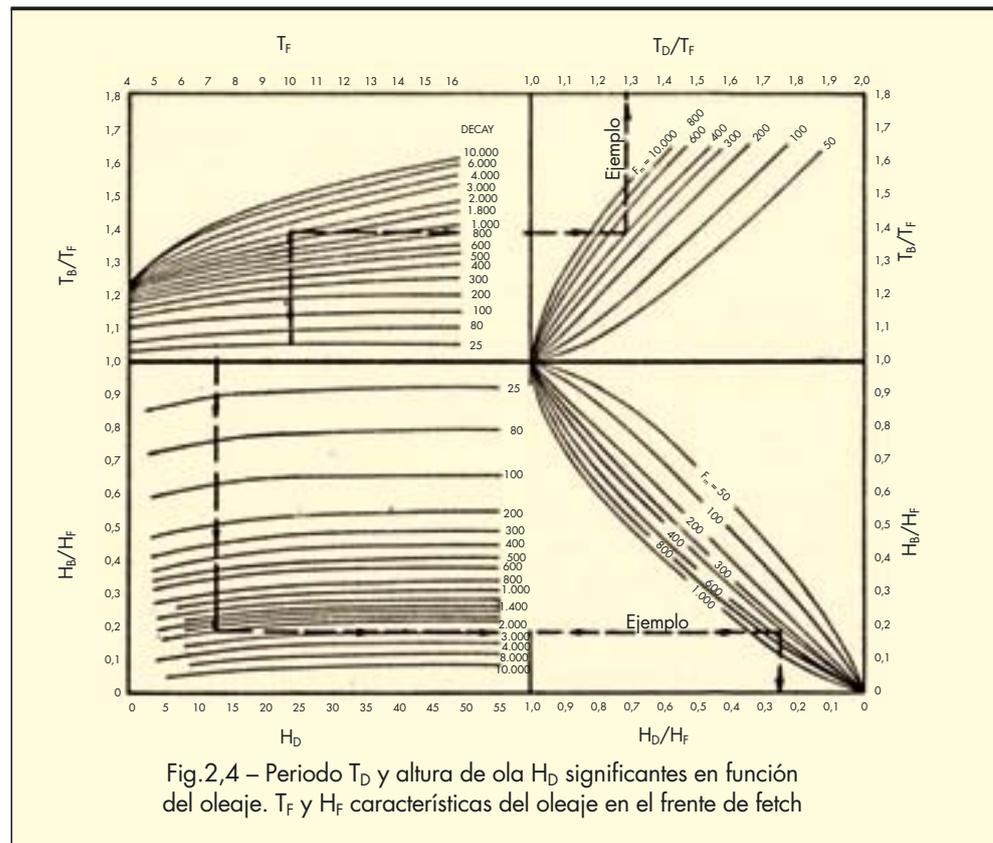


FIGURA 2. Grafico del cálculo del periodo y la altura del oleaje. Publicación 4-B. P. Suárez Bores.

Como muy bien expresa Pedro esta clasificación se refiere fundamentalmente a singularidades dinámicas y cuando el principal agente del modelado de la costa es el oleaje. Otro aspecto importante es que para cada playa es concebible una matriz de evolución de acuerdo con las variaciones naturales o antrópicas. En este texto de formas costeras Pedro estudia lo que llama las “Formas costeras de erosión” (fundamentalmente los acantilados) en contraposición a las “Formas costeras de depósito”.

## 6. DISEÑO Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS

Este es otro de los aspectos básicos de los estudios de Pedro. Ha dedicado mucho tiempo, esfuerzo y talento al diseño y cálculo de las estructuras marítimas introduciendo los estudios económicos. Ya en la publicación 5-B “Ola de cálculo” aparece un apartado 1.4 Estudio económico de las obras sometidas a la acción del oleaje y dentro del mismo un subapartado 1.4.4. Influencia del valor de los bienes defendidos por la obra. Simplemente con la consideración de estos títulos queda clara cual es la filosofía de Pedro en estos temas.

En la publicación 7-B (1968) “Acción del oleaje sobre las estructuras exteriores” del Laboratorio de Puertos del CEDEX se estudia el efecto del oleaje sobre pilas cilíndricas pero considerando separadamente la onda monocromática del oleaje espectral. Pedro estudia, así mismo, la interacción de varios cilindros y su cálculo dinámico. Los efectos sobre tuberías submarinas también son estudiados.

En los Apuntes de clase Oleaje I/II del Curso 1969/70 aparece como título el “Análisis económico de las obras y estructuras sometidas a la acción del oleaje” con dos desarrollos completos “Análisis económico de obras rígidas” y Análisis económico de obras deformables”.

Llegamos finalmente al trabajo más querido por Pedro: Sistemas aleatorios multivariados de diseño o como lo había llamado recientemente Método sistémico multivariado.

En el texto “Obras marítimas exteriores. Análisis de fiabilidad de los sistemas de diseño” 1980 ya aparece como subtítulo Sistemas aleatorios multivariados de diseño. En este texto se analiza la fiabilidad global de los diques verticales y de los diques de escollera determinando las “hipersuperficies” críticas de fallo parcial o total.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha intentado repasar los trabajos de investigación de Pedro Suárez Bores, partiendo de sus publicaciones. En primer lugar cabe destacar que desde el comienzo de su actividad profesional Pedro ha sido un estudioso y un pionero, introduciendo por primera vez en nuestro país procedimientos y tecnologías que, sin exageración, cambiaron la manera de tratar los temas de la ingeniería marítima. Probablemente el paradigma de lo anterior lo constituye su publicación 4-B “Introducción a la estructura del oleaje”.

Otro aspecto a destacar de Pedro es su labor de magisterio, por lo que se puede decir que toda la comunidad marítima y costera le debe algo.

Pedro publicó muchas más cosas de las que hemos reseñado pero, creemos, que las que han “sentado doctrina” están señaladas. Su trabajo más reciente, El método sistémico multivariado, merecería un análisis riguroso y pormenorizado, pero esto se lo vamos a dejar al propio Pedro, ya que en este mismo número aparece la versión revisada y puesta al día por el autor. Sirva esto como un postrer homenaje de admiración y cariño.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Suárez Bores, P. Notas sobre Mecánica de Fluidos. 1- B (1964) Laboratorio de Puertos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Ecuaciones generales de la Atmósfera e hidrosfera. 2-B (1967) Laboratorio de Puertos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Estructura del viento en las capas bajas de la atmósfera. 3-B (1967) Laboratorio de Puertos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Introducción a la estructura del oleaje 4-B (1967) Laboratorio de Puertos CEDEX.

Suárez Bores, P. Ola de cálculo. 5-B (1968) Laboratorio de Puertos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Acción del oleaje sobre las estructuras exteriores. 7-B (1968) Laboratorio de Puertos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Acción del viento sobre estructuras y flotadores. 8-B (1968) Laboratorio de Puertos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Dinámica del atraque de flotadores. 9-B (1968) Laboratorio de Puertos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Dinámica del flotador en áreas restringidas. 10-B (1969) Laboratorio de Puertos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Ordenación de vías navegables. 11-B (1968) Laboratorio de Puertos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Introducción a la dinámica de los sistemas dispersos. 12-B (1968) Laboratorio de Puertos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Geomorfología oceánica. (1963) Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

Suárez Bores, P. Estructura del oleaje (1964) ETS de Ing. Caminos, Canales y Puertos.

Suárez Bores, P. Hidráulica y Procesos Litorales (1963).

Suárez Bores, P. Clasificación de formas costeras (1978) Revista de Obras Públicas 3158, Junio 1978 pp.431-445.

Suárez Bores, P. Clasificación de formas costeras: Formulación y matriz de evolución. (1978) ROP 3163 Noviembre 1978 pp. 855-866.

Suárez Bores, P. Obras marítimas exteriores. Análisis de fiabilidad de los sistemas de diseño( 1980) ETS Ing. Caminos, Canales y Puertos.

Suárez Bores, P. Formas Costeras.(1980) ETS Ing. Caminos, Canales y Puertos.

Suárez Bores, P. Apuntes de clase Oleaje I/II del Curso 1969/70 (1976) ETS Ing. Caminos, Canales y Puertos.

Suárez Bores, P. Shore classification-simple forms with prevailing wind wave action. (1978) Int Congress IAEG-AIGI Madrid.

Suárez Bores, P. Análisis aleatorio multivariado: Terminología y conceptos básicos. (1977) ROP 3151 Nov. 1977 pp 831-836.

Suárez Bores, P. Sistemas aleatorios multivariados de estabilidad: aplicación a las obras marítimas (1979) ROP 3168 Abr. 1979 pp. 257-262.



Dragados y  
Obras Marítimas



Más de 100 millones de m<sup>3</sup> dragados en puertos y costas



DRAVOSA

En todo tipo de materiales

Con toda clase de equipos



Plaza de Castilla, 3, 21 A - 28046 Madrid, España - Tel.: +34 91 323 02 07 - Fax: +34 91 323 06 87 - [infodravosa@dravosa.com](mailto:infodravosa@dravosa.com)

# Anexo 1: Ola de cálculo

PEDRO SUÁREZ BORES

## 1. INTRODUCCIÓN

Cartwright y Longuet-Higgins (1956) han demostrado que para cada estado del mar, definido por su energía o por su altura de ola significativa,  $H_{1/3}$ , existen relaciones de la forma:

$$\frac{H_{1/n}}{H_{1/3}} = f_1(n, \varepsilon) \quad (1)$$

$$\frac{H_{\max, N}}{H_{1/3}} = f_2(N, \varepsilon) \quad (2)$$

en donde las alturas de ola características  $H_{1/n}$  y  $H_{\max, N}$ ,  $H_K$  en general, representan respectivamente la altura de ola media de las  $1/n$  olas más altas y la altura de ola máxima probable de  $N$  olas, siendo  $\varepsilon$  un parámetro que nos define la anchura del espectro.

En la mayor parte de los casos prácticos puede admitirse que para las condiciones de cálculo de las estructuras costeras  $\varepsilon = 0$ , de donde, Longuet-Higgins (1952).

$$\frac{H_{1/n}}{H_{1/3}} = \frac{1}{1,416} \left( (\ln n)^{1/2} + \frac{n\sqrt{\pi}}{2} \left\{ \phi \left\{ (\ln n)^{1/2} \right\} \right\} \right) \quad (3)$$

y

$$\frac{H_{\max, n}}{H_{1/3}} = \frac{1}{1,416} (\ln N)^{1/2} \quad (4)$$

en donde:

$$\phi \left\{ (\ln n)^{1/2} \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{\ln n}}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx$$

Del régimen de temporales, Saville (1953), podemos determinar la altura de ola significativa del máximo temporal que se presenta probablemente una vez cada  $(m)$  años.

Si estos  $(m)$  años corresponden al plazo para el cual proyectamos la obra, este temporal será denominado temporal de cálculo y la altura de ola correspondiente, que escribiremos:

$$H_C = (H_K)_m \quad (5)$$

## ALTURA DE OLA DE CÁLCULO

Aunque hasta el momento presente, 1964, no haya sido propuesto un criterio aceptado universalmente para la determinación de  $(K)$  y  $(m)$ , sino que cada Centro e incluso cada persona aplica su propia experiencia, creernos de gran interés presentar aquí algunas de las alturas de ola de cálculo propuestas, ya que en ellas comienzan a matizarse las diferencias de comportamiento de los diversos tipos de obras a la acción del oleaje.

En el Technical Report N°. 4 del Beach Erosion Board se recomienda, con carácter general, para las costas del Atlántico y del Golfo de Méjico –en donde la acción de los huracanes es predominante– la altura de ola característica  $H_{1/10}$ ,

con una frecuencia de presentación del temporal de cálculo de 20 a 50 años. En la misma publicación se recomienda, sin embargo, la altura de ola característica  $H_{1/3}$  para las costas del Pacífico, “debido a que los grandes temporales se presentan varias veces al año”.

Para el proyecto del dique de escollera de la isla artificial de Rincom –California– J.A. Blume y J.M. James (1959) emplearon la altura de onda característica:

$$H_{\max, N} = 1,90 H_{1/3} \quad (6)$$

que de acuerdo con la fórmula (4) corresponde a  $N = 1.500$  olas. La frecuencia de presentación del temporal de cálculo fue del orden de una vez cada 50 años y fue adoptado como resultado de un estudio económico de los gastos de conservación de la obra.

A. Paape y A.W. Walther (1963), recomiendan como ola característica de cálculo la dada en el ábaco N°. 8 de la publicación de estos autores, que suponemos corresponde a la altura de ola máxima del máximo del temporal de cálculo, a juzgar por los valores dados en el citado ábaco. La vida previsible recomendada por estos autores se deduce del riesgo admisible para la obra.

Ch.E. Lee (1963) clasifica las obras marítimas en estructuras rígidas, semirígidas y flexibles, incluyendo entre las dos primeras los diques verticales, muros, revestimientos, etc., mientras que en la segunda se incluyen los diques de escollera.

La ola de cálculo recomendada para estructuras rígidas es la “máxima que se presenta una sola vez en un tren típico de 100 olas”, o sea:

$$H_{\max, N=100} = 1,6 H_{1/3} \quad (7)$$

Para estructuras semirígidas Ch.E. Lee considera como ola de cálculo la comprendida entre:

$$\frac{H_{0,1}}{H_{1/3}} = 1,07$$

y

$$\frac{H_{0,01}}{H_{1/3}} = 1,51$$

## 2. ALTURA DE OLA CARACTERÍSTICA DE CÁLCULO

Por su comportamiento a la acción del oleaje pueden clasificarse las obras en dos grupos: Al primero pertenecen todas aquellas cuya ruina es ocasionada por la acción de una sola ola, mientras que en el segundo se pueden incluir las obras cuya total destrucción es originada por varias olas.

Ciertas obras tales como diques verticales, espaldones, estructuras formadas por cajones, etc., deberán poder resistir la acción de todas y cada una de las olas que sobre ellas inciden, ya que una sola puede ser capaz de causar su colapso. Evidentemente estas obras, que denominaremos “es-

estructuras monolíticas”, deberán, pues, ser calculadas con la ola máxima probable ( $H_{\max, N}$ ) del temporal de cálculo. Si, como veremos más adelante, la frecuencia de presentación del temporal de cálculo es de una vez cada ( $m$ ) años, se puede determinar ( $H_{\max, N}$ ), conocido el número de olas ( $N$ ) correspondiente al máximo del temporal de máxima duración probable en esos ( $m$ ) años.

Aunque este proceso pueda parecer impreciso y laborioso, dada la dificultad en la limitación del máximo de los temporales y la necesidad de determinar el “Régimen de Duración” de éstos, no lo es tanto si consideramos que debido a la pequeña variación que para grandes valores de ( $N$ ) experimenta la relación (4) podemos introducir simplificaciones tales que obtengamos ( $H_{\max, N} / H_{1/3}$ ) en forma inmediata y con aproximación suficiente para la mayor parte de los casos prácticos.

En efecto, admitiendo que la duración del máximo del temporal de máxima duración que se presenta probablemente una vez cada ( $m$ ) años se halle comprendido entre los valores extremos de 24 y 4 horas y que su periodo medio aparente sea de 12 segundos, resulta:

$$N = \frac{4 \cdot 60 \cdot 60}{12} = 1.200 \text{ olas en 4 horas}$$

$$N = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60}{12} = 7.200 \text{ olas en 24 horas}$$

de donde aplicando la expresión (4), se obtiene:

$$\frac{H_{\max, N}}{H_{1/3}} = \frac{7.200}{1.200} = 2,11 \quad (8)$$

y

$$\frac{H_{\max, N}}{H_{1/3}} = \frac{1.200}{7.200} = 1,88 \quad (9)$$

o bien

$$\frac{H_{\max, N}}{H_{1/3}} = \frac{7.200}{1.200} = 1,12 \quad (10)$$

En general, pues, y con un error máximo del 6% será suficiente admitir prácticamente que el tiempo de duración del máximo del temporal de cálculo es del orden de 12 horas. Aunque posterior investigación debe de concretar este extremo, como orientación puede tomarse entonces el siguiente valor provisional:

$$\frac{H_{\max, N}}{H_{1/3}} = 2 \quad (11)$$

Esta altura de ola característica debería emplearse así mismo en la determinación del afloramiento máximo en aquellos casos en que éste no deba rebasar la obra bajo ningún concepto. Por ejemplo en el caso de diques-muelles, diques o presas de tierra, etc.

En el caso en que sea necesaria la acción de varias olas para la destrucción de la obra, el empleo de la altura de ola máxima probable como ola de cálculo podría resultar excesivamente pesimista y costoso. Siendo además este caso de excepcional importancia en la técnica marítima, ya que comprende los diques de escollera, a él dedicaremos una especial atención.

Si en el laboratorio fuese posible la generación del oleaje complejo, con espectro de energía semejante al de la naturaleza, es evidente que cualquiera de las altura de ola características nos serviría como ola de cálculo, ya que el coeficiente de la Fórmula para el cálculo de Diques de Escollera tomaría el valor apropiado para cada altura de ola característica

adoptada. No obstante, dada la dificultad de obtener actualmente en el laboratorio el oleaje complejo, habremos de recurrir, al menos de momento, a otros medios para obtener la ola característica de cálculo.

Tal como se describe en la ponencia presentada por Iribarren (1965) al XXI Congreso Internacional de Navegación, los ensayos muestran que al ir aumentando la altura del tren cilíndrico de ondas prácticamente iguales generada en el laboratorio, los diques de escollera permanecen inalterados, salvo la caída de algunos cantos sueltos.

A partir de una cierta altura, denominada de “iniciación de avería”, la curva acumulada de cantos desprendidos es función creciente de la altura de onda. Sin embargo, el número de cantos desprendidos en esta “zona de inestabilidad parcial” es siempre pequeño comparado con la totalidad de los cantos del manto y para cada altura de onda el dique siempre alcanza la estabilidad.

Tal situación desaparece al llegar la altura de onda al valor de “rotura total”, para el cual el dique ya no se estabiliza y la avería es función únicamente del número de ondas que sobre él inciden.

Si, alcanzada la altura de onda de “rotura total” son necesarias ( $k$ ) ondas para la destrucción del dique –desaparición de la primera capa de cantos del manto principal–, en la hipótesis de que “el tren simple de ondas iguales se comporte en rotura en forma semejante a la del tren complejo de olas en la naturaleza”, es lógico pensar que estas ( $k$ ) olas serán precisamente las ( $k$ ) mayores olas del máximo del temporal de cálculo.

Si el máximo del temporal de cálculo comprende  $N$  olas, la altura característica de cálculo debiera ser, pues, la de subíndice:

$$\frac{1}{n} = \frac{k}{N} \quad (12)$$

Como en el caso de las alturas de ola máximas probables, ya considerado en páginas anteriores, el error en la apreciación de ( $1/n$ ) no influye decisivamente sobre el cociente ( $H_{1/n} / H_{1/3}$ ), ya que para valores de ( $n$ ) relativamente grandes el crecimiento de la expresión (3) es relativamente pequeño y los errores prácticamente despreciables.

En efecto, admitiendo como valor provisional  $k = 150$  ondas y adoptando como en páginas anteriores un periodo medio aparente de 12 segundos y duración de 4 a 24 horas para el máximo del temporal de cálculo, resulta inmediatamente:

$$\frac{1}{n} = \frac{150}{4 \cdot 60 \cdot 60} = \frac{1}{8} \text{ para 4 horas} \quad (13)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{150}{24 \cdot 60 \cdot 60} = \frac{1}{48} \text{ para 24 horas} \quad (14)$$

y de la expresión (3):

$$\frac{H_{1/8}}{H_{1/3}} = 1,34 \text{ para 4 horas} \quad (15)$$

y:

$$\frac{H_{1/48}}{H_{1/3}} = 1,46 \text{ para 24 horas} \quad (16)$$

Con carácter general, pues, se puede emplear prácticamente la altura de ola característica ( $H_{1/20}$ ):

$$\frac{H_{1/20}}{H_{1/3}} = 1,40 \quad (17)$$

cuyo error con respecto a (15) y (16) es inferior al 6%.

En aquellos casos en que la vida previsible sea muy reducida, evidentemente  $N$  será menor, ya que es menor la duración probable del máximo del temporal de cálculo. En el caso en que  $m < 10$  años podría adoptarse como altura característica de cálculo ( $H_{1/10}$ ).

$$\frac{H_{1/10}}{H_{1/3}} = 1,27 \quad (18)$$

cuya diferencia con ( $H_{1/20}$ ) es del orden del 10%.

### 3. FRECUENCIA DE PRESENTACIÓN DEL TEMPORAL DE CÁLCULO (m)

La determinación del valor de (m), fundada en la duración o "vida previsible" para las obras, entra de lleno dentro del campo de la moderna teoría de los coeficientes de seguridad de las obras, no sólo las afectadas por la acción del oleaje, sino por cualquier otro tipo de sobrecarga.

En términos de probabilidad la seguridad absoluta es una utopía. El riesgo siempre existe, aunque éste puede ser mayor o menor. Los edificios, los vehículos, las obras civiles, todo lo fabricado o construido por el hombre tiene un riesgo de fallo, fallo que en ciertas circunstancias puede adquirir caracteres de catástrofe.

En términos generales debieran ser más seguras las obras cuyo fallo puede ocasionar la pérdida de vidas humanas, y la de aquéllas cuya ruina representa la pérdida o inmovilización de grandes bienes defendidos o dependientes de ellas. Sin embargo en ningún caso la seguridad habrá de llevarse a extremos tales que hagan impracticable la obra, salvo en el caso en que el riesgo de pérdida de vidas sea excesivo.

Por su duración o "vida previsible" pueden las obras clasificarse en dos grupos: Al primero pertenecen las obras cuya "vida previsible" (V) es perfectamente conocida, mientras que en el segundo grupo incluiremos todas aquéllas cuya duración es imprevisible en la época del proyecto. Ya que las obras pertenecientes al primer grupo llevan implícito un sentido de duración limitada las denominaremos "obras temporales", mientras que llamaremos a las del segundo "obras permanentes".

Parece lógico admitir en principio que la frecuencia de presentación del temporal de cálculo (m) esté relacionado con la "vida previsible" de las "obras temporales" (V), siendo aconsejable que  $m/V > 1$ . La relación  $m/V$  deberá determinarse mediante un estudio económico.

El criterio en la elección de la frecuencia de presentación del temporal de cálculo (m) es menos concreto en el caso de "obras permanentes". Aquí aún cabe una segunda clasificación que podemos basar en la finalidad de la obra. De acuerdo con este criterio de finalidad cabe distinguir entre "obras portuarias", en las que se incluyen los diques de abrigo, las instalaciones en mar abierto, etc., y "obras de defensa".

La diferencia esencial entre ambas es que siendo las primeras elementos fundamentales del tráfico habrán de evolucionar con éste y es difícil imaginar que en el plazo de un siglo e incluso 50 años no hayan de ser modificadas y más probablemente anuladas, bien por ampliación, bien por un cambio radical en el concepto funcional de este tipo de instalaciones. Por lo tanto, la "vida previsible" (V) para las "obras portuarias" –salvo en el caso en que otras razones permitan cifrar el plazo de su existencia– estimamos que debiera ser del orden de unos 50 años. Como hemos indicado anteriormente la frecuencia de presentación del temporal de cálculo (m) habrá de determinarse por estudio económico.

Ya que no existe criterio alguno para la limitación temporal de las "obras de defensa", la "vida previsible" de éstas habrá de determinarse por estudio económico, fijando a priori  $m = 50, 100, \dots$  años, de acuerdo con la importancia de la obra.

### 4. ESTUDIO ECONÓMICO DE LAS OBRAS SOMETIDAS A LA ACCIÓN DEL OLEAJE

Según hemos visto en el apartado anterior en la casi totalidad de los casos prácticos la decisión sobre la frecuencia de presentación del temporal de cálculo (m) habrá de tomarse desde un punto de vista económico.

El comportamiento de las obras a la acción del oleaje nos clasifica a éstas en dos grupos esencialmente distintos.

Al primer grupo pertenecen las obras que se arruinan o pueden arruinarse por la acción de una sola ola, con colapso completo de la estructura. Tal es el caso de las "estructuras monolíticas".

En el segundo se incluyen las obras cuya destrucción es debida a la acción de varias olas, con averías progresivas de la obra en función de la altura de ola. A partir de una cierta altura de ola, las averías afectan a la totalidad de la obra y la ruina de ésta es completa. Tal es el caso de los "diques de escolleras", naturales a artificiales.

Evidentemente cada uno de estos grupos nos ofrece una modalidad de comportamiento a la acción del oleaje que ha de reflejarse en el análisis económico a realizar.

#### 4.1. ESTUDIO ECONÓMICO DE LAS "ESTRUCTURAS MONOLÍTICAS"

Ya que las "estructuras monolíticas" se arruinan por la acción de una sola ola, de altura superior a la de cálculo, originando un daño:

$$\begin{aligned} D &= P_t \text{ para } H > H_c \\ D &= 0 \text{ para } H \leq H_c \end{aligned} \quad (18)$$

$P_t$  precio total de la obra.

que puede ocurrir en cualquier instante de la vida previsible o proyectada para la obra (V), el estudio económico de las "estructuras monolíticas" puede ser presentado en los siguientes términos:

Dada la frecuencia de presentación del temporal de cálculo (m), determinar:

- La probabilidad de presentación (E) de temporales con altura de ola característica (H) superior a la del temporal de cálculo ( $H_c$ ).
- Daños probables –al nivel de probabilidad 0,5– en el plazo de vida previsible (V).
- Daños probables –a un cierto nivel de probabilidad– en el plazo (V).

Si como hemos visto, la altura de ola característica del máximo de los temporales (H) es una variable aleatoria con función de distribución:

$$F(H) = \Pr(H \leq H_c) \quad (19)$$

en donde  $\Pr(H \leq H_c)$  denota la probabilidad de que  $H \leq H_c$ , el tiempo medio ( $\tau$ ) de presentación de temporales que cumplen la condición  $H > H_c$  será, Gumbel (1958).

$$\tau = \frac{1}{1 - F(H)} \quad (20)$$

y la probabilidad de presentación de temporales con  $H > H_c$  en el plazo de vida previsible (V), Borgman (1963).

$$E = 1 - (F(H))^V = 1 - \left(1 - \frac{1}{\tau}\right)^V \quad (21)$$

#### 4.2. DAÑOS PROBABLES EN EL PLAZO (V)

Siendo (D) la variable aleatoria que representa el daño ocurrido por la presentación de un solo temporal con al-

tura de ola característica  $H > H_c$ , tendremos, Borgman (1963).

$$J(D) = \int_0^1 P(D) d\{F(H)\} = F(H_c) + \int_{P(H_c)}^1 P(D) d\{F(H)\} \quad (22)$$

ya que:

$$P(D) = 0 \text{ para } H \leq H_c, \text{ según (18)}$$

Verificándose  $p_0 = 1 - F(H_c)$ , la expresión anterior puede escribirse en la forma:

$$J(D) = (1 - p_0) + p_0 \left( \frac{1}{p_0} \int_{F(H_c)}^1 P(D) d\{F(H)\} \right) = 1 - p_0 + p_0 G(D) \quad (23)$$

en donde  $G(D) = \Pr(D, H > H_c)$ .

Supongamos que (H) excede (k) veces ( $H_c$ ) en el plazo de vida previsible, que comprende (V) unidades de tiempo, generalmente medido en años. La expresión (23) puede escribirse entonces, Borgman (1963):

$$J_V(D) = (1 - p)^V + \sum_{k=1}^V \frac{V}{k!(V-k)!} p_0^k (1 - p_0)^{V-k} G_k(D) \quad (24)$$

Ya que la probabilidad ( $p_0$ ) es generalmente muy pequeña y el número de unidades de tiempo (V) relativamente grande, la expresión (24) tenderá hacia el límite:

$$P(D) = \lim_{p_0 \rightarrow 0} J_V(D)^V = e^{-Vp_0} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(Vp_0)^k}{k} e^{-Vp_0} G_k(D) \quad (25)$$

y la probabilidad de daño nulo en (V) unidades de tiempo:

$$P(D=0) = (1 - p_0)^V \approx e^{-Vp_0} \quad (26)$$

La función  $G_k(D)$  puede ser determinada por iteración, Borgman (1963), sin embargo en los casos dependientes de acontecimientos naturales es apropiado tomar, Cramer (1946).

$$G_k(D) = \int_0^1 \frac{e^{-x} x^{k-1}}{\Gamma(k)} dx \quad (27)$$

en donde  $\Gamma(k)$  es la función gamma completa.

Eliminando  $G_k(D)$  entre (25) Y (27) resulta finalmente:

$$P(D) = e^{-Vp_0} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(Vp_0)^k}{k} e^{-Vp_0} G_k(D) \int_0^1 \frac{e^{-x} x^{k-1}}{\Gamma(k)} dx \quad (28)$$

viniendo dados los valores de P(D) en función de ( $Vp_0$ ) por la Tabla 1.

$Vp_0$	P(D)	$Vp_0$	P(D)	$Vp_0$	P(D)
0,01	0,990	0,1	0,905	1,0	0,368
0,02	0,980	0,2	0,819	1,5	0,223
0,03	0,970	0,3	0,741	2,0	0,135
0,04	0,961	0,4	0,670	2,5	0,082
0,05	0,951	0,5	0,607	3,0	0,050
0,06	0,942	0,6	0,549	3,5	0,030
0,07	0,932	0,7	0,497	4,0	0,018
0,08	0,923	0,8	0,449	4,5	0,011
0,09	0,914	0,9	0,407	5,0	0,007

TABLA 1.

Los parámetros: media, desviación standard, coeficiente de disimetría y coeficiente de aplanamiento, nos permiten inmediatamente caracterizar la función de distribución (28). Estos parámetros pueden deducirse de la expresión de los momentos,

$$v_k = \int_0^1 x^k d\{G(x)\} \quad (29)$$

resultando la:

$$\text{Media } \mu_D = Vp_0 P_t = D \quad (30)$$

y la:

$$\text{Desviación standard } \sigma_D = P_t \sqrt{2Vp_0} \quad (31)$$

### 4.3. ESTUDIO ECONOMICO DE LOS DIQUES DE ESCOLLERA.

Según ya hemos indicado la rotura de los diques de escollera se verifica en dos fases. En la primera las averías afectan solamente al manto principal y son función únicamente de la relación  $H/H_i$ , ya que el dique alcanza la estabilidad para cada altura de ola comprendida entre la de "iniciación de averías",  $H_i$ , y la de "rotura total",  $H_r$ .

Cuando  $H/H_r \geq 1$  la destrucción del dique depende únicamente del tiempo que el oleaje actúa sobre éste, desapareciendo primero el manto principal y después, rápidamente, el resto del dique. Evidentemente esta segunda fase es análoga, para su estudio económico, a las "estructuras monolíticas", pudiendo seguirse el método indicado en los apartados 1.4.1 y 1.4.2.

Supuesta dividida la "zona de averías parciales" del manto principal en un número par de intervalos, con partición cada  $2(\Delta H)$ , la probabilidad de presentación de temporales con altura de ola característica.

$$H_{2j} < H < H_{2j+2} = H_{2(j+1)} \quad j = 1, 2, \dots, n-1$$

vendrá dada por:

$$\Delta p = \Pr(H_{2j} \leq H \leq H_{2(j+1)}) = \Pr(H \geq H_{2j}) - \Pr(H \geq H_{2(j+1)}) \quad (32)$$

Representando por  $A\{H_{2j+1}\}$  la avería media en el intervalo ( $H_{2j}, H_{2(j+1)}$ ), la avería probable en este intervalo y en la unidad de tiempo –que supondremos un año– será:

$$A\{H_{2j+1}\} (\Pr(H \geq H_{2j}) - \Pr(H \geq H_{2(j+1)})) \quad (33)$$

y los daños probables, cuya reparación se supone inmediata a la avería,

$$\Delta d_{2j+1} = K P_m A\{H_{2j+1}\} (\Pr(H \geq H_{2j}) - \Pr(H \geq H_{2(j+1)})) \quad (34)$$

en donde  $P_m$  es el precio total del manto principal por unidad de longitud y K el incremento de coste de las reparaciones sobre el valor de puesta en obra inicial del manto. Van der Kreeke y Paape (1964) recomiendan  $K = 2$ , pero cada caso particular habrá de ser considerado teniendo en cuenta los medios auxiliares disponibles y la forma de reparar la avería.

Si la partición se ha hecho con (n) intervalos, los daños probables totales anuales serán:

$$d = \sum_{j=0}^{n-1} \Delta d_{2j+1} \quad (35)$$

La capitalización correspondiente a la unidad monetaria en el plazo (V) y al interés (i) es,

$$C = \int_0^V e^{-\frac{it}{100}} dt = \frac{100}{i} \left( 1 - e^{-\frac{iV}{100}} \right) \quad (36)$$

como consecuencia, admitiendo que la presentación de temporales es igualmente probable en cada uno de los V años de la vida previsible o proyectada para la obra, resultarán los

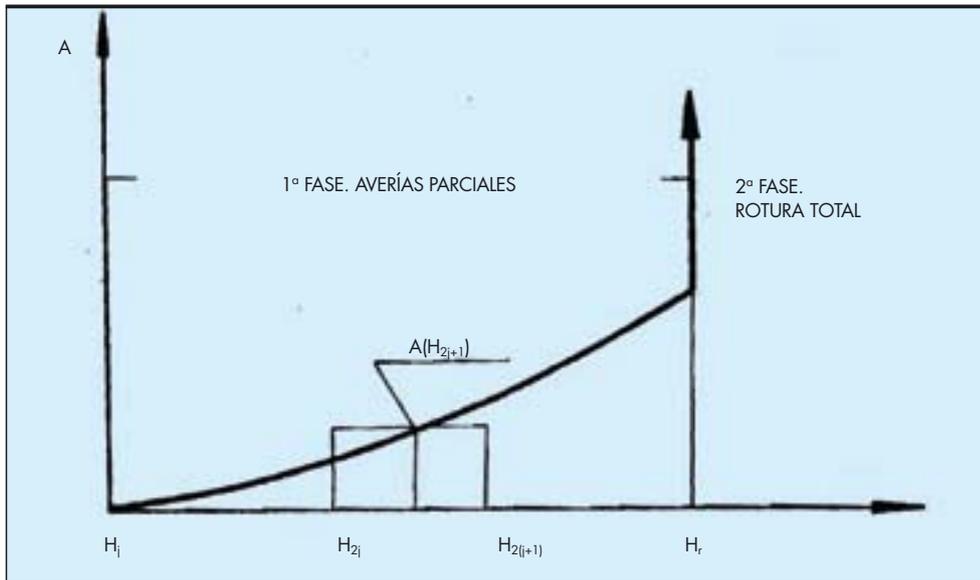


FIGURA 1.

daños o sus correspondientes gastos de conservación acumulados.

$$D = C \cdot d \quad (37)$$

El estudio económico de la 1ª. FASE de los diques de escollera difiere sensiblemente del propuesto por Van der Kreeke y Paape, ya que la probabilidad de que la altura de ola característica se encuentre en el intervalo:

$$\text{es: } H_{2j} \leq H \leq H_{2(j+1)}$$

$$\Delta p = \Pr(H \geq H_{2j}) - \Pr(H \geq H_{2(j+1)}) \quad (38)$$

en lugar de:

$$\Delta p = \Pr(H > H_{2j}) \quad (39)$$

como admiten los citados autores.

El resto del método aquí propuesto coincide esencialmente con el propuesto por Van der Kreeke y Paape en 1964.

#### 4.4. INFLUENCIA DEL VALOR DE LOS BIENES DEFENDIDOS POR LA OBRA

En muchas ocasiones el valor de los bienes defendidos o dependientes de una cierta obra puede ser muchísimo mayor que el valor de ésta.

En caso de colapso de la obra estos bienes pueden quedar total o parcialmente destruidos o inmovilizados, representando una pérdida que deberemos cifrar e incluir entre los daños probables.

#### 5. PERIODO CARACTERÍSTICO DE CÁLCULO

Cuanto hemos indicado en los apartados anteriores es aplicable únicamente en el caso en que el periodo propio de la obra no se halle comprendido en la banda de periodos característicos del oleaje.

Ciertas obras, tales como estructuras formadas por pilotes, etc., sometidas a la acción de un oleaje de moderada amplitud y de periodo medio igual o cercano al periodo propio de la estructura pueden arruinarse por resonancia, aunque la obra sea capaz de resistir esfuerzos estáticos muy superiores a los originados por las olas que producen el colapso de la estructura.

Con el fin de evitar que las estructuras exteriores entren en resonancia con el oleaje, se proyectan generalmente de

forma que su periodo propio sea del orden de un segundo o menos, ya que el espectro del oleaje posee normalmente una energía despreciable para esta gama de periodos.

En estas condiciones las estructuras exteriores se calculan desde un punto de vista estático, considerando como fuerza de cálculo la máxima probable del temporal de cálculo.

Para profundidades del orden de 60 m., sin embargo, no se puede evitar que las estructuras exteriores tengan un periodo propio comprendido entre 4 y 8 segundos, periodos que coinciden con una banda del espectro en donde la energía ya no es despreciable.

En este caso, como señalan Harleman, Nolan y Honsinger (1963) la estabilidad de la obra deberá considerarse desde un punto de vista dinámico, admitiendo como "periodo de cálculo" el correspondiente al periodo propio de la estructura.

#### 6. INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD

Ya que el oleaje está formado por la interferencia de ondas simples de periodo, fase, altura y dirección aleatorios e independientes, constituyendo como consecuencia un fenómeno puntual en el tiempo y en el espacio, los fondos no limitarán la altura de ola máxima.

En efecto cada una de las ondas componentes, de pequeña altura pueden no encontrarse en rotura por la acción del fondo, propagándose hasta la obra, en donde pueden interferir dando lugar a la altura de ola máxima. Evidentemente la probabilidad de presentación de la altura de ola máxima en estas condiciones de profundidades reducidas será menor que en el caso de profundidades limitadas o indefinidas.

Cuando la ola de cálculo no es la máxima, sino  $H_{1/n}$ , al disminuir la probabilidad de presentación de olas grandes, debido a la acción del fondo, el promedio disminuirá. Admitimos que la ola de cálculo viene entonces dada por el fondo.

Puede admitirse como condición de rotura:

$$\frac{H_C}{d} = 0,78$$

sobre pendientes del orden del 1% y

$$\frac{H_C}{d} = 0,5$$

sobre fondo horizontal.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Beach Erosion Board (1961) – Technical Report N°. 4.

Blume, J.A. Y Keith, J.M. (1959) –“Rincon offshore island and open causeway”– Probo A.S.C.E. ww. 3.

Borgman, L. (1963) –“Risk Criteria”– Proc. A.S.C.E. ww. 3.

Cartwright, D.E. y Longuet-Higgins, M.S. (1956) –“The statistical distribution of the maxima of a random function”– Proc. Roy. Soc. Ser. A - 237.

Cramer, H. (1946) –“Mathematical Methods of Statistics”– Princeton University Press.

Gumbel, E.J. (1958) –“Statistics of extremes”– Columbia Univ. Press.

Harleman, D.R.F., Nolan, W.C. y Honsinger, V.C. (1962) –“Dynamic analysis of offshore structures”– Proc. of Eighth Conference on Coastal Engineering.

rence on Coastal Engineering.

Iribarren, R. (1965) – XXI Congreso Internacional de Navegación. Estocolmo.

Lee, Ch. (1962) –“Recent advances in Coastal Structures design”– Proc. 8th Coastal Conference.

Longuet-Higgins, M.S. (1952) –“On the statistical distribution of the heights of sea waves – Journal Mar. Research II.

Paape, A. Y Walther, A.W. (1963) –“Akmon armour unit for cover layers of rubble mound breakwaters”– Proc. 8th Coastal Conference.

Saville, Th. (1953) – B.E.B. Techn. Mem. Números 36, 37 y 38.

Van der Kreeke, J. y Paape, A. (1964) –“On Optimum breakwater design”– Proc. 9th Coastal Conference.



## La Clave del Éxito reside en nuestra Capacidad de Superación

Adaptarnos a las nuevas exigencias del mercado, a las tecnologías constructivas más actuales, a la dimensión y complejidad de cada proyecto... nos permite superar los más exigentes requisitos de calidad, seguridad y respeto medioambiental. Manteniendo nuestra responsabilidad con cada uno de nuestros clientes y cumpliendo más allá de nuestros compromisos. Es así como ALDESA se sitúa hoy entre los diez mayores grupos de construcción de España, consolidándose y proyectándose con éxito hacia el futuro.

OBRAS FERROVIARIAS - CARRETERAS Y AUTOVÍAS - AEROPUERTOS - OBRAS MARÍTIMAS E HIDRÁULICAS  
URBANIZACIONES - EDIFICACIÓN - REHABILITACIONES Y REFORMAS



 **aldesa**

C/ Bahía de Pollensa, 13 - 28042 Madrid - Tel.: 91 381 92 20 - Fax: 91 381 78 03

[www.aldesa.es](http://www.aldesa.es)

# Anexo 2: Acción del oleaje sobre las estructuras exteriores

PEDRO SUÁREZ BORES

## 1. FUERZAS PRODUCIDAS POR UNA ONDA MONOCROMÁTICA

Consideremos un sólido indeformable, rígidamente unido al contorno, sumergido en el seno de un fluido afectado por un movimiento ondulatorio.

Ya que el campo de velocidades originado por una onda monocromática es no permanente, a las fuerzas de arrastre se sumarán los efectos inerciales debidos a la variación del campo de velocidades. Este problema en toda su generalidad aún no ha sido resuelto, pero puede obtenerse una aproximación aceptable admitiendo un modelo consistente en los siguientes postulados:

1. Las dimensiones transversales del sólido son muy pequeñas comparadas con las del cuadrilátero de avance. Como consecuencia el campo de velocidades puede considerarse homogéneo.  
Esta hipótesis es admisible siempre que  $D/L < 0,1$  –MacCamy y Fuchs (1954).
2. Los efectos inerciales dependen únicamente de las variaciones del campo de velocidades, de la forma del sólido y de la densidad del fluido –Fluido ideal–.
3. Los efectos de forma y rozamiento superficial –arrastre– son independientes de la variación del campo de velocidades, es decir, son función únicamente de la velocidad instantánea.
4. El proceso es boltzmaniano, es decir, puede admitirse el principio de superposición lineal –Morison, O'Brien, Johnson y Schaaf (1953)–.

### 1.1. FUERZAS DE INERCIA, $f_I$

La energía cinética del fluido comprendido dentro de un recinto (R) viene, evidentemente, dada por la expresión:

$$T = \frac{1}{2} \iiint_R \rho (u^2 + v^2 + w^2) dx dy dz \quad (1)$$

Si el fluido es ideal –post. 2– e incompresible ( $\rho = C$ ) y el movimiento irrotacional, con potencial de velocidad ( $\phi$ ), en cuyo caso:

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad v = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \quad w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2)$$

la ecuación anterior se transforma en:

$$T = \frac{\rho}{2} \iiint_R \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz \quad (3)$$

y por teorema de Green, Courant-Hilbert (1953),

$$T = \frac{\rho}{2} \iint_S \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds \quad (4)$$

en donde (ds) es el elemento diferencial de superficie, contorno del recinto (R).

En el caso de movimiento plano la ecuación anterior toma la forma:

$$T = \frac{\rho}{2} \int_S \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds \quad (5)$$

en donde (as) es el elemento diferencial de longitud de la sección normal.

Introduciendo la función de corriente ( $\psi$ ) para cuerpos de revolución es fácil demostrar, Lamb (1945), que la expresión anterior puede escribirse:

$$T = \frac{\rho}{2} \int_S \phi d\psi \quad (6)$$

#### 1.1.1. Masa hidrodinámica y masa virtual: Casos particulares

El potencial de velocidad ( $\phi$ ) y la función de corriente ( $\psi$ ) para un cilindro circular indefinido son:

$$\phi = \frac{u a^2}{r} \cos x \quad \psi = -\frac{u a^2}{r} \sin x \quad (7)$$

por lo tanto de la expresión (6) se deduce, ya que sobre el contorno  $r = a$ ,

$$T = \frac{\rho}{2} \int_0^{2\pi} (u a \cos x) (u a \cos x) dx = \frac{\rho}{2} \pi a^2 u^2 = \frac{1}{2} M_h u^2 \quad (8)$$

en donde la masa:

$$M_h = \rho \pi a^2 \quad (9)$$

es denominada “masa hidrodinámica”.

En el caso en que el sólido tenga un movimiento rectilíneo, siendo  $f_I$  la fuerza por unidad de longitud, se verificará, Lamb (1945),

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} M u^2 + \frac{1}{2} M_h u^2 \right) = u f_I \quad (10)$$

o bien, haciendo operaciones,

$$f_I = (M + M_h) \frac{du}{dt} \quad (11)$$

Este resultado suele expresarse en la forma:

$$f_I = C_m \rho \nabla \frac{du}{dt} \quad (12)$$

en donde ( $\nabla$ ) es el volumen por unidad de longitud del cilindro y ( $C_m$ ) un coeficiente adimensional, que en el caso de cilindros circulares sumergidos en el seno de un fluido indefinido es igual a 2, ya que:

$$M = M_h = \rho \pi a^2 \quad (13)$$

La experimentación realizada por Murtha (1954), demuestra que la masa hidrodinámica de cilindros circulares en las

inmediaciones de la superficie ( $M_h'$ ) es del orden de 0,5 a 0,6  $M_h$ . La masa hidrodinámica ( $M_h'$ ) y como consecuencia ( $C_m$ ) crecen con la profundidad estabilizándose en el valor ( $M_h' = M_h$ ) cuando ésta es igual o superior a dos diámetros.

Otro caso de algún interés es la esfera. De acuerdo con Lamb (1945), el potencial de velocidades entonces:

$$\phi = \frac{1}{2} u \frac{a^3}{r^2} \cos x \quad (14)$$

Eliminando ( $\phi$ ) entre (4) y (14) se deduce inmediatamente:

$$T = \frac{1}{4} \rho a u^2 \int_0^\pi \cos^2 \cdot x \cdot 2\pi a \sin x \, dx = \frac{1}{3} \rho \pi a^3 u^2 = \frac{1}{2} M_h u^2 \quad (15)$$

La masa hidrodinámica correspondiente a una esfera es pues equivalente a la mitad de la masa desplazada por el sólido.

### 1.2. FUERZAS DE ARRASTRE, $f_D$

Por ser el agua un fluido real, con viscosidad, existirán fuerzas adicionales debidas al rozamiento con el contorno y al efecto forma –estela–. Estas fuerzas dependen de la forma y rugosidad de la superficie, del número de Reynolds y para grandes velocidades del número de Mach.

La determinación de  $f_D$  es un problema clásico habiendo sido extensamente estudiado por numerosos investigadores: Stokes, Osseen, Newton, en el caso de la esfera, Goldstein, Blasius, Hiemenz, Thom, Schiller y Linke, en el caso de cilindros.

Generalmente la fuerza de arrastre total,  $f_D$ , que comprende los efectos de rozamiento superficial y de forma, (Figura 1), suele expresarse en la forma:

$$f_D = \frac{1}{2} \rho C_D S |u| u \quad (16)$$

en donde (S) es la superficie de la sección normal al movimiento y ( $C_D$ ) es un coeficiente adimensional.

La razón de indicar el cuadrado de la velocidad en la forma  $|u| u$  es para tener en cuenta el signo, que en el caso de una onda monocromática es función del tiempo y del espacio.

### 1.3. FUERZA RESULTANTE, $f$

En virtud del postulado 4, la fuerza resultante que actúa sobre un cuerpo sumergido, sometido a la acción de una onda monocromática, viene dada por la superposición lineal de la fuerza inercial –expresión (12)– y la fuerza de arrastre total –expresión (16)– es decir:

$$f = f_D + f_I = \frac{1}{2} \rho C_D S |u| u + \rho C_m \nabla \frac{du}{dt} \quad (17)$$

en donde:

$$\begin{aligned} C_m &= 2 && \text{para cilindros circulares.} \\ C_m &= 1,5 && \text{para esferas.} \end{aligned} \quad (18)$$

Cuando la aceleración convectiva es mucho mayor que la aceleración local, esto es, si:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} / \frac{\partial u}{\partial t} \ll 1 \quad ; \quad u \frac{\partial u}{\partial y} / \frac{\partial u}{\partial t} \ll 1 \quad (19)$$

Schlichting (1955), es válido usar la aceleración local en lugar de ( $du/dt$ ).

En el caso de la onda de Airy:

$$\frac{u}{\frac{\partial u}{\partial x}} = \pi \frac{H}{L} \frac{ch \, \kappa(h+z)}{sh \, \kappa h} \cos(\kappa x - \omega t) \quad (20)$$

se cumplirá la condición (19) siempre que el peralte de la onda ( $H/L$ ) sea pequeño y/o las profundidades relativamente grandes.

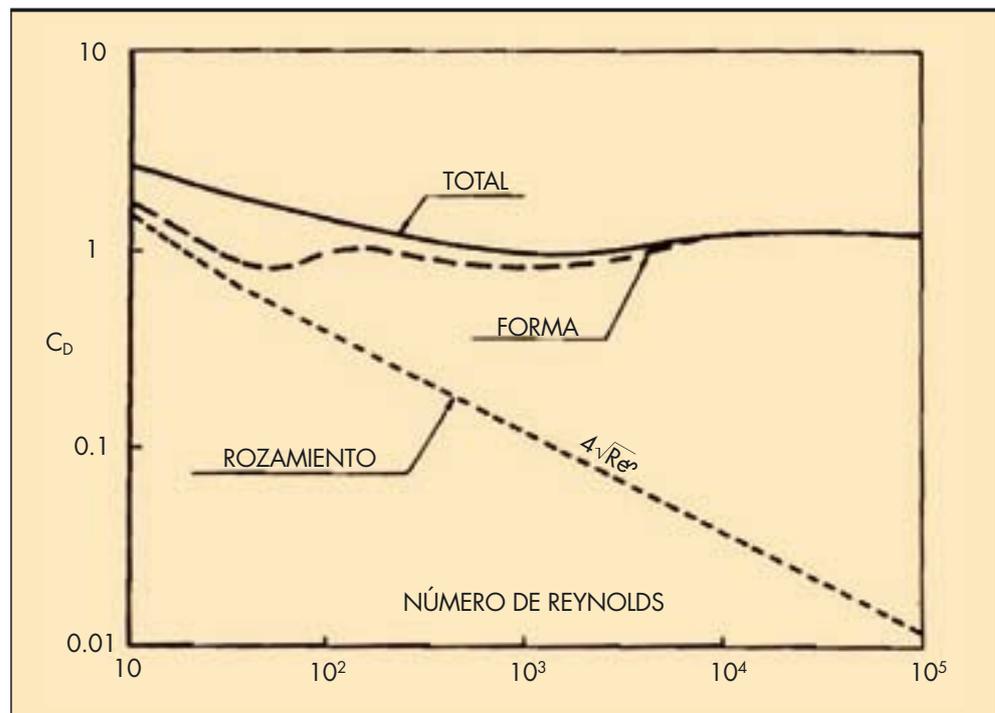


FIGURA 1. Coeficiente de arrastre en cilindros. Thom (1929), Schiller y Linke (1935).

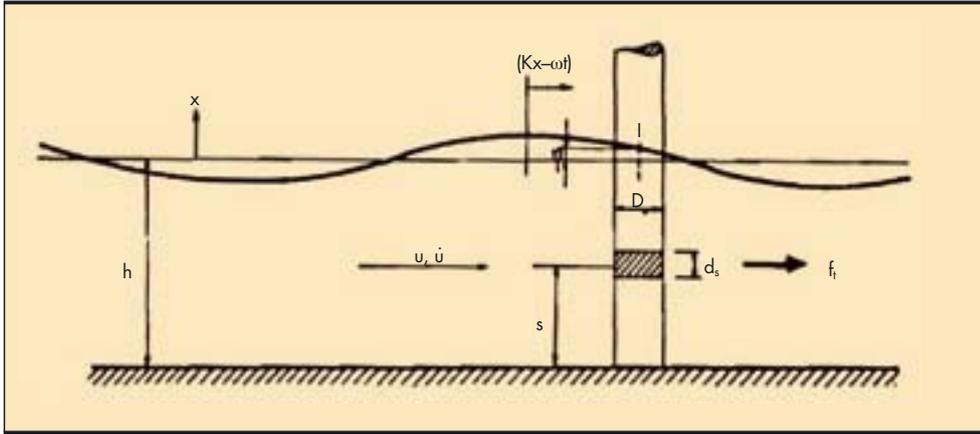


FIGURA 2.

## 2. FUERZAS Y MOMENTOS PRODUCIDOS POR UNA ONDA MONOCROMÁTICA SOBRE PILAS CILÍNDRICAS

Los cilindros verticales rígidos, de sección circular, son elementos muy frecuentemente empleados en la sustentación de las estructuras exteriores. Por tal motivo en este apartado deduciremos las ecuaciones aplicables a este caso particular.

De la expresión (17) se deduce inmediatamente que la fuerza resultante por unidad de altura y a la profundidad (z) viene dada por:

$$f = f_D + f_I = \frac{\rho}{2} C_D D |u| u + \frac{\pi}{4} \rho C_m D^2 \dot{u} \quad (21)$$

en donde se indica con ( $\dot{u}$ ) la derivada de la velocidad con respecto al tiempo.

Denominando:

$$k = \frac{1}{2} \rho C_D D \quad (22)$$

$$c = \frac{\pi}{4} \rho C_m D^2$$

la expresión (21) toma la forma:

$$f = k |u| u + c \dot{u} \quad (23)$$

Las fuerzas y momentos totales que actúan sobre el cilindro serán entonces:

$$F_t = F_D + F_I = \int_0^{h+\eta} f ds \quad (24)$$

$$M_t = M_D + M_I = \int_0^{h+\eta} s f ds \quad (25)$$

en donde,

$$F_D = \int_0^{h+\eta} f_D ds = \frac{1}{2} \rho C_D D \int_0^{h+\eta} |u| u ds \quad (26)$$

$$F_I = \int_0^{h+\eta} f_I ds = \frac{\pi}{4} \rho C_m D^2 \int_0^{h+\eta} \dot{u} ds \quad (27)$$

$$M_D = S_D F_D = \int_0^{h+\eta} s f_D ds = \frac{1}{2} \rho C_D D \int_0^{h+\eta} s |u| u ds \quad (28)$$

$$M_I = S_I F_I = \int_0^{h+\eta} s f_I ds = \frac{\pi}{4} \rho C_m D^2 \int_0^{h+\eta} s \dot{u} ds \quad (29)$$

Los valores de las integrales dependen del modelo adoptado para la onda monocromática: Onda de Airy, Onda de Stokes

en segunda o tercera aproximación, onda cnoidal, etc. En general escribiremos:

$$\int_0^{h+\eta} |u| u ds = k_D H^2 \quad (30)$$

$$\int_0^{h+\eta} \dot{u} ds = k_I H \quad (31)$$

$$\int_0^{h+\eta} s |u| u ds = k_D S_D H^2 \quad (32)$$

$$\int_0^{h+\eta} s \dot{u} ds = k_I S_I H \quad (33)$$

### 2.1. MODELO LINEAL

De la onda de Airy, véase "Estructura del Oleaje", se deduce:

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos \theta = \eta \quad (34)$$

$$u = -\frac{H}{2} \omega \frac{\text{ch } \kappa(h+z)}{\text{sh } \kappa h} \cos \theta \quad (35)$$

$$\dot{u} = -\frac{H}{2} \omega^2 \frac{\text{ch } \kappa(h+z)}{\text{sh } \kappa h} \text{sen } \theta \quad (36)$$

en donde:

$$\theta = \kappa x - \omega t$$

$$\kappa = \frac{2\pi}{L} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (37)$$

Considerando como origen de coordenadas la cresta de onda,

$$\theta = -\omega t \quad (37a)$$

eliminando ( $\zeta$ ), ( $u$ ), ( $\dot{u}$ ) entre las expresiones (30), (31), (34), (35) y (36) e integrando, ya que  $s = h+z$ , resulta:

$$k_D = \frac{g}{4} \frac{\kappa h}{\text{sh } 2\kappa h} \left[ \frac{\text{sh } 2\kappa h \left(1 + \frac{\zeta}{h}\right)}{2\kappa h} + \left(1 + \frac{\zeta}{h}\right) \right] |\cos \omega t| \cos \omega t \quad (38)$$

$$k_I = \frac{g}{2} \frac{\text{sh } \kappa h \left(1 + \frac{\zeta}{h}\right)}{\text{ch } \kappa h} \text{sen } \omega t \quad (39)$$

En profundidades reducidas, ( $h/L \ll 1$ ),

$$\text{sh } kh \approx kh \quad ; \quad \text{ch } kh \approx 1 \quad (40)$$

por lo tanto las ecuaciones (38) y (39) pueden simplificarse en la forma:

$$K_D = \frac{g}{4} \left( 1 + \frac{\zeta}{h} \right) |\cos \omega t| \cos \omega t \quad (41)$$

$$K_I = \frac{g}{2} kh \left( 1 + \frac{\zeta}{h} \right) \text{sen } \omega t \quad (42)$$

En profundidades indefinidas, en donde se verifica ( $(h/L) > 1/2$ ) y ( $(\zeta/h) < (H/2h) \ll 1$ ), resulta:

$$K_D = \frac{g}{8} |\cos \omega t| \cos \omega t \quad (43)$$

$$K_I = \frac{g}{2} \text{sen } \omega t \quad (44)$$

Los brazos de palanca son entonces, Dean y Harleman (1966),

$$S_D = S_I = \frac{h}{2} \left( 1 + \frac{\zeta}{h} \right) \quad (45)$$

en profundidades reducidas, y,

$$S_D = \left( \frac{kh - 1/2}{kh} \right) h \quad (46)$$

$$S_I = \left( \frac{kh - 1}{kh} \right) h \quad (47)$$

en profundidades indefinidas.

### 2.1.1. Máximos de la fuerza resultante, $f_m$

Eliminando (u) y ( $\dot{u}$ ) entre las ecuaciones (21), (35) y (36), los máximos de las fuerzas de arrastre,  $f_D$ , e inercia,  $f_I$ , vendrán dados por:

$$f_D = K_1 H^2 \quad \text{para } \theta = 0 \quad (48)$$

$$f_I = K_2 H \quad \text{para } \theta = \pi/2 \quad (49)$$

en donde,

$$k_1 = \frac{1}{2} \rho C_D D \left( \frac{\omega}{2} \frac{\text{ch } \kappa(h+z)}{\text{sh } kh} \right)^2 \quad \text{para } \theta = 0 \quad (50)$$

$$k_2 = \frac{\pi}{4} \rho C_m D^2 \frac{\omega^2}{2} \frac{\text{ch } \kappa(h+z)}{\text{sh } kh} \quad \text{para } \theta = \pi/2 \quad (51)$$

La fuerza resultante puede entonces escribirse:

$$f = K_1 H^2 |\cos \theta| \cos \theta + K_2 H \text{sen } \theta \quad (52)$$

Los máximos de la expresión (52) vendrán dados por la solución de,

$$\frac{df}{d\theta} = -2 K_1 H^2 \cos \theta \text{sen } \theta + K_2 H \cos \theta = 0 \quad (53)$$

de donde se obtiene inmediatamente,

$$\beta = \theta = \text{arc sen } \frac{K_2}{2K_1 H} \quad (54)$$

con,

$$-\pi/2 \leq \beta \leq \pi/2 \quad (54a)$$

o bien, ya que el máximo de la fuerza resultante,  $f$ , ocurre siempre en o inmediatamente delante de la cresta de la onda.

$$0 \leq \beta \leq \pi/2 \quad (54b)$$

Sustituyendo,

$$\text{sen } \beta = \frac{K_2}{2 K_1 H} \quad (55)$$

y

$$\cos^2 \beta = 1 - \text{sen}^2 \beta = 1 - \frac{K_2^2}{4 K_1^2 H^2} \quad (56)$$

en la expresión (52) se obtiene,

$$f_m = K_1 H^2 + \frac{1}{4} \frac{K_2^2}{K_1} \quad (0 \leq \beta \leq \pi/2) \quad (57)$$

Eliminando ( $K_1$ ), ( $K_2$ ) y ( $H$ ) entre (48), (49) y (57) esta expresión se transforma en:

$$f_m = f_D \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{f_I}{f_D} \right)^2 \right] \quad (0 \leq f_I/f_D \leq 2) \quad (58a)$$

$$f_m = f_I \quad (f_I/f_D \geq 2) \quad (58b)$$

Es inmediato comprobar que un resultado análogo se obtiene considerando las fuerzas totales,  $F_D$  y  $F_I$ , que actúan sobre el cilindro. Como consecuencia, Reid y Bretschneider (1953);

$$F_m = F_{Dm} \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{F_{Im}}{F_{Dm}} \right)^2 \right] \quad (0 \leq F_{Im}/F_{Dm} \leq 2) \quad (59a)$$

$$F_m = F_{Im} \quad \left( \frac{F_{Im}}{F_{Dm}} \geq 2 \right) \quad (59b)$$

En la figura 3 aparece la representación gráfica de la expresión (59)<sub>a,b</sub> para el caso de modelo lineal, Reid y Bretschneider (1953).

### 2.2. VARIABILIDAD DE LOS COEFICIENTES $C_D$ Y $C_m$

Numerosos investigadores de distintos centros –O'Brien, Morrison y Johnson (1953), Wiegel, Beebe y Moon (1959) de la Universidad de California; Harleman y Shapiro (1955), Harleman, Shapiro y Marlow (1957) del Instituto Tecnológico de Massachussets (M.I.T.); Reid (1957), Wilson (1957), (1965) del Texas A & M– entre otros, se han ocupado de la determinación experimental de los coeficientes de arrastre e inercial ( $C_D$  y  $C_m$ ), efectuando observaciones tanto en la naturaleza como en el Laboratorio.

En todos los casos los coeficientes  $C_D$  y  $C_m$  se han calculado a través de la expresión (21) y como consecuencia dependen del modelo de onda adoptado.

Es interesante destacar que la variabilidad tanto de los valores medios como de la desviación standard de  $C_D$  disminuyen al aumentar el grado de aproximación de la onda teórica empleada.

En la Tabla 1 puede apreciarse como para la onda de Stokes en tercer grado de aproximación los valores de  $C_D$  y  $s_{C_D}$  para dos experiencias bastantes distintas solo ofrecen ligeras diferencias, mientras que con el modelo lineal estas diferencias son francamente acusadas.

En parte éstas son debidas a que en profundidades reducidas la teoría lineal no es aceptable como modelo del oleaje, siendo en este caso más apropiadas ondas teóricas de más alto grado de aproximación. De cualquier forma, ya que el oleaje es, de hecho, la superposición de ondas, y no una sola onda, la desviación standard no puede ser cero en ningún caso. En el Technical Report N°. 4 se indica que para aproximaciones de grado superior al tercero los resultados, valor medio y desviación standard de  $C_D$ , coinciden con los de éste.

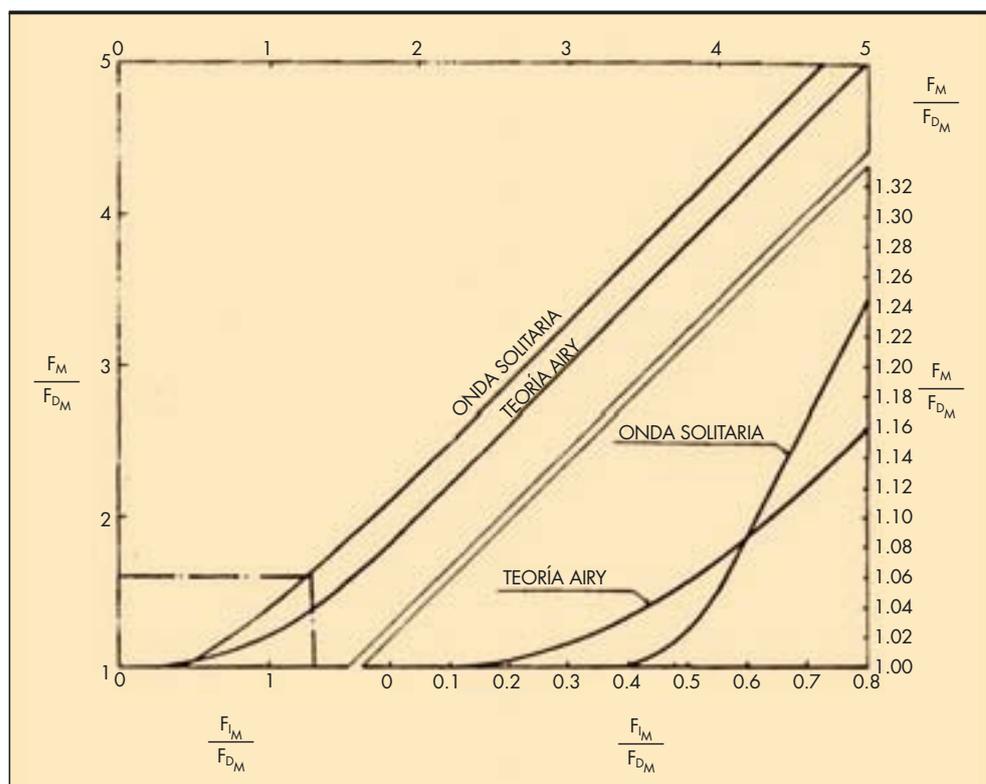


FIGURA 3. Tomada del Technical Report N°. 4.

	Experiencia	
	(1)	(2)
Diámetro de la pila, D (pies)	1,06	2,0
Profundidad media, h (pies)	47,6	47,0
Nivel del punto de ensayo (pies)	42,5	43
Intervalo de alturas de ola considerado (pies)	10 a 20,5	10 a 12,5
Intervalo de periodos considerado (segundos)	13,5 a 15,9	9,1 a 15,4.
<b>Resultados de las observaciones:</b>		
Modelo lineal, Onda de Airy		
(60) Valor medio de $C_D$	0,859	0,681
(61) Desviación standard de $C_D$	0,364	0,311
Onda de Stokes en segundo grado de aproximación		
(62) Valor medio de $C_D$	0,475	0,429
(63) Desviación standard de $C_D$	0,200	0,212
Onda de Stokes en tercer grado de aproximación		
(64) Valor medio de $C_D$	0,352	0,353
(65) Desviación standard de $C_D$	0,171	0,189

TABLA 1. Comparación de resultados para dos experiencias realizadas en la naturaleza - Technical Report N°. 4.

Autoridad (fecha)	(1)	Diámetro (pulgad. )	$C_D$	$C_m$	(2)
Crooke (1955)	Lab.	2 1 0,5	1,60	2,30	Osc.
Keulegan y Carpenter (1956)	Lab.	3 2,5 2	1,34	1,46	Osc.
	Lab.	1,5 1,25	1,52	1,51	Osc.
Keim (1956)	Lab.	1 0,5	1,00	0,93	Ace.
Dean (1956)	Lab.	3	1,10	1,46	Ace.
Wiegel y otros (1956)	Nat.	24	1,00	0,95	Olas
Reid (1956)	Nat.	8,75	0,53	1,47	Olas
Bretschneider (1957)	Nat.	16	0,40	1,10	Olas
Wilson (1957)	Nat.	30	1,00	1,45	Olas

**TABLA 2.** Valores experimentales de los coeficientes de arrastre y de inercia para cilindros circulares.  
(1) Lugar de realización de la experiencia, Laboratorio o naturaleza.  
(2) Modalidad de movimiento, Oscilatorio, Acelerado no oscilatorio, Oleaje.

### 2.3. INFLUENCIA DE LAS DIMENSIONES DEL DIÁMETRO DE LAS PILAS

Los resultados de los apartados anteriores están basados en la hipótesis de que el diámetro de la pila es pequeño comparado con las dimensiones del cuadrilátero de avance. En este caso las condiciones cinemáticas no cambian apreciablemente sobre una distancia igual al diámetro de la pila.

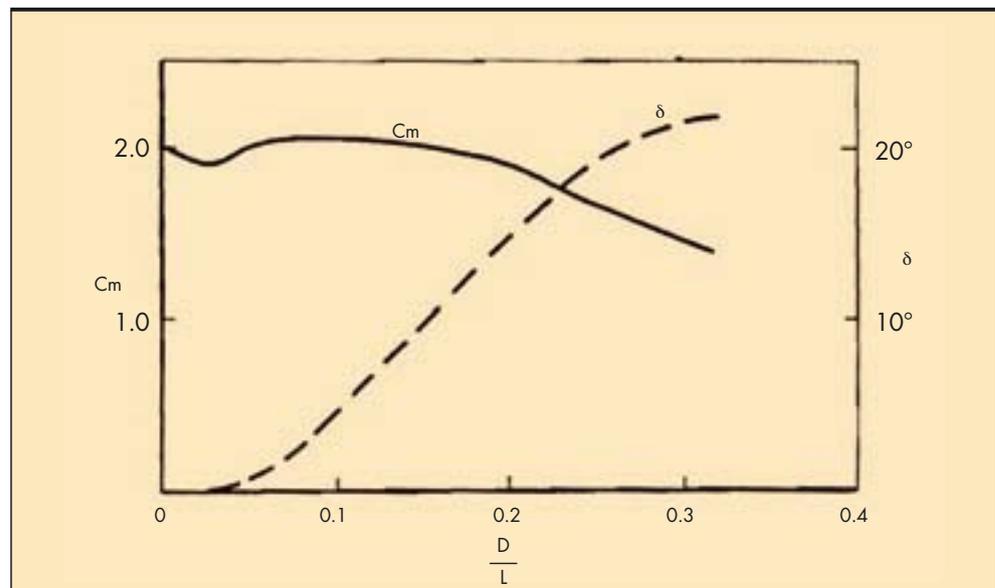
MacCamy y Fuchs (1954) han estudiado la interacción entre una pila y una onda monocromática aplicando la teoría de la difracción, teoría que puede ser extendida al caso en que  $D/L$  no sea mucho menor que uno.

Dos importantes resultados se deducen de esta investigación:

- El coeficiente de masa,  $C_m$ , es función de  $D/L$ .
- La fuerza se defasa con respecto a la aceleración un ángulo  $\delta$ , que depende de  $D/L$ .

Las cantidades  $C_m (D/L)$  y  $\delta (D/L)$  aparecen en la Figura 4. Obsérvese que para  $D/L < 0,1$ , lo que generalmente es el caso,  $\delta < 5^\circ$  y  $C_m = 2$ .

Aunque la teoría de la difracción no incluye efectos de rozamiento superficial y de forma, lo que supone  $C_D = 0$ , puede servir como índice para estimar los valores de  $C_m$  y de  $\delta$ , y sobre todo para determinar el campo de validez de la hipótesis  $D/L \ll 1$ .



**FIGURA 4.** Tomada de Dean y Harleman (1966).

### 3. DESCRIPCIÓN DE LAS FUERZAS PRODUCIDAS POR EL OLEAJE SOBRE UN CILINDRO VERTICAL

Según ya indicábamos, las estructuras exteriores pueden considerarse en la mayor parte de los casos como “obras rígidas”, salvo que el periodo del oleaje coincida con el de la estructura, y como consecuencia su colapso será producido por la fuerza resultante máxima ocurrente durante el temporal de cálculo. Por tal motivo centraremos nuestro interés en la “descripción de las fuerzas resultantes máximas”, haciendo recurso de los métodos de la geometría estadística.

#### 3.1. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LAS FUERZAS DE INERCIA Y DE ARRASTRE

Considerando constantes  $C_m$ ,  $C_D$  y  $D$  y  $T$ , la distribución de probabilidad de  $f_D$  y  $f_I$  vendrán dadas por, Bretschneider (1967),

$$p(f_D) df_D = p(H) dH \quad (66)$$

$$p(f_I) df_I = p(H) dH \quad (67)$$

La hipótesis de que  $T$  es constante involucra que no existe correlación entre  $H$  y  $T$ . Esta hipótesis es aceptable siempre que la anchura del espectro del oleaje sea muy pequeña, teóricamente cero.

Longuet-Higgins (1952) ha demostrado que cuando el espectro del oleaje es de banda de periodos de anchura cero,  $\epsilon = 0$ , Cartwright y Longuet-Higgins (1956), la distribución de probabilidad de alturas de ola sigue la distribución de Rayleigh,

$$p(H) = \frac{2H}{H_m^2} e^{-\left(\frac{H}{H_m}\right)^2} \quad (68)$$

en donde  $H_m$  es la altura de ola media cuadrática, Bores (1967).

De las ecuaciones (48) y (49) se deduce,

$$df_D = 2 K_1 H dH \quad (69)$$

$$df_I = K_2 dH \quad (70)$$

y como consecuencia, de ((48), (66), (68) y (69)) y ((49), (67), (68) y (70)) resulta,

$$p(f_D) df_D = \frac{1}{K_1 H_m^2} e^{-\left(\frac{f_D}{K_1 H_m}\right)^2} df_D \quad (71)$$

$$p(f_I) df_I = \frac{2f_I}{K_2^2 H_m^2} e^{-\left(\frac{f_I}{K_2 H_m}\right)^2} df_I \quad (72)$$

Denominando,

$$f_{Da} = \bar{f}_D = K_1 \bar{H}^2 = K_1 H_m^2 \quad (73)$$

$$f_{Im}^2 = \bar{f}_I^2 = K_2^2 \bar{H}^2 = K_2^2 H_m^2 \quad (74)$$

las distribuciones de probabilidad de las fuerzas de inercia y de arrastre (71) y (72) pueden escribirse en la forma,

$$p(f_D) df_D = \frac{1}{f_{Da}} e^{-\frac{f_D}{f_{Da}}} df_D \quad (75)$$

$$p(f_I) df_I = \frac{2f_I}{f_{Im}^2} e^{-\left(\frac{f_I}{f_{Im}}\right)^2} df_I \quad (76)$$

La probabilidad de que la fuerza  $f_D$  ( $f_I$ ) exceda un cierto valor  $f_D$  ( $f_I$ ) vendrá entonces dada por, Bores (1967),

$$q(f_D) = \int_{f_D}^{\infty} p(f_D) df_D = \int_{f_D}^{\infty} \frac{1}{f_{Da}} e^{-\frac{f_D}{f_{Da}}} df_D = e^{-\frac{f_D}{f_{Da}}} \quad (77)$$

$$q(f_I) = \int_{f_I}^{\infty} p(f_I) df_I = \int_{f_I}^{\infty} \frac{2f_I}{f_{Im}^2} e^{-\left(\frac{f_I}{f_{Im}}\right)^2} df_I = e^{-\left(\frac{f_I}{f_{Im}}\right)^2} \quad (78)$$

Ya que de acuerdo con la teoría lineal  $f_D$  es proporcional a  $H^2$  –expresión (48)– y  $f_I$  es proporcional a  $H$  –expresión (49)–, las distribuciones de  $(f_D/f_{Da})^{1/2}$  de  $(f_I/f_{Im})$  y de  $(H/H_m)$  serán análogas, es decir, las tres seguirán la distribución de Rayleigh. Como consecuencia todos los resultados obtenidos en la “Estructura del Oleaje” son aplicables al caso de las fuerzas  $f_D$  y  $f_I$ .

De las distribuciones de probabilidad (75) y (76) se obtiene entonces,

$$f_{D, \max, N} = f_{Da} \ln N \quad (79)$$

$$f_{I, \max, N} = f_{Im} \sqrt{\ln N} \quad (80)$$

Una vez que  $f_D$  y  $f_I$  han sido determinadas para un cierto nivel de probabilidad puede ser calculada la fuerza resultante  $f_m$  con el auxilio de las expresiones (58<sub>a,b</sub>).

Por ejemplo, la fuerza resultante media cuadrática  $f_{m,a}$  será,

$$f_{m,a} = f_{Da} \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{f_{Im}}{f_{Da}} \right)^2 \right] \quad (0 \leq f_{Im} / f_{Da} \leq 2) \quad (81a)$$

$$f_{m,a} = f_{Im} \quad (f_{Im} / f_{Da} \leq 2) \quad (81b)$$

y la fuerza resultante máxima probable, para un cierto valor de  $N$ ,

$$f_{m, \max, N} = f_{D, \max, N} \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{f_{I, \max, N}}{f_{D, \max, N}} \right)^2 \right] \text{ para } (0 \leq f_{I, \max, N} / f_{D, \max, N} \leq 2) \quad (82a)$$

$$f_{m, \max, N} = f_{I, \max, N} \quad (f_{I, \max, N} / f_{D, \max, N} \leq 2) \quad (82b)$$

#### 3.2. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE LA FUERZA RESULTANTE, $f_m$

La distribución de probabilidad de la fuerza resultante  $f_m$  puede ser obtenida en forma análoga a la correspondiente a las fuerzas de arrastre y de inercia. Por lo tanto,

$$p(f_m) df_m = p(H) dH \quad (83)$$

Recordando entonces que,

$$f_m = K_1 H^2 + \frac{1}{4} \frac{K_2^2}{K_1} \quad (0 \leq \beta \leq \pi/2) \quad (57)$$

resulta inmediatamente,

$$df_m = 2K_1 H dH \quad (84)$$

y como consecuencia

$$q(f_m) = 1 - e^{-\left[ \frac{f_m}{f_{Da}} - \frac{1}{4} \left( \frac{f_{Im}}{f_{Da}} \right)^2 \right]} \quad \left( 0 \leq \frac{f_{Im}}{f_{Da}} \leq 2 \right) \quad (85a)$$

$$q(f_m) = 1 - e^{-\left(\frac{f_m}{f_{Im}}\right)^2} \quad \left( \frac{f_m}{f_{Da}} \geq 2 \right) \quad (85b)$$

en donde  $f_{m,m}$  es la media cuadrática de las  $f_m = f_{Im}$ .

Las ecuaciones (85)<sub>a,b</sub> obtenidas coinciden con las deducidas por Borgman en forma algo diferente.

Recordamos que el valor máximo probable de la fuerza resultante puede ser deducido de la ecuación (82)<sub>a,b</sub>.

**4. PREVISIÓN ESPECTRAL DE LAS FUERZAS PRODUCIDAS POR EL OLAJE SOBRE UN CILINDRO VERTICAL**

Según vimos en el apartado 1, la expresión general de las fuerzas producidas por una onda monocromática sobre una pila cilíndrica vertical viene dada por,

$$f(t) = c |u(t)| u(t) + k \dot{u}(t) \quad (23)$$

En la hipótesis de que la velocidad  $u(t)$  y la aceleración  $\dot{u}(t) = a(t)$  constituyen un proceso estacionario gaussiano bivariable, lo que es perfectamente válido para el oleaje, la función covariancia de  $f$ ,  $H_f(\tau)$ , viene dada por, Borgman (1965),

$$H_f(\tau) = c^2 E_u^2 G\left(\frac{H_u(\tau)}{E_u}\right) + k^2 H_a(\tau) \quad (86)$$

siendo  $H_u(\tau)$  y  $H_a(\tau)$  las funciones covariancia de la velocidad y la aceleración respectivamente y en donde,

$$E_u = \int_0^\infty 2 S_u(\omega) d\omega \quad (87)$$

$$G(r) = \frac{(2 + 4r^2) \arcsen r + 6r \sqrt{1 - r^2}}{\pi} \quad (88)$$

Desarrollando en serie la función  $G(r)$  se obtiene, Borgman (1965),

$$G(r) = \frac{1}{\pi} \left[ 8r + \frac{4r^3}{8} + \frac{r^6}{15} + \dots \right] \quad (89)$$

que converge rápidamente para  $(0 \leq r \leq 1)$ .

La aproximación lineal,

$$g_1(r) = \frac{8r}{\pi} \quad (90)$$

diffiere de  $G(r)$ , para  $r = 1$ , solamente en un 15,5%, mientras que la aproximación cúbica,

$$g_3(r) = \frac{1}{\pi} \left[ 8r + \frac{4r^3}{8} \right] \quad (91)$$

únicamente en el 1,1%.

Eliminando entonces  $G(r)$  entre (86) y (90) resulta la forma lineal aproximada de la función covariancia,

$$H_f(\tau) = \frac{8c^2 E_u}{\pi} H_u(\tau) + k^2 H_a(\tau) \quad (92)$$

cuya transformada es,

$$S_f(\omega) = \frac{8c^2 E_u}{\pi} S_u(\omega) + k^2 S_a(\omega) \quad (93)$$

en donde,

$$S_u(\omega) = \frac{\omega^2 \text{ch}^2 \kappa(h+z)}{\text{sh}^2 \kappa h} S_\eta(\omega) = Y_{u\eta} S_\eta(\omega) \quad (94)$$

$$S_a(\omega) = \frac{\omega^4 \text{ch}^2 \kappa(h+z)}{\text{sh}^2 \kappa h} S_\eta(\omega) = Y_{a\eta} S_\eta(\omega) \quad (95)$$

son los espectros de la velocidad y de la aceleración respectivamente, véase “Estructura del Oleaje”-publicación 4-B-, ligados al espectro del oleaje  $S_\zeta(\omega)$  por las funciones de transferencia espectral,

$$Y_{u\zeta} = \frac{\omega^2 \text{ch}^2 \kappa(h+z)}{\text{sh}^2 \kappa h} \quad (96)$$

$$Y_{a\zeta} = \frac{\omega^4 \text{ch}^2 \kappa(h+z)}{\text{sh}^2 \kappa h} \quad (97)$$

Las Figuras 5 y 6 muestran los resultados obtenidos para el registro n°. 10 de Davenport, Wiegel, Beebe, Moon y James (1957).

**5. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LAS ESTRUCTURAS EXTERIORES**

Con el fin de evitar que entren en resonancia con el oleaje, las estructuras exteriores en claraboya son proyectadas generalmente de forma que su periodo propio sea del orden de un segundo o menos, ya que el espectro del oleaje posee normalmente una energía despreciable para esa gama de periodos.

En estas condiciones las estructuras exteriores se calculan desde un punto de vista “estático”, considerando como “fuerza de cálculo” la máxima probable del temporal de cálculo.

A pesar de haberse tomado estas precauciones en el proyecto, la Texas Tower N°. 4 entró en resonancia produciéndose como consecuencia el colapso de la estructura. Ello fue debido a que por deterioración de la unión entre la plataforma y los elementos de sustentación su periodo propio aumentó hasta un valor comprendido dentro del intervalo de periodos característicos del oleaje reinante. Otro ejemplo de colapso es el

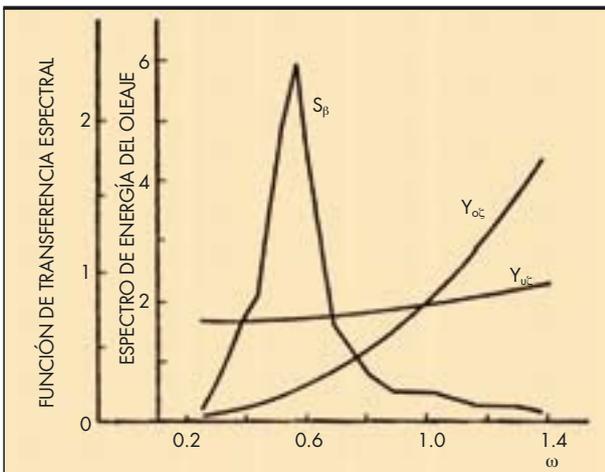


FIGURA 5. Espectro de energía del oleaje y función de transferencia espectral para el registro n°. 10 de Davenport. Borgman (1965).

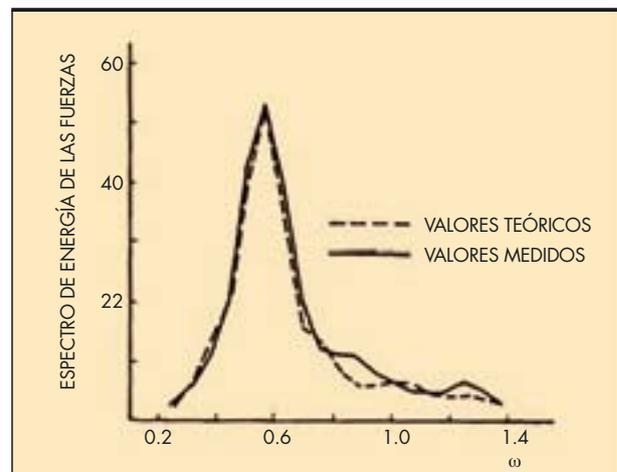


FIGURA 6. Comparación entre los valores teóricos –aproximación lineal– y experimentales para el registro n°.10 de Davenport. Borgman (1965).

ocurrido en 1961 con la United Senate. Esta plataforma, situada en la costa Este de los Estados Unidos falló por resonancia, al tener un periodo propio comprendido dentro del intervalo característico de periodos del oleaje.

Para profundidades iguales o superiores a 60 m. no se puede, sin embargo, evitar que las estructuras exteriores tengan un periodo propio comprendido entre 4 y 8 segundos. En este caso es claro que será imprescindible considerar el comportamiento dinámico de la estructura como base para el proyecto.

**5.1. ANÁLISIS DINÁMICO**

La respuesta de una estructura sometida a la acción de una onda monocromática ha sido considerada por diversos investigadores: Laird (1962), Michalos (1962), Nolan y Honsinger (1962), Gaither y Billington (1964), etc.

Harleman, Nolan y Honsinger (1963) admiten que tanto la estructura como las fuerzas debidas a la onda pueden ser sustituidas respectivamente por:

- Una estructura dinámicamente equivalente, constituida por una plataforma rígida en donde se concentra toda la masa de la estructura, soportada por elementos flexibles y sin peso.
- Un sistema de fuerzas equivalente,  $P(\tau)$ , actuando horizontalmente sobre el centro de gravedad de la plataforma.

La fuerza real producida por el oleaje sobre el prototipo, según hemos visto en el apartado 1, actúa sobre los elementos de sustentación según una resultante cuyo punto de aplicación se encuentra a una altura (S) sobre el fondo.

Para que este modelo físico matemático sea "equivalente" al prototipo han de cumplirse las siguientes condiciones:

- I. Las frecuencias naturales de ambas estructuras, modelo y prototipo, han de ser equivalentes.
- II. El desplazamiento horizontal del modelo por la acción del sistema de fuerzas  $P(\tau)$  ha de ser igual al del prototipo por la acción de la onda.

**5.1.1. Ecuaciones del movimiento**

Admitiendo que el modelo posee un solo grado de libertad, que las fuerzas de amortiguamiento y de restauración son lineales y que la excitación es senoidal, la ecuación del movimiento será, evidentemente,

$$m \ddot{x} + C \dot{x} + k x = p(\tau) = P_m \text{sen} \omega \tau \tag{98}$$

en donde:

- m es la masa total de la estructura.
- C el coeficiente de amortiguamiento.

k el coeficiente de restitución, constante elástica de la estructura.

$P_m$  la amplitud de la fuerza de excitación.

$\omega$  la frecuencia de la excitación ( $= 2\pi/T$ ).

$\tau$  el tiempo en el modelo.

La solución de esta ecuación es:

$$x(\tau) = \frac{P_m/K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2 \frac{C\omega}{C_c\omega_n}\right]^2}} \text{sen}(\omega\tau - \varepsilon) \tag{99}$$

con;

$x(\tau)$  desplazamiento del centro de gravedad de la plataforma sobre su posición de equilibrio.

$$\omega_n = \sqrt{K/m}, \text{ la frecuencia natural del modelo.} \tag{100}$$

$$C_c = 2K\eta, \text{ el coeficiente crítico de amortiguamiento.} \tag{101}$$

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left[ 2 \frac{C\omega}{C_c\omega_n} / 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \right], \text{ la fase.} \tag{102}$$

Admitiendo que la excitación viene dada por una onda de Stokes en tercer grado de aproximación, Harleman, Nolan y Honsinger (1963), la fuerza es no lineal, pero puede ser linealizada mediante un desarrollo de Fourier. Cada término de  $F(t)$  puede entonces ser relacionado con el correspondiente de  $P(\tau)$  introduciendo una función de influencia.

Admitiendo entonces el principio de superposición lineal los desplazamientos debidos a los términos de la función de excitación pueden ser sumados, obteniéndose así el desplazamiento total de la estructura en función del tiempo,  $x_t(t)$ , es decir,

$$x_t(t) = \sum_0^n x_i(t) \tag{103}$$

**5.1.2. Determinación de las características de la estructura**

En el caso en que los elementos de sustentación tengan empotramiento completo en ambos extremos, suelo y plataforma, para una fuerza F aplicada a la altura S resulta un desplazamiento del prototipo,

$$x_P = \frac{FS^2}{NEI} \left( \frac{\ell}{4} - \frac{S}{6} \right) \tag{104}$$

en donde, véase Figura 7,

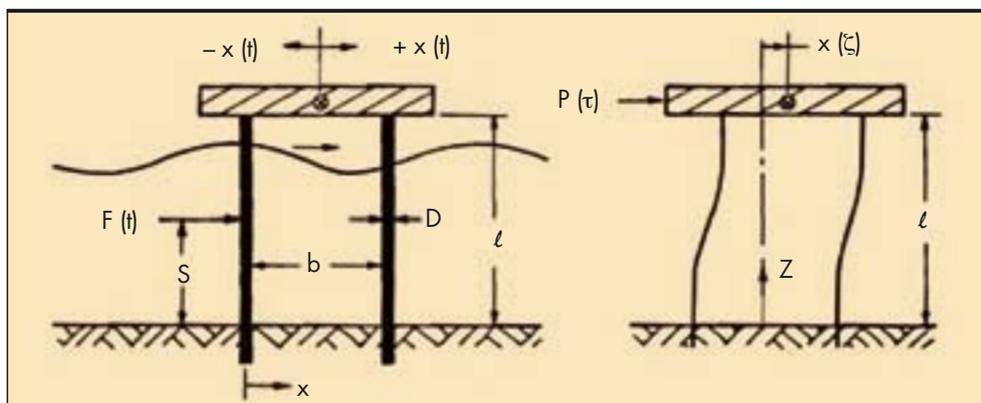


FIGURA 7. Disposición esquemática del prototipo y del modelo. Harleman, Nolan y Honsinger (1963).

E es el módulo elástico de los elementos de sustentación.  
 I su momento de inercia.  
 $\ell$  la altura del centro de gravedad de la plataforma.  
 N el número de elementos de sustentación.

En el modelo, la fuerza P está aplicada en el centro de gravedad de la plataforma, como consecuencia, haciendo  $(5 = \ell)$  en la expresión (104) se obtiene,

$$x_m = \frac{P\ell^2 \left( \frac{\ell}{4} - \frac{\ell}{6} \right)}{NEI} = \frac{P\ell^3}{12 NEI} \quad (105)$$

De la condición II - igualdad de desplazamientos del modelo y del prototipo,

$$X_m = X_p \quad (106)$$

se deduce la "función de influencia",

$$\frac{P}{F} = \phi = 3 \left( \frac{S}{\ell} \right)^2 - 2 \left( \frac{S}{\ell} \right)^3 \quad (107)$$

De la función de influencia se deduce que el desplazamiento al nivel (z) es,

$$\frac{x(z)}{X} = 3 \left( \frac{z}{\ell} \right)^2 - 2 \left( \frac{z}{\ell} \right)^3 \quad (108)$$

Por definición, la constante elástica del modelo es,

$$K = \frac{P}{X_m} = \frac{12 NEI}{\ell^3} \quad (109)$$

como consecuencia, aplicando el principio de Rayleigh se puede determinar la frecuencia natural.

En efecto, para un desplazamiento máximo X la energía potencial  $E_p$  es, evidentemente,

$$E_p = \frac{K X^2}{2} \quad (110)$$

La energía cinética máxima  $E_C$  del prototipo vendrá dada por, Harleman, Nolan y Honsinger (1963),

$$E_C = \frac{Q \omega_n^2 X^2}{g} + N \int_0^{\ell} \frac{q \omega_n^2 x(z)}{2} dz \quad (111)$$

en donde Q es el peso de la plataforma y q el peso por unidad de longitud de los elementos de sustentación.

Eliminando entonces  $x(z)$  entre las expresiones (108) y (111) e integrando resulta,

$$E_C = \frac{\omega_n^2 X^2}{2g} \left( Q + \frac{13}{35} Nq\ell \right) \quad (112)$$

Igualando las expresiones (110) y (112) se obtiene finalmente,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g K}{Q + \frac{13}{35} Nq\ell}} \quad (113)$$

Por la condición I -frecuencia natural del modelo igual a la del prototipo- eliminando  $\omega_n$  entre las expresiones (100) y (113) se obtiene la "masa efectiva" del modelo,

$$m_m = \frac{1}{g} \left( Q + \frac{13}{35} Nq\ell \right) \quad (114)$$

El coeficiente (13/35) corresponde al empotramiento rígido de los elementos de sustentación en ambos extremos. Si la unión de estos con la plataforma fuese articulada tendríamos (33/140). En cualquier caso este coeficiente depende del grado de empotramiento.

Considerando únicamente el amortiguamiento debido a la propia estructura, ya que el rozamiento con el fluido es despreciable en este caso, Harleman, Nolan y Honsinger (1963),

$$\frac{C}{C_C} = \frac{1}{2\pi} \ln(x_1/x_2) \quad (115)$$

en donde  $x_1$  y  $x_2$  son las amplitudes sucesivas de desplazamiento de la estructura.

### 5.2. FUERZA DE EXCITACIÓN

De acuerdo con Harleman y Shapiro (1955), la fuerza resultante total que actúa sobre un cilindro circular vertical, véase apartado 2, puede expresarse en la forma,

$$F = F_{Dc} \sin^2\theta + F_I \cos\theta \quad (0 < \theta < 180^\circ) \quad (116a)$$

$$F = F_{Ds} \sin^2\theta + F_I \cos\theta \quad (180 < \theta < 360^\circ) \quad (116b)$$

en donde  $F_{Dc}$  es la fuerza de arrastre total correspondiente al paso de la cresta y  $F_{Ds}$  a la del seno.

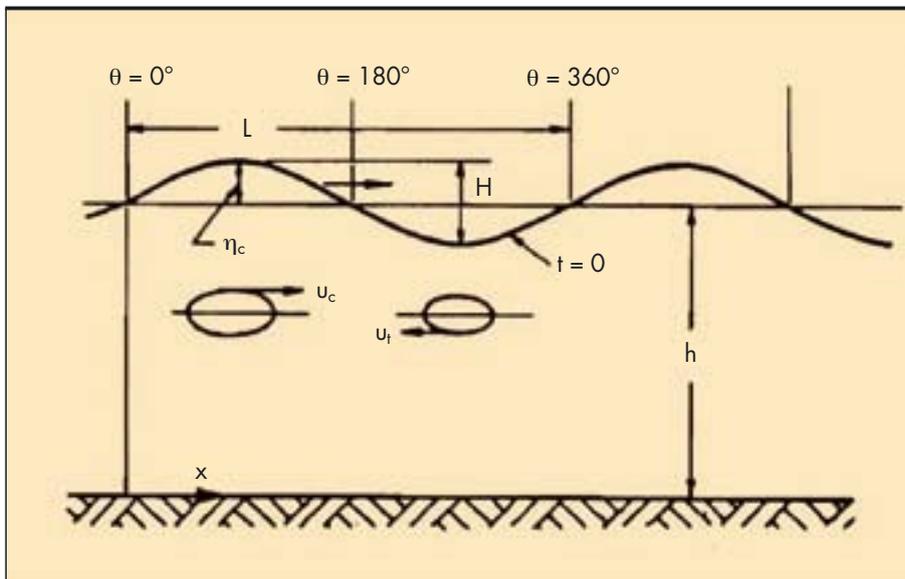


FIGURA 8. Harleman, Nolan y Honsinger (1963).

Las expresiones (116<sub>a,b</sub>) pueden ser aproximadas por un desarrollo en serie de Fourier de la forma,

$$F = a_0 + \sum_1^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad (117)$$

en donde

$$a_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F \cos n\theta \, d\theta$$

$$b_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F \sin n\theta \, d\theta \quad (118)$$

La aproximación obtenida con los tres términos principales del desarrollo,

$$F = \frac{F_{Dc} - F_{Ds}}{4} + \frac{4}{3\pi} (F_{Dc} + F_{Ds}) \sin\theta + F_I \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (119)$$

válida para el campo ( $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ), es suficiente para las aplicaciones prácticas. Véase Figura 8.

### 5.3. DESPLAZAMIENTO TOTAL DE LA ESTRUCTURA

De la expresión (107) de la función de influencia se deduce,

$$\phi_c = \frac{P_c}{F_{Dc}} = 3 \left( \frac{S_c}{\ell} \right)^2 - 2 \left( \frac{S_c}{\ell} \right)^3 \quad (120)$$

$$\phi_s = \frac{P_s}{F_{Ds}} = 3 \left( \frac{S_s}{\ell} \right)^2 - 2 \left( \frac{S_s}{\ell} \right)^3 \quad (121)$$

$$\phi_I = \frac{P_I}{F_I} = 3 \left( \frac{S_I}{\ell} \right)^2 - 2 \left( \frac{S_I}{\ell} \right)^3 \quad (122)$$

Como consecuencia la fuerza de excitación al nivel del centro de gravedad de la plataforma, sobre el modelo, P, vendrá dada por, véase expresión (119),

$$P = \frac{F_{Dc} \phi_c - F_{Ds} \phi_s}{4} + \frac{4}{3\pi} (F_{Dc} \phi_c + F_{Ds} \phi_s) \sin\theta + F_I \phi_c \sin(\theta + 90^\circ) \quad (123)$$

Introduciendo entonces la fuerza de excitación P, (123), en la ecuación diferencial (98) y recordando (103) se obtiene finalmente,

$$x_t = x_1 + x_2 + x_3 \quad (124)$$

en donde,

$$x_1 = \frac{4 P_1}{K} \quad (125)$$

$$x_2 = \frac{2 P_2}{K\sqrt{v}} \left\{ \sin(\omega t - \varepsilon) + \sin\left(\omega t - 2\pi \frac{b}{L} - \varepsilon\right) \right\} \quad (126)$$

$$x_3 = \frac{2 P_3}{K\sqrt{v}} \left\{ \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varepsilon\right) + \sin\left(\omega t - 2\pi \frac{b}{L} + \frac{\pi}{2} - \varepsilon\right) \right\} \quad (127)$$

siendo b la distancia entre los elementos de sustentación, L la longitud de onda,

$$v = \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2 \frac{C\omega}{C_c \omega_n} \right]^2 \quad (128)$$

véase expresión (99), y,

$$P_1 = \frac{P_{Dc} \phi_c - P_{Ds} \phi_s}{4} \quad (129)$$

$$P_2 = \frac{4}{3\pi} (F_{Dc} \phi_c - F_{Ds} \phi_s) \quad (130)$$

$$P_3 = F_I \phi_I \quad (131)$$

### 6. INTERACCIÓN ENTRE CILINDROS CERCANOS

La proximidad de los elementos de sustentación de las estructuras exteriores es un factor que puede modificar los resultados que se deducen de los apartados anteriores.

Borgman (1965), (1967) desde un punto de vista teórico y Biermann y Herrstein (1933), Laird, Johnson y Walker (1960)

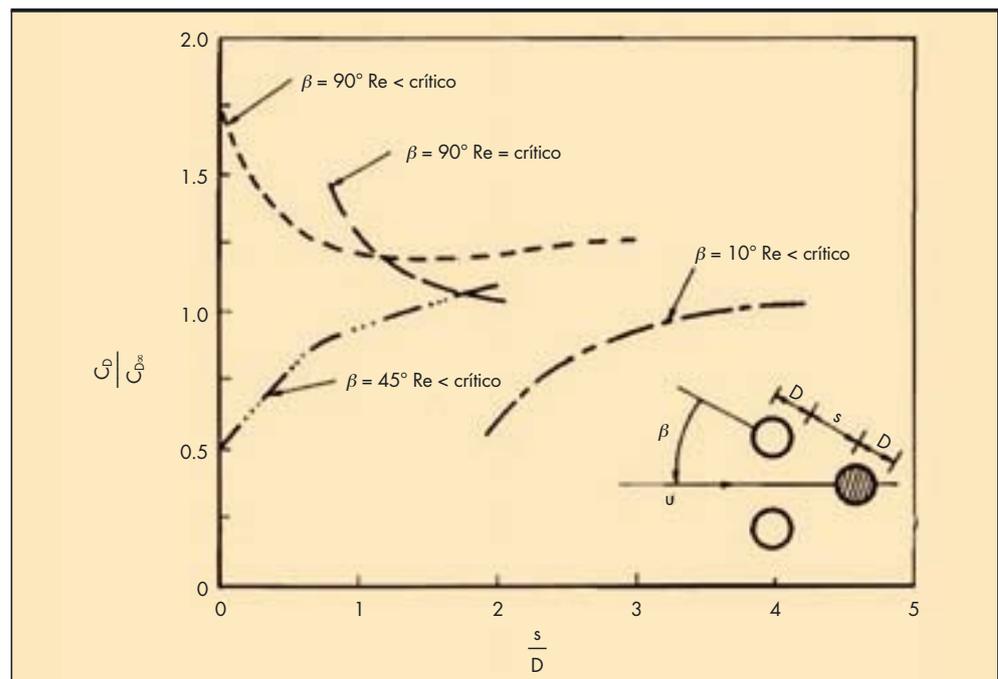


FIGURA 9. Interacción de cilindros a tresbolillo. Observaciones de Biermann y Herstein (1933), Laird, Johnson y Walker (1960).

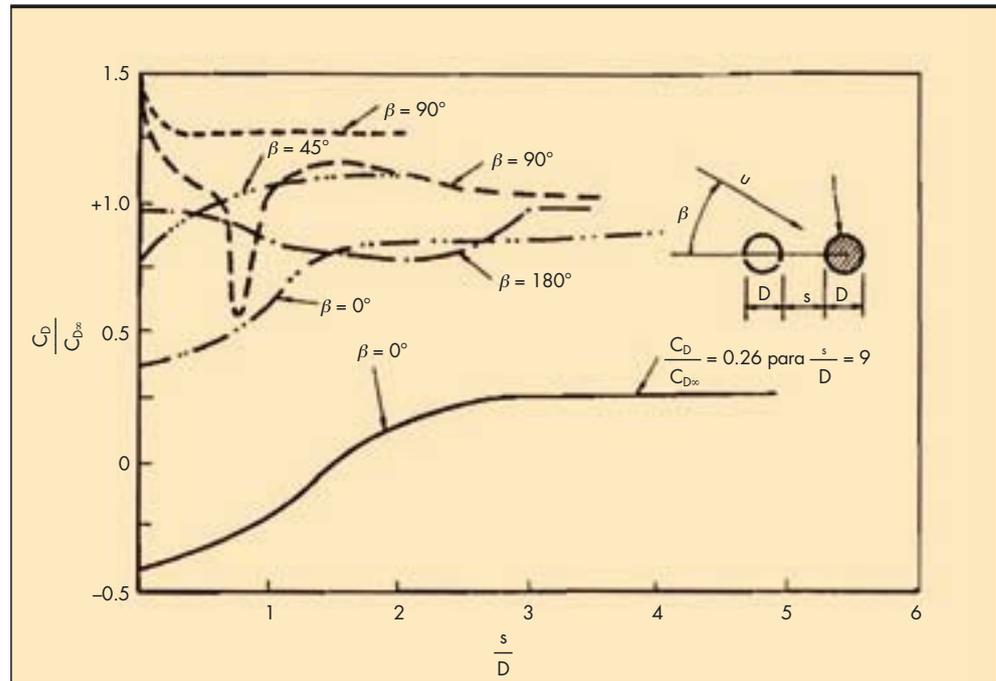


FIGURA 10. Interferencia de cilindros. Ross (1959, Laird, Johnson y Walker (1960).

y Ross (1959) experimentalmente han considerado este problema. Los resultados experimentales aparecen en las Figuras 9 y 10.

Nótese que con cualquier disposición de los cilindros, para  $s/D > 3$ , que es la situación más frecuente, los efectos de interacción son despreciables, comportándose los cilindros como elementos aislados.

No debe olvidarse en el proyecto que por ser el oleaje un movimiento ondulatorio la posición relativa de los cilindros se invierte en cada semiperiodo.

El número de Reynolds “efectivo” empleado en estos gráficos –Figuras 9 y 10–, viene dado por la expresión,

$$(Re)_e = \frac{u_m D}{\nu} \quad (132)$$

### 7. INFLUENCIA DE OTROS FACTORES

Aunque no muy frecuentemente, se emplean a veces, particularmente en el caso de estructuras provisionales elementos de sustentación de sección no circular.

Morison, Johnson y O’Brien (1954) han considerado este problema. Los resultados de su experimentación son los mostrados en la Tabla 3 y en la Figura 11.

En adición a los elementos de sustentación verticales, las estructuras exteriores suelen poseer otros elementos dispuestos horizontalmente o inclinados, también sometidos a la acción del oleaje.

La experimentación realizada por Bursnall y Loftin (1951) parece indicar que para números de Reynolds superiores al crítico debería ser usada la velocidad resultante,

Orientación y forma de la pila. (Tamaño)	Momento		
	Relación = $\frac{\text{Momento}}{\text{Momento para una sección circular}}$		
→ O	1,00 ( $\beta = 5^\circ$ )	1,00 ( $\beta = 20^\circ$ )	1,00 ( $\beta = 26^\circ$ )
→ H	1,52 ( $\beta = 14^\circ$ )	2,46 ( $\beta = 35^\circ$ )	2,19 ( $\beta = 16^\circ$ )
→ H $\alpha = 90^\circ$	1,42 ( $\beta = 10^\circ$ )	2,08 ( $\beta = 43^\circ$ )	2,58 ( $\beta = 41^\circ$ )
→ H $\alpha = 90^\circ$	2,44 ( $\beta = 5^\circ$ )	3,50 ( $\beta = 55^\circ$ )	2,22 ( $\beta = 15^\circ$ )
→ I	1,28 ( $\beta = 4^\circ$ )	1,17 ( $\beta = 37^\circ$ )	1,37 ( $\beta = 9^\circ$ )

TABLA 3. Efecto de la forma de la sección transversal de la pila sobre el momento máximo.  $\beta$ , es el ángulo de fase, véase apartado 2.

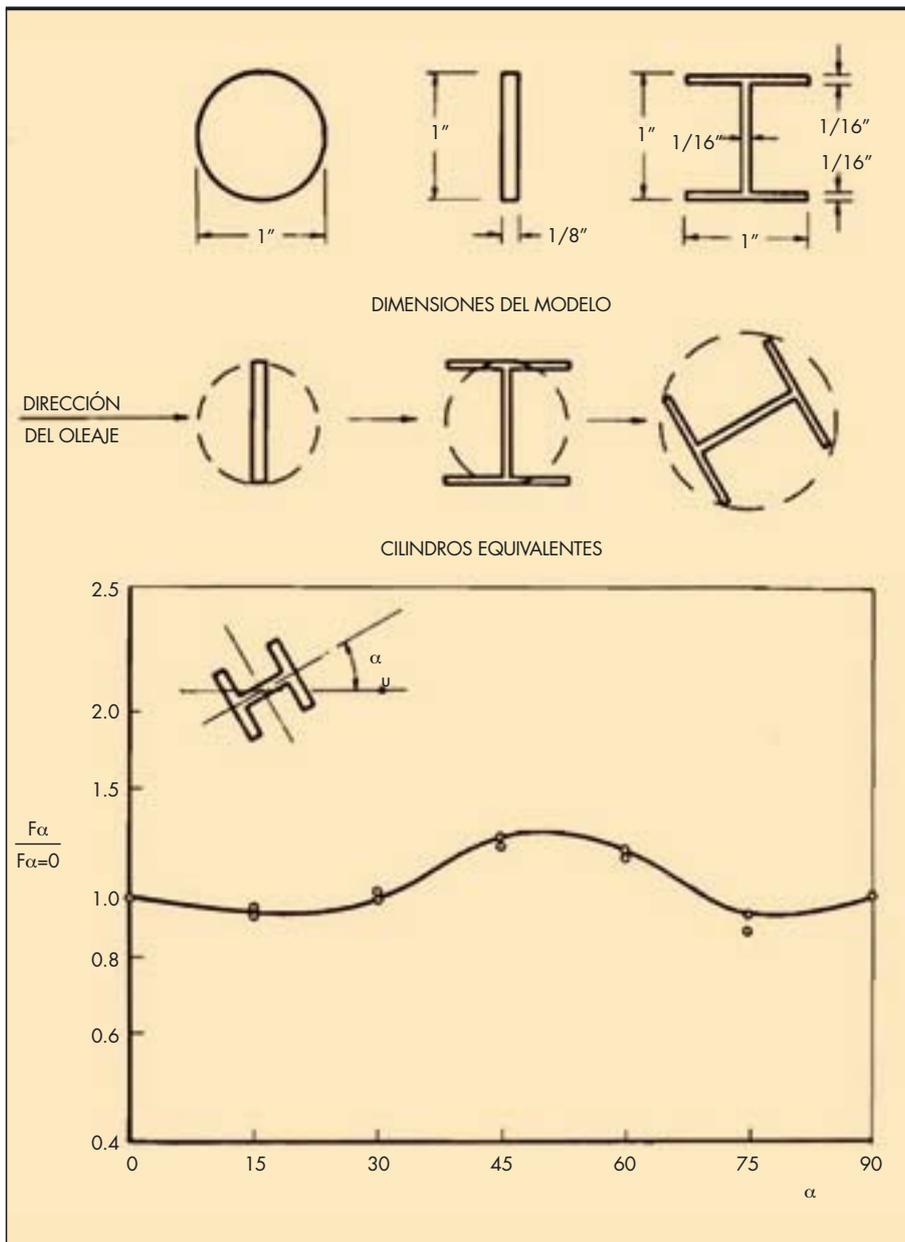


FIGURA 11. Morison y otros (1954).

$$V_r = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (133)$$

para calcular las fuerzas normales sobre cilindros inclinados.

En profundidades reducidas la velocidad resultante es superior a la componente normal al eje del cilindro. Por tal razón, Dean y Harleman (1966) recomiendan las siguientes ecuaciones:

$$f_D = \frac{1}{2} \rho C_D D V_r \frac{V_n}{|V_n|} \quad (134)$$

$$f_I = \frac{\pi}{4} \rho C_m D^2 \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \frac{\dot{V}_n}{|\dot{V}_n|} \quad (135)$$

en donde  $V_n$  y  $\dot{V}_n$  son las componentes normales al eje del cilindro, de la velocidad y aceleración respectivamente. Como consecuencia  $V_n / |V_n|$  y  $\dot{V}_n / |\dot{V}_n|$  definen el sentido de la fuerza.

Las expresiones (134) y (135) son aplicables siempre que el ángulo de ataque sea inferior a  $60^\circ$ , quedando definido el ángulo de ataque por la normal al eje del cilindro y la dirección de la velocidad resultante.

## 8. FUERZAS PRODUCIDAS POR UNA ONDA DE ROTURA

Hall (1958) ha realizado ensayos sobre el comportamiento de pilas en varias posiciones situadas sobre una playa con pendiente del 10 por 100.

Como resultado de los ensayos, Hall (1958), propone para las fuerzas totales la siguiente expresión,

$$F = g C_b \rho D H_B^2 \quad (136)$$

en donde  $H_B$  es la altura de la onda en rotura y  $C_B$  un coeficiente cuyo valor medio es del orden de 1,5, con un valor máximo cercano a 3,0. Figura12.

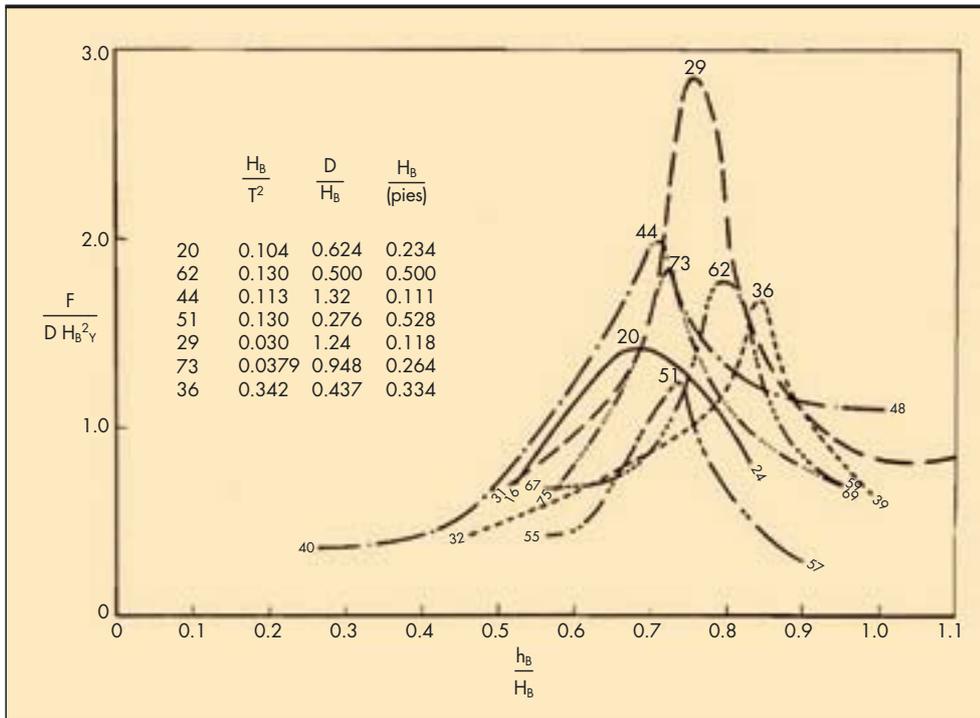


FIGURA 12. Coeficiente  $C_B$ . Observaciones de Hall (1958).

**9. FUERZAS PRODUCIDAS POR UNA ONDA SOBRE TUBERÍAS SUBMARINAS**

Con el fin de evitar la acción del oleaje y de las corrientes, generalmente, cuando el fondo es de arena, las tuberías submarinas se entierran una cierta profundidad, superior a las variaciones estacionales y accidentales de los fondos. Tal protección, sin embargo, no es posible cuando los fondos son rocosos. En este caso la acción del oleaje y de las corrientes habrá de ser soportada por el rozamiento con el fondo o por la resistencia mecánica de la conducción, si se disponen apoyos para salvar las irregularidades del fondo.

Suponiendo un apoyo continuo y uniforme sobre el fondo, las fuerzas de rozamiento, de Coulomb, pueden expresarse en la forma,

$$F_r = \mu (P - \gamma_t \nabla) \tag{137}$$

o bien, Beckmann y Thibodeaux (1962),

$$F_r = \mu K D^2 \gamma_a (d - 1) \tag{138}$$

en donde:

- $\mu$  es el coeficiente de rozamiento con el fondo.
- $P$  el peso de la tubería en el estado de carga más desfavorable.
- $\gamma_a$  el peso específico del agua.
- $\gamma_t$  el peso específico total, aparente, de la tubería.
- $d$  su densidad relativa, con respecto al agua  $\gamma_t / \gamma_a$ .
- $\nabla$  el volumen desplazado por unidad de longitud de la tubería.
- $D$  su diámetro o altura, en el caso en que no sea circular.
- $k$  un factor de forma, igual a  $(\pi/4)$  cuando la tubería es circular.

En cualquier caso  $k D^2 = \text{área de la sección.}$

A las fuerzas de arrastre y de inercia totales  $F_D$  y  $F_I$  consideradas en los apartados anteriores se suma ahora la

“fuerza de sustentación”  $F_L$ , producida por la disimetría del flujo, originada por la cercanía de la tubería al contorno.

La fuerza de sustentación, por analogía con  $F_D$  y  $F_I$  puede ser escrita,

$$F_L = \frac{\rho}{2} C_L D u^2 \tag{139}$$

en donde  $C_L$  es el coeficiente de sustentación.

La ecuación de equilibrio en el caso de tubería simplemente apoyada sobre el fondo, sin elementos especiales de apoyo, viene dada por:

$$\mu k D^2 \gamma_a (d - 1) - \mu F_L \geq F_D + F_I \tag{140}$$

Nótese que en este caso particular las fuerzas  $F_D$  y  $F_I$  no corresponden a las expresiones (26), (30) y (27), (31), ya que, en general, las tuberías no serán verticales, y como consecuencia el campo de velocidades y aceleraciones no es el correspondiente a cilindros verticales.

**9.1. FUERZAS SOBRE TUBERÍAS CIRCULARES**

La configuración de la estructura en estudio y del flujo en sus inmediaciones son mostrados en la Figura 13. En la región cercana al contacto de la tubería con el terreno existirá una zona de relativo reposo, en donde probablemente se acumulará la arena, modificándose con el tiempo el esquema hidrodinámico de la Figura 13.

**9.1.1. Coeficiente de sustentación,  $C_L$**

Beckmann y Thibodeaux (1962) han sugerido varios métodos para determinar el coeficiente de sustentación, proponiendo para el caso de tuberías circulares apoyadas en toda su longitud  $C_L$  0,5. En opinión de Wilson y Reid (1963) esta estima, sin embargo, parece ser demasiado baja.

De acuerdo con Wilson y Reid (1963) el coeficiente de sustentación en el caso de flujo potencial, producido por un movi-

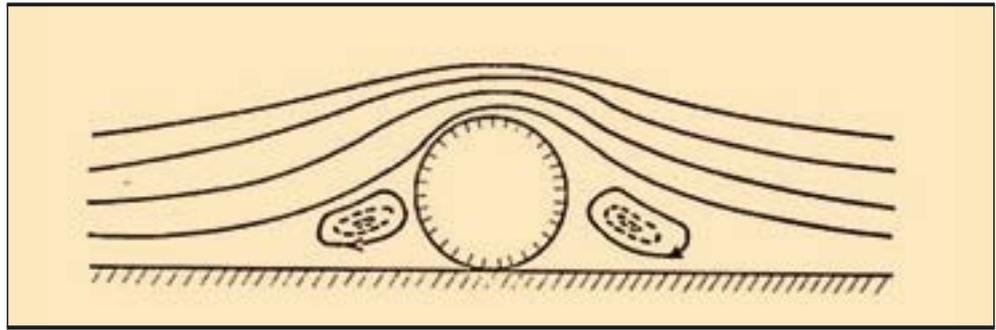


FIGURA 13. Beckmann y Thibodeaux (1962).

miento uniforme de velocidad constante  $U$ , sobre un cilindro circular apoyado sobre una superficie plana, viene dado por,

$$C_L = \left(\frac{\pi}{4}\right)^4 \int_0^\pi \frac{\cos \theta d\theta}{\left\{\cos \frac{\theta}{2} \operatorname{ch}\left(\frac{\pi}{2} \tan \frac{\theta}{2}\right)\right\}^4} \quad (141)$$

en donde  $\theta$  es el ángulo medido a partir del punto superior del cilindro.

La velocidad de flujo ( $V$ ) en un punto cualquiera ( $\theta$ ), sobre la superficie del cilindro es, entonces,

$$V = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{\left[\operatorname{sech}\left(\frac{\pi}{2} \tan \theta\right)\right]^2}{\cos \frac{\theta}{2}} U \quad (142)$$

de donde  $V_{\max} = 2,46 U$ , para la parte superior del cilindro.

Denominando ahora  $V_2$  y  $V_1$  a las velocidades de flujo de un fluido real en la parte superior e inferior del cilindro, en zonas no perturbadas por la capa límite, ya que  $C_L$  es una medida del contraste de velocidades sobre y bajo el cilindro, Wilson y Reid (1963) proponen la corrección,

$$C_L = (C_L)_{f.p.} \frac{U^2}{V_2^2 - V_1^2} \quad (143)$$

Según hemos visto, en el caso de flujo potencial, cuando la tubería se halla en contacto con el suelo,

$$\begin{aligned} V_2 &= 2,46 U \\ V_1 &= 0 \\ (C_L)_{f.p.} &= 4,48 \end{aligned}$$

como consecuencia,

$$C_L = 4,48 U^2 / (2,46 U)^2 = 0,74 \quad (144)$$

En el caso de fluido real es lógico que  $U < v < V_2$ , como consecuencia  $C_L$  debería ser superior a 0,74. De la experimentación realizada por Dementev (1934) se deduce que  $C_L = 0,78$ .

Wilson y Reid (1963) proponen entonces para el proyecto  $C_L \geq 1$ .

Un método para evitar que las fuerzas de sustentación sean excesivas, consiste en separar la tubería del terreno, apoyándola a alguna distancia del fondo sobre soportes preparados al efecto. Los resultados de la experimentación realizada por Knoblock y Troller son mostrados en la Figura 14.

Nótese que en el campo crítico, para valores de  $s/D > 0,30$  el coeficiente de sustentación es negativo, es decir, la fuerza de sustentación se halla dirigida hacia el suelo.

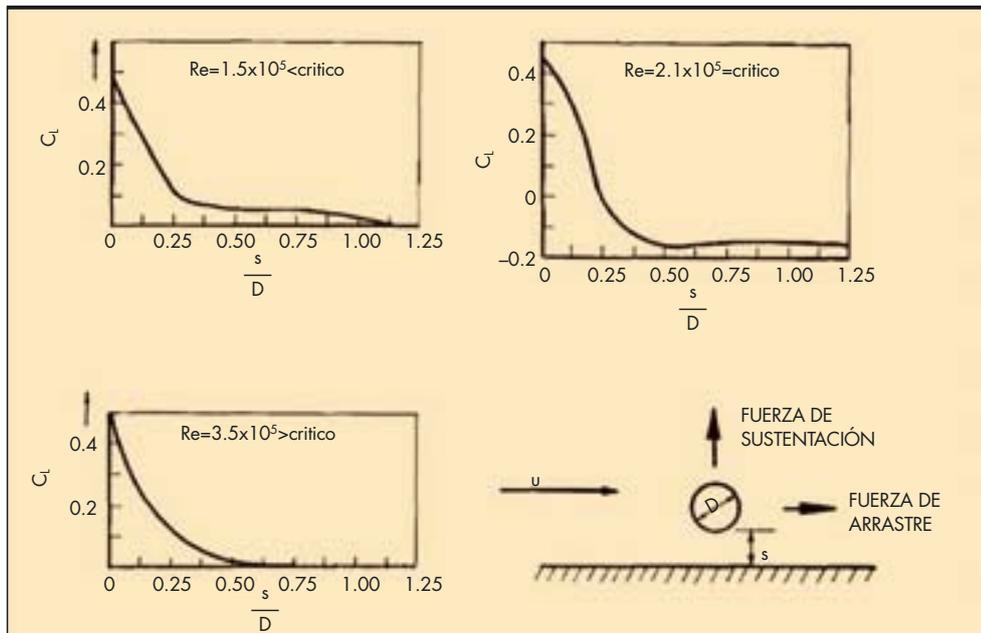


FIGURA 14. Coeficiente de sustentación. Influencia del contorno. Observaciones de Knoblock y Troller, en Dean y Harleman (1966).

**9.1.2. Coeficiente de inercia,  $C_m$**

De acuerdo con Wilson y Reid (1963) –Milne-Thompson (1951)– el coeficiente de inercia  $C_m$  en el caso de flujo potencial, producido por un movimiento uniforme de velocidad  $U$ , sobre un cilindro circular apoyado sobre una placa plana, viene dado por,

$$C_m = 2 \int_0^\pi \text{sen } \theta \text{ th} \left( \frac{\pi}{2} \tan \frac{\theta}{2} \right) d\theta = 3,3 \quad (145)$$

en lugar de  $C_m = 2$  según fué deducido en el apartado 1 para el caso de cilindro circular no afectado por el contorno.

Ya que el valor medio de los valores observados de  $C_m$  es del orden de 1,5 en lugar de 2, como resultaría del flujo potencial, Wilson y Reid (1963) recomiendan disminuir proporcionalmente el coeficiente de inercia para cilindros apoyados en el suelo, proponiendo  $C_m = 2,5$ .

**9.1.3. Coeficiente de arrastre,  $C_D$**

En la Tabla 2, correspondiente a los valores observados por diversos investigadores, puede apreciarse que para cilindros circulares libres, no afectados por el contorno, el coeficiente de arrastre para números de Reynolds inferiores crítico es del orden de  $C_D = 1,5$ , mientras que para números de Reynolds superiores al crítico  $C_D$  es del orden de 0,40.

La rugosidad de la superficie de las tuberías tiende a rebajar el número de Reynolds crítico, pero según han observado Blumberg y Rigg (1961)  $C_D$  es función de la rugosidad para el campo supercrítico, aumentando con ésta.

Ya que todas las estructuras marinas tienden a adquirir una cubierta de fauna o flora, antes o después la tubería perderá su lisura inicial, aumentando gradualmente su rugosidad. Parece entonces aconsejable adoptar valores de  $C_D \geq 1$  para tuberías en contacto con el fondo.

**9.2. FUERZAS SOBRE CONDUCCIONES SUBMARINAS TRAPECIALES**

En el caso de conducciones submarinas trapeziales, de acuerdo con Beckmann y Thibodeaux (1962) puede admitirse  $C_D = 0,7$  y  $C_L = 0$ .

Estos coeficientes son independientes del número de Reynolds y aplicables tanto a movimientos permanentes como oscilantes.

**10. BIBLIOGRAFÍA**

BECKMANN, H. and THIBODEAUX, M.H. (1962) –“Wave force coefficients for offshore pipelines”– Proc. ASCE, WW2, pag. 3141.

BIERMANN, D. and HERRSTEIN, W.H. (1933)– “The interference between struts in various combinations”– NACA Report n°. 468.

BISHOP, R.E.D. and HASSAN, A.Y. (1964) –“The lift and drag forces on a circular cylinder in a flowing fluid”– Proc. Roy. Soc. of London Ser. A, vol. 277.

(1964) –“The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid”– Proc. Roy. Soc. of London, Ser. A, vol. 277.

BLUMBERG, R. and RIGG, A.M. (1961) –“Hydrodynamic drag at supercritical Reynolds numbers”– Paper presented at Petroleum Session. ASME meeting, Los Angeles, Calif.

BONNEFILLE, R. (1963) –“Action de la houle sur les ouvrages cylindriques isolés de grande dimension”– Bull. Cent. de Recherches et d’Essais de Chatou, 3.

BORES, P.S. (1967) –“Estructura del oleaje”– Lab. de Puertos C.E.E.O.P. Publ. N°. 4-B.

BORGMAN, L.E. (1958) –“Computation of the ocean wave forces on inclined cylinders”– Trans. AGU, vol. 39, n°. 5.

(1964) –“The statistical distribution of ocean waves on vertical piling”– Instit. of Eng. Res., HEL 9-3, Univ. of Calif. - CERC Techn. Mem. n°. 13.

BORGMAN, L.E. (1965) –“Wave forces on piling for narrow-band spectra”– Proc. ASCE, Journ. WW3, pag. 4443.

(1965) –“A statistical theory for hydrodynamic forces on objects”– Wave Res. Rep. HEL 9-6, Hydr. Eng. Lab., Univ. of Calif., Berkeley - Annals of Mathematical Statistics. (Feb. 1967).

(1965) –“The spectral density for ocean wave forces”– Proc. 10th Conference on Coastal Eng. - Proc. ASCE, WW2, pag. 5247 (1967).

BRATER, E.F., McNOWN, J.S. and STAIR, L.D. (1958) –“Wave forces on submerged structures”– Proc. ASCE Journ. HY, pag. 1833.

BRETSCHNEIDER, Ch. (1957) –“Evaluation of drag and inertial coefficients for maximum range of total wave force”– Texas A&M., Res. Found., Techn. Rep. N°. 55 - 5 .

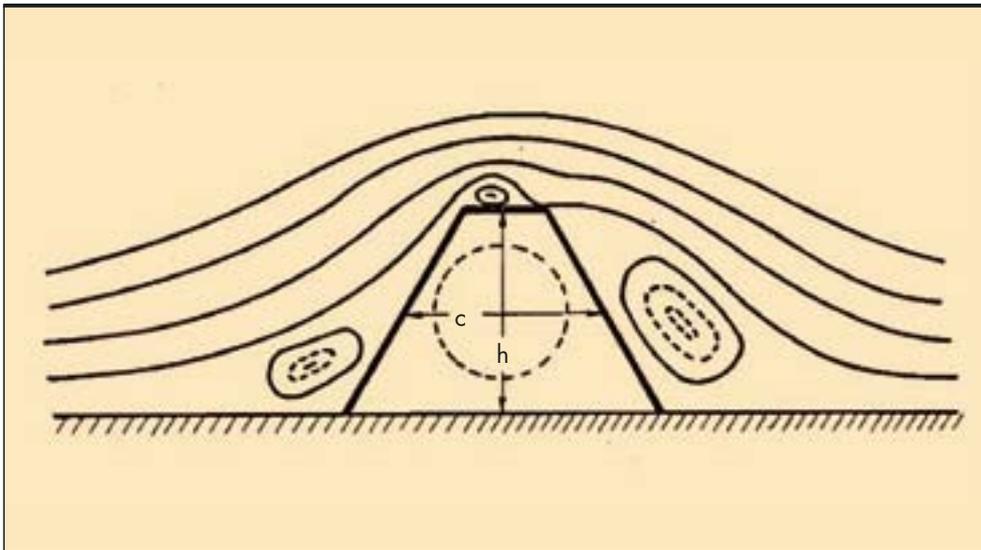


FIGURA 15. Esquema del flujo alrededor de una conducción trapezoidal. Beckmann y Thibodeaux (1962).

- (1965) –“On the probability distribution of wave force and on introduction to the correlation inertial coefficient”– Proc. 10th Conferencé on Coastal Eng. - Proc. ASCE, WW2, pag. 5217 (1967).
- BRETSCHNEIDER, Ch., COLLINS, J.I. and PICK, G.S. (1965) –“Gravity wave and wave force theory, measurements and date analysis: State of the Art”– NERCO, Techn. Rep. 98, vol. 1.
- BURNSNALL, W. J. and LOFTIN, L. K. (1951) –“Experimental in vestigation of the pressure distribution about a yawed cylinder in the critical Reynolds number range”– NACA, Techn. Note 2463.
- CARTWRIGHT, D.E. and LONGUET-HIGGINS, M.S. (1956) –“The statistical distribution of rmaxima of a random function”– Proc. Roy. Soco of London, Ser. A, vol. 237.
- COURANT & HILBERT (1962) –“Methods of Mathematical Physics”– Interscience Publ., New York.
- CROOKE, R.C. (1965) –“Re-analysis of existing force data on model piles”– BEB, Techn. Mem. n°. 71.
- DEAN, R.G. (1956) –“Fluid forces on circular cylinders”– thesis Texas A&M., College Statidn, Texas.
- DEAN, R.G. and HARLEMAN, D.R.F. (1966) –“Interaction of structures and waves”– en Estuary and coastline hydrodynamics, IPPEN ed. - McGraw Hill Book Comp.
- DEMENTEV (1934) –Trans. Sc. Res. Inst. of Hydrotechn. Leningrad, vol. 12.
- GAITHER, W.S. and BILLINGTON, D.P. (1964) –“The dynamic response of offshore structures to timedependent forces”– Proc. 9th Conference on Coastal Eng.
- HALL, M.A. (1958) –“Laboratory study of breaking wave for ces on piles”– BEB Techn. Mem. n°. 106.
- HARLEMAN, D.R.F. and SHAPIRO, W.C. (1955) –“Experimental and analytical studies of wave force s on offshore structures, Part I”– MIT Hydrody. Lab. T.R. n°. 19.
- HARLEMAN, D.R.F., SHAPIRO, W.C. and MARLOW, T.A. (1957) –“Experimental and analytical studies of wave forces on offshore drilling structures, Part II”– MIT Hydrod. Lab. T. R. n°. 24.
- HARLEMAN, D.R.F., NOLAN, W.C. and HONSINGER, V.C. (1963) –“Dynamic analysis of offshore estructures”– Proc. 8th Conference on Coastal Eng.
- IRIBARREN, R. Y NOGALES, C. (1954) –“Obras Marítimas: Oleaje y Diques”– Dossat, Madrid.
- KEIM, S.R. (1956) –“Fluid resistance to cylinders in aaccelerated motion”– Proc. ASCE, HY 6, pag. 1113.
- KEULEGAN, C.H. and CARPENTER, L.H. (1958) –“Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid”– NBS Rep. 4821, Nat. Bureau of Standards.
- KNOBLOCK and TROLLER –“Tests on the effect of sidewind on the ground handling of airships”– Report of. the tests conducted at the Guggenheim Airship Inst.
- LAIRO, A.O.K. (1961) –“Eddy forces on rigid cylinders”– Proc. ASCE, WW.
- (1962) –“Water force s on flexible oscillating cylinders”– Proc. ASCE, WW3, pag. 3234.
- LAIRD, A.D.K., JOHNSON, C.A. and WALKER, R.W. (1960) –“Water eddy forceson oscillating cylinders”– Proc. ASCE, HY9.
- LAMB, H. (1945) –“Hydrodynamics”– Dover Publ.
- LONGUET-HIGGINS, M.S. (1952) –“On statistical distribution of the heights of sea waves”– Journ. Mar. Res. vol. 11, n°. 3.
- LUNEAU, J. (1948) –“Sur l’effect d’inertie des sillages de corps se déplaçant dans un fluide d’un mou vement accéléré”– CR. Acad. des Sciences. Paris, 227, 17.
- MacCAMY, R.C. and FUCHS, R.A. (1954) –“Wave force s on piles: a diffraction theory”– BEB, Techn. Mem. n°. 69.
- MICHALOS, J. (1962) –“Dynamic response and stability of piers on piles”– Proc. ASCE, WW3, pag. 3221.
- MICHALOS, J. and BILLINGTON, D.P. (1961) –“Oesign and stability considerations for unique pier”– Proc. ASCE, WW2.
- MILNE-THOMPSON, M.L. (1951) –“Hidrodinámica teórica”– Aguilar - Madrid.
- MORISON, J.R. (1951) –“The design of piling”– Proc. First Conference on Coastal Eng.
- MORISON, J.R., O’BRIEN, M.P., JOHNSON, J.W. and SCHAAF, S. A. (1950) –“The force exerted by surface waves on piles”– Petroleum Trans. 189, TP. 2846.
- MORISON, J.R., JOHNSON, J.W. and O’BRIEN, M.P. (1954) –“Experimental studies of for.ces on piles”– Proc. 4th Conference on Coastal Eng.
- MURTHA, J.P. (1954) –“Virtual mass of partially submerged bodies”– Thesis Carnegie Inst. Tech. Dep. of Civil Eng.
- NOLAN, W.C. and HONSINGER, V.C. (1962) –“Wave induced vibrations in fixed offshore structures”– Naval Eng. Thesis MIT.
- PAAPE, A. and BREUSERS (1966) –“The influence of pile dimensions on forces exerted by waves”– Proc. 10th Conference on Coastal Eng.
- PIERSON, W.J. and HOLMES, P. (1965) –“Irregular wave forces on apile”– Proc. ASCE, WW4 - pag. 4528.
- REID, R.O. (1956) –“Correlation of water level variations with wave forces on a vertical pile for nonperiodiq waves”– Proc. 6th Conference on Coas tal Eng.
- REID, R.O. and BRETSCHNEIDER, Ch. (1953). –“Surface waves and offshore structures: The design wave in deep and shallow water”– Texas A & M.
- RIABOUCHINSKI, P. (1920) –“Sur la résistance des fluides”– Intern. Congr. Math. Strasbourg.
- ROSS, C.W. (1959) –“Large-scale teste of wave forces on piling”– BEB, Techn. Mem. n°. 111.
- SCHILLER, L. and LINKE, W.Z. (1935) - Z. Angew. Math. und Mech. 15,35.
- SCHLICHTING, H. (1955) –“Boundary layer theory”– MacGraw Hill Book Comp., New York.
- SKJELBREIA, L., HENDRICKSON, J.A., GRAGG, W. and WEBB, L. M. (1960) –“Loading on cylindrical piling due to action of ocean waves”– NESCO, Techn. Report, 4 vol.
- TASK COMMITTEE ON WIND FORCE (1961) –“Wind forces on structures”– Trans. ASCE, 126, Part II.
- TEXAS TOWER N°. 4 –“Platform motion study”– Brewer Eng. Laboratories Inc. Report 173 MarionMass. June 10, (1959).
- THOM, A. (1929) –A.R.C. Reports and Memoranda N°. 1194.
- UNITED STATES SENATE –“The collapse of Texas Tower N°. 4. Report by Preparedness Investigating Subcomroittee of the Cormmittee on Armed Services U. S. Senate. 87th Congress, 1st Session, Government Printing Office, Washington D.C. (1961).
- WIEGEL, R.L., BEEBE, K.E. and MOON, J. (1957) –“Ocean wave forces on circular cylindrical piles”– Proc. ASCE, HY2, pag. 1199.
- WILSON, B.W. (1957) –“Results of analysis of wave force data confused sea conditions around a 30-inch. diameter Testpile, Gulf of Mexico”– Texas A & M., Techn. Rep. N°. 55-7.
- WILSON, B.W. and REID, R.O. (1963) –“Discussion of Wave force coefficients for offshore pipelines”– Proc. ASeE, WW1, pág. 61-65.

# Semblanza de Pedro Suárez Bores

GALO F. DÍEZ RUBIO (\*)

Corre el año de 1988, y se está celebrando en Torremolinos (Málaga) el Congreso Internacional de Ingeniería de Costas. En el vestíbulo de entrada al Palacio de Congresos, entre los puestos expositores de distinto tipo, hay uno muy curioso que me llama la atención, en el que hay un hombre de mediana edad, junto a la que después me enteré era su mujer. Se muestran en el puesto una serie de maquetas en metacrilato, que representan diversos sistemas de protección de la costa, que al tiempo tienen como claro objetivo el uso y disfrute de la misma. Se trataba de Pedro Suárez Bores y de su mujer Zoe, los cuales explicaban con entusiasmo a quien tiene interés por ello, el denominado sistema ambiental de tratamiento costero. De esta forma por una curiosidad personal después ampliamente recompensada, conocí y más tarde inicié mi amistad con Pedro Suárez Bores.

Nace Pedro Suárez Bores en el año 1929 en Valladolid, durante la Dictadura de Primo de Rivera. Su padre, contratista de obras, recibe por aquel entonces diversos encargos relacionados con la construcción del embalse de Requejada en Cervera de Pisuerga, por lo que con muy temprana edad se trasladada la familia a esta localidad de la montaña palentina, de inviernos rigurosos y agradables aunque cortos veranos. Comienza así su relación temprana, y lógicamente en aquel momento no del todo consciente, con el mundo de la ingeniería civil. Allí vive varios años hasta que con su familia recalca en Ujo, (Asturias), donde él hunde de forma definitiva sus raíces, ya que siempre se reivindicó como asturiano.

En Ujo trabaja en diversas ocupaciones relacionadas con la minería, hasta a la edad de 17 años. Por esta época enfermó de fiebres tifoideas, dolencia muchas veces mortal en aquella época, lo que a decir de los suyos supuso para él una enorme transformación vital, que le hace, una vez superada la enfermedad, dirigir sus miras al estudio y al conocimiento. Este renacer le lleva a terminar en muy poco tiempo el bachillerato y poco tiempo después a culminar los estudios de Auxiliar (Perito) de Minas.

Llega con posterioridad Suárez Bores a Madrid, donde estudia la carrera de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos que termina con la promoción de 1959. Busca por aquel entonces la ayuda de Ramón Iribarren, a la sazón Catedrático de Puertos de la entonces Escuela Especial, para lograr un destino como funcionario que era del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos del Estado en el Puerto de Gijón. En aquella época, muy fecunda para Iribarren, estaba éste buscando un ayudante para el Laboratorio de Puertos del que también era Director. Al entablarse la relación entre ambos a cuenta del destino profesional de Pedro Suárez Bores, Iribarren le sondeó pidiéndole indicaciones sobre la bibliografía que manejaba en materia de puertos, quedando tan impresionado que le ofrece el puesto de ayudante, lo que es aceptado, seguramente con mucho gusto por Suárez Bores.

## INICIOS PROFESIONALES Y CÁTEDRA

Durante 10 años trabaja Suárez Bores con Ramón Iribarren en el Laboratorio de Puertos. Fruto de esta colaboración en la que también interviene Casto Nogales es entre otros trabajos el proyecto de la playa de Las Teresitas (1964) en Santa Cruz de Tenerife, primera playa artificial del mundo, donde al diseño de Iribarren que corresponde a la fórmula genérica  $G^{1,4}$ , G (apoyo lateral mediante espigones y escollera de cierre y apoyo de pie de playa de cota media de coronación) se añaden por primera vez en España, las aportaciones de Pedro en el cálculo del transporte sólido longitudinal por sobreelevación y por incidencia oblicua del oleaje, así como el análisis de los perfiles transversales de equilibrio. Para llevar a cabo la obra, aunque no menos conocido pero de gran trascendencia, es su cálculo para el dimensionado y adaptación de la toma de carga de la cinta transportadora de Fos Bucraa para la carga de la arena que procedente del Sahara se llevó a Santa Cruz de Tenerife.

Hay que decir, que la playa de Las Teresitas, no tuvo ninguna modificación hasta el año 1998, cuando con arena también procedente del Sáhara, se llevó a cabo una nueva recarga, pero manteniendo el esquema tipológico inicial de la misma (Figura 1).

A la muerte de Iribarren al que siempre se refirió Suárez Bores como Maestro, en 1967, comenzó para él una intensa actividad de investigación y consiguiendo publicación de sus avances y aportaciones en el cálculo y previsión del oleaje, introduciendo la variable estadística por primera vez. Daba de esta forma continuidad a la muy fecunda aportación española en esta materia, que desde 1933 con la fórmula del entonces Catedrático de Puertos de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Eduardo de Castro, para la determinación del peso de las escolleras del manto exterior de diques de abrigo, ha tenido su continuidad entre otros con Iribarren (1938 y 1965) y Losada-Giménez Curto (1979).

Fueron estos años 1967 a 1970, fecundos en trabajo y publicaciones, los que finalmente le llevaron a conseguir la Cátedra de Puertos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid en 1969, sucediendo en la misma a Ramón Iribarren, aunque no pudo completar su aspiración de dirigir el Laboratorio de Puertos en la misma línea que su Maestro, por el esquema de incompatibilidades que en aquella época fue imponiéndose, cosa de la que hay que decir, pues me lo manifestó en diversas ocasiones, que nunca entendió, y que probablemente, y esto es opinión del autor, impidió consolidar un trabajo ya encauzado.

Entre estas publicaciones, podemos citar:

- Métodos de previsión del oleaje.
- Propuestas de ordenación portuaria.
- Formas costeras.
- Obras Marítimas Exteriores – Análisis de fiabilidad de su diseño.
- Meteorología dinámica.
- Dinámica de atraque en los flotadores.
- Ordenación de vías navegables.

(\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.



FIGURA 1. Playa de las Teresitas, Tenerife.

## OLEAJE

Los métodos estadísticos aplicados al cálculo del oleaje en los que trabaja Suárez Bores, tienen un anclaje básico en las aportaciones e Longuet-Higgins con su Geometría Estadística (1952) y Pierson con su Análisis Espectral (1952) así como otros autores contemporáneos. Según descripción del propio Suárez Bores *“El oleaje debe ser tratado como una onda teórica para ser considerado como un proceso estocástico de dos componentes: uno de fluctuación, de corto periodo descrito por las distribuciones de las variables ( $H$ ,  $T$ ,  $\theta$ , etc.), para un estado de mar dado, y otro de largo periodo, descrito para las correspondientes distribuciones de sus variables características ( $H_{1/3}$ ,  $T_{opb}$ ,  $N$ , etc.) en el año medio.*

*Se plantea entonces el fundamental problema de la observación del oleaje en la costa, indispensable para la completa y precisa determinación de las distribuciones de las variables ( $H_{1/3}$ ,  $T_{opb}$ ,  $N$ , etc.), ya que modificado éste en su propagación por efecto de la refracción, difracción y configuración del fetch, sus características varían en cada punto de observación”.*

Los trabajos que desarrolló en esta materia, necesitaban ser por otra parte cotejados y dimensionados con datos de campo, surgiendo de ahí Bores (1967), con la colaboración de D. Luis Tejedor, la idea de la instalación de la Red Exterior Española de Registro de Oleaje (REMRO) que buscaba colocar, de acuerdo con las posibilidades de aquellos años, una serie de equipos fondeados a media profundidad en zonas de hasta 50 ms. de calado, para obtener de esta forma datos instantáneos del oleaje en superficie, para que mediante las ecuaciones de transferencia, se pudiesen determinar las características de ese mismo oleaje en aquellos puntos de la costa que fuesen necesarios para finalidades ingenieriles, o de estudio oceánico en general. Esta primera implantación se llevó a cabo por el Laboratorio de Puertos, hoy Centro de Estudios de Puertos y Costas Ramón Iribarren, integrado en el CEDEX. En la actualidad, aquellos primeros elementos de medida (sensores de media profundidad), han evolucionado, siendo ahora sobre todo boyas desde donde se registran los principales paráme-

tros del oleaje. Como sabemos, hoy día la REMRO, está subsumida en la REDCOS (boyas escalares a profundidades medias y algunas direccionales) ya instalada en toda la costa española, teniendo un apoyo complementario en la Red de Medidas en otros dos escalones, la red exterior REDEXT, en profundidades indefinidas y direccional y la oceanográfica HIPOCAST. Esta red, ha sido gestionada por el CEDEX hasta el año 2008 en que Puertos del Estado se hizo cargo de la misma.

Conviene señalar también, que gracias a los datos medidos con la red de boyas, se ha podido definir muchos de los parámetros de las recomendaciones para obras marítimas ROM, desarrollada por Puertos del Estado con la inestimable aportación del CEDEX, en particular la 0.0-01 (Condicionantes y Criterios Generales del Proyecto), 0.2-90 (Acciones y Bases de Cálculo), 0.3-91 (Atlas de Clima Marítimo) y 0.4-95 (Previsión de Oleaje).

## PUERTOS

En el otoño del año 1976, se produjo una importante avería en el dique de Punta Lucero, que protegía el Abra del Puerto de Bilbao. En este accidente hubo además de importantes daños materiales, pérdida de vidas humanas, no encontrándose una explicación de sus causas dados los medios de cálculo deterministas y las técnicas empleados en su construcción, encargándosele a Pedro Suárez Bores la búsqueda de una solución, origen del Método Sistemático Multivariado (MSM).

Indiquemos, que la práctica totalidad del dique se extiende en la batimétrica  $-30$ , profundidad para la que se comprobó, que los métodos de cálculo al uso introducían grandes incertidumbres de dimensionado. Ante este reto, según palabras del propio Suárez Bores *“nuestro planteamiento, fue absolutamente general, considerando todos los elementos del dique (espaldón, manto principal, suelo etc.) y sus posibles componentes de fallo, así como todas las variables de cada componente de fallo, es decir, considerando al dique como un sistema de estabilidad con su correspondiente fiabilidad, ya que muchas de las variables endógenas y exógenas del sistema, son aleatorias: altura de ola, periodo, persistencia o duración de los temporales, etc.”*

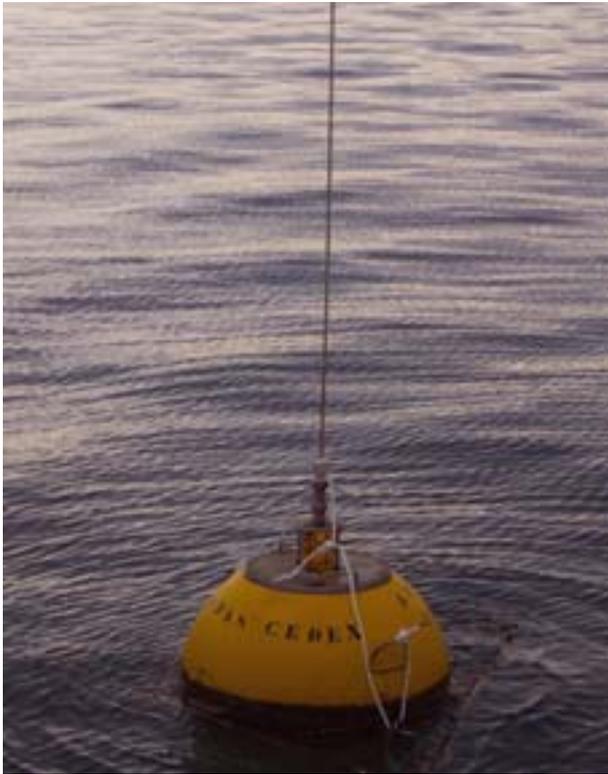


FIGURA 2. Boya instalada en Cartagena por el CEDEX en 2005.

Se puso en consecuencia a prueba para este caso, el MSM, que permite a partir de unas determinadas Especificaciones de Diseño, que incluyen el Rango del oleaje, el tipo de fallo de la estructura el nivel de avería y la vida prevista de la obra, obtener unos resultados de dimensionado que en el caso de Punta Lucero, llevaron para los bloques de hormigón del manto principal de 85 a 150 Tms. pasando el talud del dique (cotg  $\alpha$ ) de 1'5 a 2. La obra se termina en 1986 y se recibe en 1987, siendo quien suscribe este artículo, asistente del Interventor en la recepción de la obra, que sigue por supuesto en servicio y sin mayores incidencias desde hace casi veinticinco años.

El MSM, se viene aplicando, entre otros usos, a las obras marítimas exteriores, las más recientes en el nuevo dique vertical de Puerto de Las Palmas y en el dimensionado del dique de Langosteira, en el puerto exterior de La Coruña, donde precisamente los bloques del manto principal, en profundidades de 40 ms. son también de 150 Tms. como los de Punta Lucero.

## PUERTOS Y COSTAS

En materia de costas no podemos pasar por alto el logro que supuso por primera vez, el abordar de forma clara, elegante y matemática la clasificación de las formas costeras, llevada a cabo por Suárez Bores mediante su Clasificación y Formulación Morfo-Genética de Playas, que aporta una comprensión geomorfológico también extensible a las obras marítimas. En este campo, sistematizado totalmente en la actualidad, tenemos que mencionar como trabajo teórico póstumo, la realización del Mapa de Costas de Huelva que supone un perfeccionamiento en los criterios de clasificación costera, así como un repaso final de la investigación en esta materia.

Del anterior logro teórico, habría de derivar en un intento de superar el esquema tradicional de las obras de defensa de costas, su Sistema Ambiental, patentado (1994) en diversos países y cuyo esquema básico, podemos ver con mucha expresividad en la Figura 3 en su aplicación para la propuesta de ordenación del frente marítimo de Barcelona en la zona del Forum 2004.

En esencia, el Sistema Ambiental supone la construcción de dos obras de baja cota de coronación rebasables y que dejan en medio un canal a modo de cuenco de amortiguación, con aguas renovables y facilidades de uso para la práctica deportiva o de navegación durante la mayor parte de los días del año, gracias al evidente control que sobre el oleaje de corto periodo ejerce la primera línea de defensa. Otras ventajas como la disminución de los impactos visuales, al poderse mantener vista la línea de horizonte, o el menor volumen de materiales necesario para su dimensionado, hacen del Sistema algo evidentemente atractivo. En el caso del esquema de la Figura 3, el objetivo era el tratamiento de un frente urbano, en cuya línea de costa se pretendía construir en Barcelona además del Forum un zoológico marino.

En el plano práctico de ordenación integral, defensa y aprovechamiento de la costa, el primer diseño completo de Suárez Bores con la colaboración de D. Casto Nogales, es la playa de Puerto Rico, en la isla de Gran Canaria que podemos ver en la Figura 4 con la fórmula genética  $dG^2_{1,4}GD$  diseñada en 1968/69 obra en la que se compatibilizan las actividades portuarias, de uso de playa, ocio y oportunidades ligadas a la economía.

Posteriormente desarrolla Suárez Bores, el proyecto de la playa de Veneguera (Gran Canaria) en 1978, Figura 5.2 y el de la playa de Breña Baja (Los Cancajos, Isla de La Palma) en 1982, esta última con elementos de abrigo de gran interés Figura 5.1 ambas con defensas mediante diques columnares basálticos, que a modo de recreación de las coladas magmáticas enfriadas, suponen una reproducción de las formaciones como la de Los Gigantes de Tenerife. Desgraciadamente el proyecto de Veneguera, que suponía además un enorme reto paisajístico, no ha llegado a realizarse.



FIGURA 3. Vista panorámica (Izda.) y tratamiento de costa para el Forum 2004 de Barcelona (Dcha.)



FIGURA 4. Playa de Puerto Rico - Gran Canaria.

Respecto a la aplicación del Método Ambiental a las estructuras portuarias y costeras, podemos señalar como un primer intento por parte de Suárez Bores para lograr diques de baja cota de coronación, el de la toma de refrigeración de la central térmica de Cubelles en Barcelona (1974-75), con un elemento que integra la obra de defensa con sus elementos formales clásicos y la obra disipativa, lograda esta última a base de hiperboloides de revolución, situados a tresbolillo, con un muy eficaz resultado de control del oleaje (Ver Figura 6).

En un paso posterior, fue Suárez Bores perfeccionando el Sistema Ambiental de uso portuario y costero, mediante la separación en dos etapas de los elementos de control del oleaje, tal y como hemos descrito antes a través de la creación de un espacio de agua intermedio, con un diseño de los diques confinadores de baja cota de coronación. Esto, puede esquematizarse en el dibujo que vemos en la Figura 7, desarrollado a nivel constructivo como elemento de defensa, para el Forum

2004 de Barcelona, que ya hemos mencionado y visto en su desarrollo en planta (Figura 3).

Al sistema se le fueron aportando mejoras como el uso de celosías, inicialmente de acero (1980 – Puerto de Los Gigantes) y posteriormente de hormigón armado para mejorar las condiciones de disipación en espacios portuarios, logrando un adecuado filtrado del oleaje, y aminorando las reflexiones indeseables para el atraque y estancia en las dársenas.

Una plasmación del uso de celosías es el caso de Cala Ratjada (1994) en Mallorca, que podemos ver en la Figura 8.

En resumen, se puede decir del Sistema Ambiental en palabras del propio Suárez Bores, que *“constituye una importante innovación tecnológica que, requiriendo mucho menor volumen de obra, menor laboreo de canteras y menor transporte, en consecuencia, con mucho menor impacto ambiental, permite la circulación del aire en superficie y la conservación de las vistas del mar”*.



FIGURA 5.1. Playa de Los Cancajos.



FIGURA 5.2. Diseño de la playa de Veneguera.

### PLAYAS DE LEVANTE DE BARCELONA

Pero es la Ordenación de las Playas del sector costero comprendido entre el Puerto de Barcelona y la desembocadura del río Besos, lo que me atrevería a decir es el gran proyecto de Pedro Suárez Bores. Ya en el año de 1975, el Ayuntamiento de Barcelona, consciente del problema que supone el deplorable estado de su frente marítimo que conformaba un elemento marginal de la ciudad, y que constituía además, un grave problema para el saneamiento y la evacuación de las aguas pluviales, causa esto último de graves inundaciones, encarga a través de sus Servicios Técnicos, entonces dirigidos por el Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Albert Vilalta González a Suárez Bores el Estudio de las Playas de Levante de Barcelona cuyo estado de entonces podemos ver en la Figura 9.

Fruto del encargo es el Estudio de las Obras de Mejor, Estabilización y Ordenación de la Costa de Barcelona, aprobado

por la Dirección General de Puertos del Ministerio de Obras Públicas en 1976.

En la Memoria del Estudio, se puede leer: *“El ferrocarril, e industrias contaminantes primero y la polución litoral –industrial urbana– después, han separado a Barcelona de su secular amigo, el mar”*. El reto es por lo tanto volver a integrar el espacio marítimo con la ciudad, planteándose la reordenación de la totalidad de la fachada litoral, entre la desembocadura del Besós y el Puerto de Barcelona. En palabras de Suárez Bores *“Con esta mentalidad, la Figura 10 muestra una fotografía de la maqueta correspondiente al Estudio citado, mostrándose la sustitución del trazado del ferrocarril de Barcelona a Mataró por una autovía litoral, la ocupación de los terrenos adyacentes por un amplio espacio verde y la construcción de una serie de playas en doble concha, con sus diques de abrigo convencionales enlazados con los extremos de los emisarios de superficie con que se resolvió el desagüe de la ciudad en al mar”*.



FIGURA 6. Control de la agitación del mar por el dique de Cubelles (Barcelona) (Izda.) y detalle del dique (Dcha.).

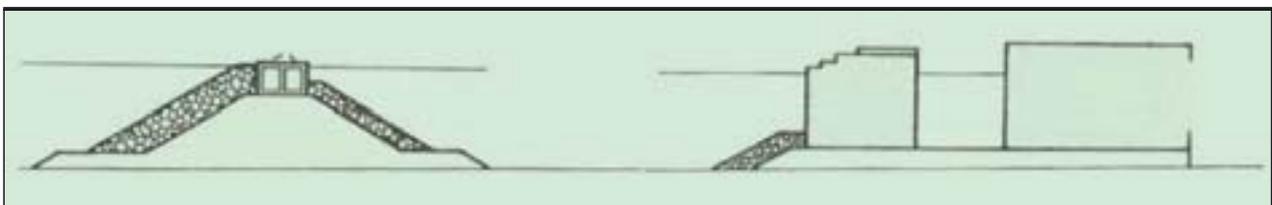
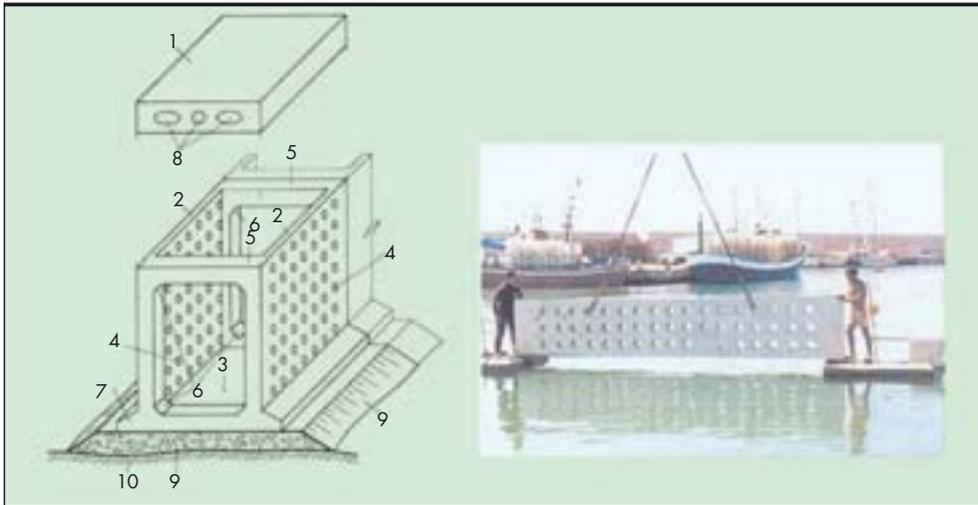


FIGURA 7. Esquema de aplicación del Sistema Ambiental para la defensa portuaria.



**FIGURA 8.** Pantalla de celosía doble E Instalación de línea de celosía en Cala Rajada.

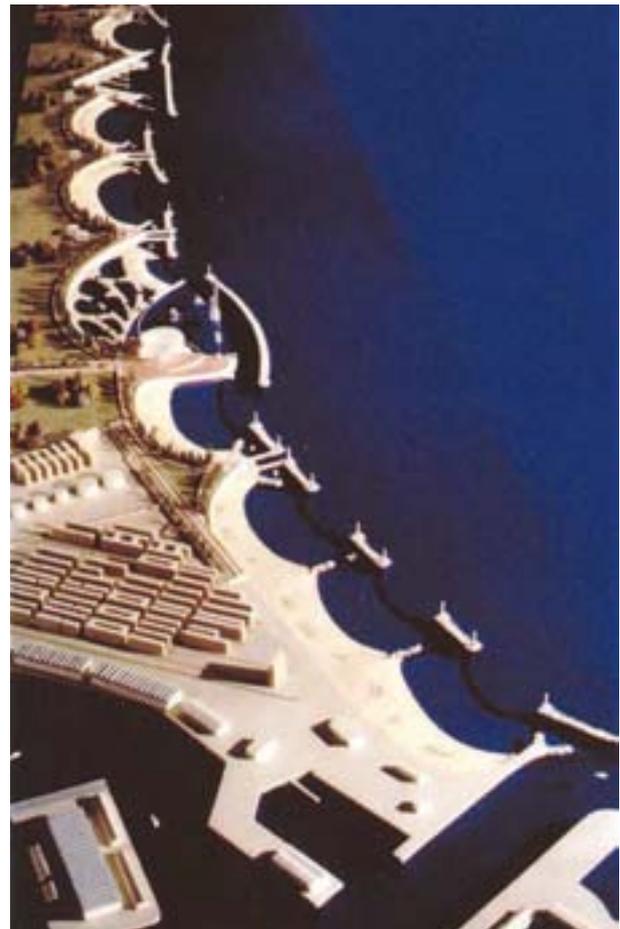
El proyecto que se redactó como consecuencia del Estudio, se presentó en febrero de 1983 a la Generalidad de Cataluña y al Ayuntamiento de Barcelona y preveía también la apertura de una nueva bocana para la entrada directa al Port Vell desde el mar, que podemos ver en el extremo inferior de la maqueta de la Figura 10.

Hoy día, tenemos que decir, que el frente marítimo de Levante del Puerto de Barcelona, responde al esquema de ordenación que proyectó en su día Pedro Suárez Bores y fue con seguridad su más querida creación. Una copia de la maqueta conformaba el panel que estaba detrás de él cuando recibió en Febrero de 2004, de manos del entonces Ministro de Fomento Francisco Álvarez Cascos el Premio Nacional de Ingeniería 2002. En su discurso de recepción del Premio dijo: "Agradezco al Excelentísimo Ayuntamiento de Barcelona y particular-

mente a nuestro compañero Albert Vilalta el encargo de las playas de Barcelona (1975), (1983), que nos permitió enfrentarnos a la restauración de uno de los entornos urbanos más degradados del mundo, expuesto a la acción directa de los fuertes y persistentes levantes. La respuesta a este reto, consistió en la ordenación del frente marítimo, desde el Besos al puerto, incluida la apertura del Port Vell al mar, tal como se



**FIGURA 9.** Costa de Levante de Barcelona 1975.



**FIGURA 10.** Maqueta del proyecto de ordenación de las playas de Barcelona.



**FIGURA 11.** Vista del frente olímpico desde el Besós en 2002.

aprecia en el panel. El frente marítimo se estabiliza y abriga con nuestro Sistema Ambiental, formado por obras de muy baja altura de coronación, y cuyo conjunto integrado permite la libre vista del mar, la circulación de las brisas y la continua renovación del agua de las dársenas”.

En fechas previas a los Juegos Olímpicos de Barcelona en 1992, se llevaron a cabo diversos proyectos de ordenación y restauración del frente marítimo de Levante de la ciudad, siguiendo el esquema diseñado por Suárez Bores, tanto en la cadencia de las distintas playas en concha: Nueva Icaria, Bogatell, Mar Bella I y II y Somorrostro, así como la implantación de una nueva marina (Puerto Olímpico) y posteriormente la apertura de la nueva bocana del Puerto de Barcelona como ya hemos dicho (ver Figura 11).

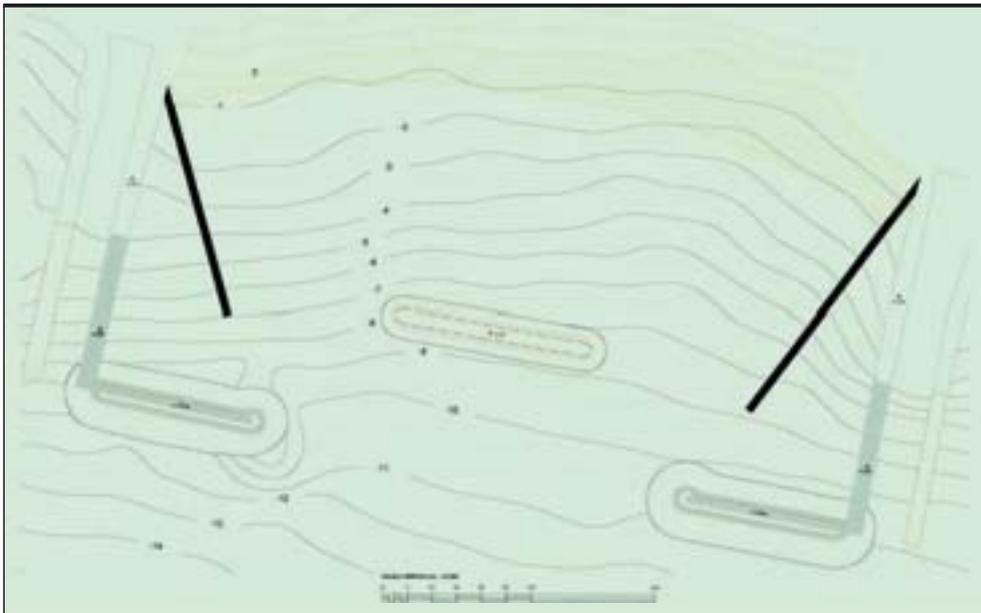
El esquema ejecutado, tenía diversas carencias, que daban lugar a importantes basculamientos en las playas olímpicas y en la de la Barceloneta, teniendo esto como consecuencias la rotura de los paseos marítimos y la pérdida de playa seca en algunos sectores de dichas playas, por lo que a partir del año 2003, tuve la satisfacción de dirigir el proyecto de “Mejora de la consolidación de las playas olímpicas de Barcelona” redactado por el Ingeniero de Caminos Luis Moreno Blasco de la Empresa Tecnoccean y en cuyo proceso tuve también la posibilidad de contar

con la participación de Suárez Bores, y con el apoyo y ayuda del Albert Vilalta Cambra, que como su padre, era a la sazón Jefe de los Servicios Técnicos del Ayuntamiento de Barcelona.

El planteamiento de Suárez Bores, para el caso concreto de la playa de Bogatell, lo podemos ver en los dibujos siguientes, con dos variantes, una mediante un dique exento de cierre de la dársena, en la Figura 12, y otro mediante apoyo de pié de playa, en la Figura 13.

En ambos casos se patentiza su Sistema Ambiental, con diques de baja cota (en doble alineación paralela y normal a la costa) y cuencos de amortiguación cerrados mediante elementos de filtro del oleaje, todo ello en un esquema en el que siempre Suárez Bores, trató de integrar los elementos funcionales con procesos de ordenación integral de los frentes marítimos sin olvidar por supuesto la variable ambiental.

En esta línea consecuente con estos mismos objetivos, teniendo siempre presente el concepto urbanístico, podemos ver en la Figura 14, la propuesta de ordenación del frente marítimo de Las Palmas realizada en los años noventa, donde se conjugan como en el caso de Barcelona todo un conjunto de variables para dar solución a espacios por una parte muy próximos a las ciudades, pero que al tiempo carecían del encaje dentro de la malla urbana.



**FIGURA 12.** Diseño de cierre y apoyo de la playa de Bogatell con dique exento.

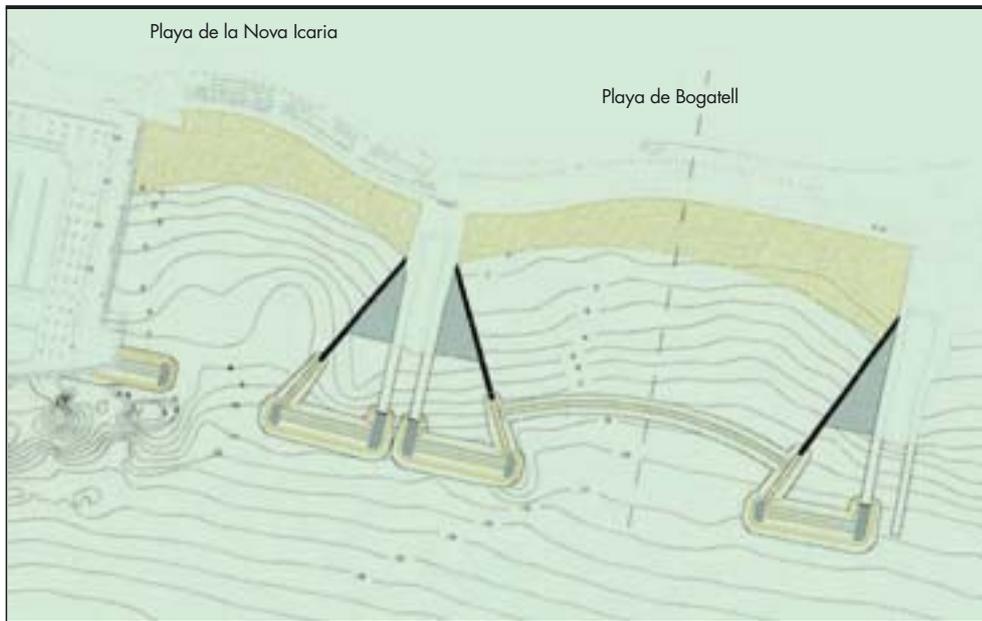


FIGURA 13. Plano de cierre con apoyo de pié para la playa de Bogatell.

### ÚLTIMAS APORTACIONES

Como circunstancia final de la personalidad multifacética de Suárez Bores, derivada también de su afición a la historia, quiero mencionar su trabajo póstumo aún no publicado, en el que bajo el título de “Síntesis de la Historia del Homo Sapiens, Perspectiva Técnica”, hace un análisis secuencial de la historia del devenir de la humanidad desde hace 150.000 años hasta el 2500 antes de Cristo, en un esfuerzo integrador en el que se conjugan elementos tales como la arqueología, el clima y el paleoclima, el análisis cromosómico de la especie, la forma de vida y las relaciones sociales del ser humano, la ar-

quitectura y un largo etcétera de conceptos, que a mi entender abre un camino de trabajo inédito, que marca una senda de futuro evidente para los trabajos que se desarrollen en esta materia.

Esperemos que el trabajo vea pronto la luz, para conocimiento de todos y reconocimiento si cabe más de la labor del recientemente fallecido Profesor Suárez Bores.

Quiero finalmente agradecer a la familia de Pedro Suárez Bores, su mujer y sus hijos, y muy en particular a Guillermo, las facilidades que me han dado para la publicación de parte del material gráfico que figura en este artículo, así como de mucha de la información que ha servido para su redacción.



FIGURA 14. Ordenación del frente marítimo de Las Palmas.

# Pedro Suárez Bores, iniciador de la medida sistemática del oleaje en España

MERCEDES MARTÍNEZ CLEMENTE (\*), JOSÉ CARLOS SANTÁS LÓPEZ (\*\*) y LUIS TEJEDOR MARTÍNEZ (\*\*\*)

El Profesor Suárez Bores desarrolló una gran labor en el campo de la Ingeniería de Puertos y Costas, sabiendo aunar el progreso de la técnica con la enseñanza y la investigación. Sus aportaciones científicas al estudio del oleaje, sus publicaciones relativas a la fiabilidad de los sistemas de diseño, etc., son el resultado de su gran actividad investigadora. En este artículo nos centraremos en su contribución a impulsar la creación de un banco de datos de oleaje en las costas españolas.

A principios de la década de los setenta, durante su labor como subdirector del entonces Laboratorio de Puertos "Ramón Iribarren" hoy Centro de Estudios de Puertos y Costas, comprendió la imperiosa necesidad de disponer de un banco de datos de oleaje. Para conseguir esto era necesaria la creación de una red, con carácter permanente, de medida de oleaje en las costas españolas. Así surgió la REMRO (Red Española de Medida y Registro de Oleaje) cuya ampliación ha seguido desarrollando el Centro de Estudios de Puertos y Costas hasta el año 2008, en que fue transferida a Puertos del Estado.

Los primeros estudios teóricos para el conocimiento del oleaje aparecen en el siglo XVII con Isaac Newton y forman cuerpo de doctrina con la teoría de la onda de gravedad-Gerstner (1809), Airy (1845), Stokes (1880)-. Sin embargo y siguiendo al Profesor D. Pedro Pérez de la Sala en su "Tratado de Construcciones en el Mar", la aplicabilidad de los resultados de estos estudios teóricos "...son de dudosa aplicación a las olas, en cuanto a lo que se refiere a las construcciones...", dado que "... las fórmulas a que conducen son en extremo complicadas y solo es posible deducir de ellas algunos resultados generales, ..."

## 1. OLA DE CÁLCULO

Desde el punto de vista de aplicación a la construcción, hasta finales de los sesenta había dos enfoques distintos para determinar la ola de cálculo para el proyecto de una obra marítima.

### 1.1. MÉTODO DETERMINISTA

La primera consideración teórica fue realizada por Thomas Stevenson, ingeniero escocés que propuso en 1874 la primera fórmula que relacionaba la altura máxima de ola y el *fetch*. La proporcionalidad entre ambas la ajustó mediante observaciones visuales realizadas en el Mar del Norte. La fórmula propuesta fue:

$$H = 0.336 F^{0.5}$$

donde F es la longitud del *fetch* en kilómetros y H es la altura máxima de ola en metros.

Esta fórmula, muy apropiada para longitudes de *fetch* no muy cortos (superiores a 37 Km.), fue muy utilizada hasta tiempos recientes por los ingenieros de habla inglesa.

Siguiendo esta metodología el Prof. Iribarren desarrolló su formulación, que fue publicada en 1941.

Posteriormente, en 1954 y 1965, fue de nuevo revisada por el mismo autor, ajustándola con datos visuales obtenidos por él mismo en las costas del Norte de España.

La fórmula de Iribarren, ampliamente utilizada por los ingenieros españoles e hispanoamericanos, es:

$$H = 1.2 F^{0.25}$$

Con posterioridad el factor de proporcionalidad propuesto fue modificado aún por el Prof. Iribarren en colaboración con el Prof. Suárez Bores, pasando a ser 1.25, e identificando H con la altura de ola significativa, es decir:

$$H_{sig} = 1.25 F^{0.25}$$

## 1.2. MÉTODO ESTADÍSTICO

El precedente de los métodos de previsión de oleaje es el método manual desarrollado por el U.S. Army Corp Eng, 1947, posteriormente revisado por Sverdrup y Munk, donde se presentan una serie de gráficos en que por primera vez se relaciona la altura y el período de ola significativa con la velocidad del viento y el *fetch*. Posteriormente fue completado en 1952 por Bretschneider, por lo que este método se denomina SMB en honor de sus autores. El uso de este método de previsión de oleaje proporcionó información estadística en el punto de previsión. La única condición era disponer de cartas meteorológicas con la distribución de presión atmosférica al nivel del mar a partir de las cuales puede estimarse la acción del viento sobre la superficie del mar.

En 1953, Neumann propuso un espectro de energía obtenido a partir de datos visuales tomados desde barcos. Poco tiempo después, en 1955, Pierson, Neumann y James, desarrollan una nueva técnica de previsión de oleaje, basándose en el espectro de energía (método PNJ).

A finales de los cincuenta algunos investigadores americanos, Saville (1953); Neumann (1955), Bretschneider (1956) obtienen estimas de regímenes de oleaje y de temporales para zonas importantes de las costas americanas.

En 1964, Pierson y Moskowitz proponen un espectro de energía para oleaje totalmente desarrollado. En este mismo año es cuando Suárez Bores establece las bases del método integrado de previsión espectral del oleaje utilizando el espectro de Pierson - Moskowitz, plasmando más tarde sus ideas, en 1967, en una publicación interna del Laboratorio de Puertos<sup>1</sup> sobre la estructura del oleaje.

(\*) Doctora en Ciencias Físicas.

(\*\*) Doctor en Ciencias del Mar.

(\*\*\*) Doctor en Ciencias Físicas.

1 P. Suárez Bores, "Introducción a la estructura del oleaje". Laboratorio de Puertos, publicación 4-B. Madrid. 1967.

En 1973 Hasselmann y otros investigadores publican el espectro JONSWAP método especialmente válido para oleajes parcialmente desarrollados.

En 1974 Pedro Suárez Bores, utilizando su método integrado de previsión espectral, obtiene los regímenes de temporales en varias zonas del litoral español.

En 1976 Losada y Serrano presentan un método direccional de previsión de oleaje.

Con base en uno de estos métodos de previsión de oleaje se pueden obtener los datos para calcular las estimas estadísticas de regímenes extremos de altura de ola significativa.

Este procedimiento que permite obtener estimas estadísticas de regímenes de temporales tiene la dificultad de lo extremadamente laborioso de su confección, sin contar con la falta de fiabilidad, cuando la distribución de las isobaras en las cartas meteorológicas no está muy definida por falta de datos experimentales. Estos inconvenientes llevaron a Suárez Bores a pensar en la necesidad de la creación de un banco de datos de oleaje obtenidos mediante medidas in-situ.

La introducción de la Estadística aporta un cambio de visión. Según palabras del propio Suárez Bores, el oleaje deja de ser considerado como una onda teórica para ser considerado como un proceso estocástico de dos componentes. uno de fluctuación, de corto periodo, descrito por las distribuciones de las variables correspondientes a un estado del mar dado ( $H$ ,  $T$ ,  $\gamma$ , etc.), y otro de largo periodo, descrito por las correspondientes distribuciones de sus variables características en el año medio ( $H_{1/3}$ ,  $T_{opt}$ ,  $N$ , etc.).

Se precisa un amplio conocimiento del clima de oleaje del pasado para poder predecir con un buen grado de aproximación las características extremas del oleaje dentro de un cierto tiempo futuro, periodo de retorno, así como el margen de error esperable.

La gran diferencia entre el nuevo modelo estadístico con el antiguo, determinista, consiste en que las variables ambientales que determinan el proyecto de obras marítimas (viento, oleaje, etc.) tienen modelos que obedecen a procesos estocásticos, algunos de ellos cíclicos, que obligan a series de observaciones muy largas. Por ello es evidente la necesidad de realizar medidas sistemáticas reales del oleaje en la costa y conformar un banco de datos de sencilla explotación, para poder hacer una determinación precisa de la distribución de las variables de interés.

Ante este reto el Profesor Suárez Bores (1967), por entonces Subdirector del Laboratorio de Puertos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, actualmente CEDEX, y Catedrático de Puertos de la Escuela de I. C. C. y P. de Madrid, planteó una alternativa con su proyecto REMRO.

## 2. PROYECTO DE LA REMRO

Nada mejor que transcribir aquí la idea del profesor Suárez Bores con sus propias palabras:

*La REMRO estaría formada por un número limitado de registradores, situados sobre profundidades indefinidas, no afectadas por refracción, difracción, ni efecto de configuración del fetch, situados a distancias tales que no existan entre ellos singularidades ni variaciones climáticas importantes, Estos registradores funcionarían indefinidamente y registrarían la variación del oleaje con la precisión que se desee, solo dependiente de las características de los registradores.*

*Las características del oleaje en cualquier punto de la costa puede entonces obtenerse mediante las correspondientes funciones de transferencia entre ese punto y los registradores exteriores (estaciones), lo que puede lograrse por vía*

*analítica, o lo que es mejor, con la instalación durante un año de un registrador en ese punto. De esta manera transformamos el problema bidimensional de observación del oleaje, que requiere la instalación de un número desmesurado de registradores y un presupuesto imposible, en un problema unidimensional, con un número muy limitado de registradores.*

En aquellos momentos solamente existían redes locales de medida permanentes, aunque no de carácter nacional, en la costa atlántica de Estados Unidos y en Japón, por lo que el proyecto era una auténtica novedad a escala mundial.

El proyecto, por tanto, partía de la necesidad de contar con series de datos de elevación, oleaje escalar diríamos ahora, para el ajuste y previsión de regímenes medios y extremos de oleaje a partir de los estimadores estadísticos  $H_{1/3}$ ,  $T_{1/3}$ ,  $H_{max}$ ,  $T_z$ , ..., resultantes del análisis estadístico de cada muestra o serie temporal, así como para caracterizar los espectros de energía de cada serie mediante los estimadores de los mismos ( $H_{m0}$ ,  $T_p$ ,  $T_{01}$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,...).

Obviamente, como apuntaba el profesor Suárez Bores, la situación óptima habría sido colocar tantos medidores como puntos de interés hubiera, aunque la lógica aconseja limitar el número de sistemas en base al ahorro de recursos y medios y a las facilidades disponibles para el mantenimiento y a la operatividad de la red.

Técnicamente los puntos de instalación debían ser tales que el oleaje registrado estuviera exento, en lo posible, de refracción por fondo y de difracción por accidentes costeros para que se pudiera tratar la información como "de aguas profundas" que, mediante modelos de propagación adecuados, permitiera el cubrimiento de la costa española, así como la interpolación entre puntos del litoral alejados del punto de medida. La conclusión evidente era que la mejor ubicación de los medidores era en salientes costeros con recepción de datos en faros.

La REMRO fue aprobada técnica y económicamente por el Ministerio de Obras Públicas en 1968, e instalada en los años siguientes como una red centralizada de datos, en tiempo real, (P. Suárez Bores, 1974)<sup>2</sup>, con la colaboración del profesor Tejedor Martínez, (L. Tejedor, 1974)<sup>3</sup>, jefe del Área de Ingeniería Oceanográfica del Laboratorio de Puertos "Ramón Iribarren" del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, hoy CEDEX.

El elemento principal de la red era, obviamente, el sensor de oleaje. En esos momentos no existían referencias de medidores de tipo boya, por lo que el oleaje instantáneo en superficie, como variación local instantánea del nivel, se obtenía mediante equipos fondeados a media profundidad (entre 15 y 20 metros desde la superficie) en aguas de una profundidad media de 50 metros, al límite práctico de la instrumentación existente.

La atenuación en altura, y su dependencia con el periodo del oleaje, fue estudiada con detalle en el proyecto para determinar la idoneidad y campo de validez de los algoritmos a emplear para obtener la onda de superficie.

La conexión a tierra para alimentación y entrega de señal se realizaba por cable submarino, que terminaba en una estación costera, habitualmente instalada en un faro. La señal se transmitía al Laboratorio de Puertos mediante codificación

2 P. Suárez Bores, "Sea Observation in coastal waters: the Spanish offshore network"; Proc of 1st Int. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis; pp. 13 a 24. New Orleans, ASCE. 1974.

3 L. Tejedor, "A teleprocess system: the Spanish offshore network"; Proc of 1st Int. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis; pp. 186 a 196. New Orleans, ASCE. 1974.

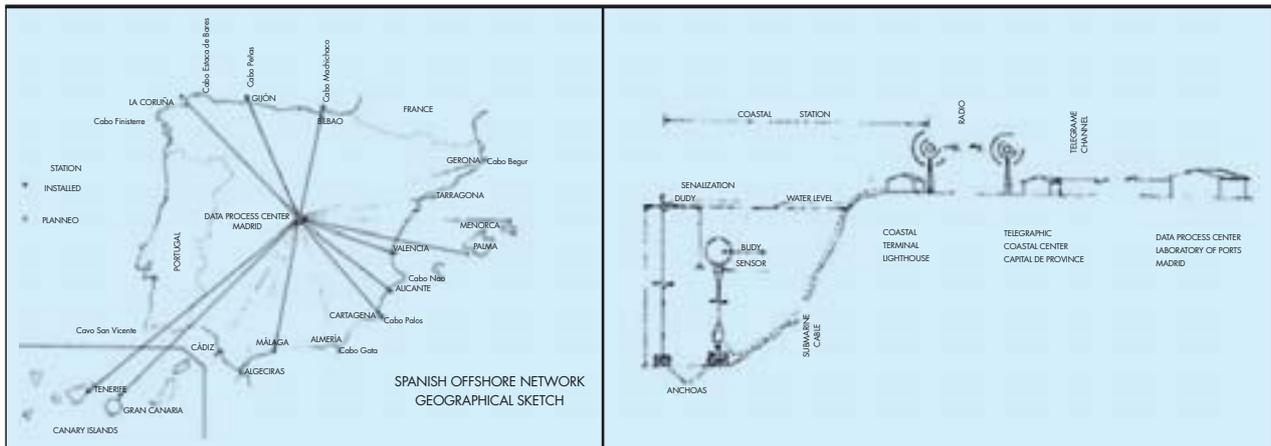


FIGURA 1. A la izquierda, ubicaciones del despliegue inicial de estaciones REMRO. A la derecha esquema del montaje de una estación, mostrando la colocación del sensor de medida, el cable submarino y la transferencia de la información a la estación central. Cercano al sensor se coloca una boya de señalización para marcar el lugar de emplazamiento del mismo y evitar accidentes.

digital desde el faro que soportaba la estación costera, por medio de la red telegráfica nacional.

La primera fase de despliegue, tenía 10 estaciones, localizadas en Cabo Machichaco (Vizcaya), Cabo Peñas (Asturias), Coruña-Ferrol (Galicia), Torremolinos (Málaga), Cabo de Palos (Murcia), Cabo de las Huertas (Alicante), Valencia (puerto), Palma de Mallorca, Las Palmas de G.C. y Santa Cruz de Tenerife, (Figura 1).

La estación central de recepción de información se instaló en el Laboratorio de Puertos del CEDEX, Madrid, estando las comunicaciones soportadas por la Dirección General de Correos y Telégrafos.

### 3. SISTEMA DE TELEMETRÍA

Ya en 1974 se vio que los cables submarinos constituían un eslabón muy débil en la cadena de equipos que constituían la estación, debido a la incidencia de frecuentes roturas causadas por el roce con el fondo o por mordeduras de animales marinos o terrestres. La rotura del cable equivalía al cierre de la estación hasta poder sustituirlo, lo que no era una tarea simple. Así se planteó la necesidad de buscar una alternativa más robusta del sistema marino de medida.

En Holanda acababa de salir al mercado un nuevo sistema de medida de oleaje, consistente en una boya flotante que encerraba en su interior un sensor acelerométrico capaz de registrar las diferencias instantáneas del nivel del mar en su lugar de instalación. Esta señal era enviada a tierra vía radio, donde un receptor la captaba y la entregaba al resto de la cadena de equipos hasta llegar a la estación central de recepción.

En aquellos momentos estaba en fase de construcción el Dique de Punta Lucero del puerto exterior de Bilbao y era a todas luces necesario registrar de forma continua el oleaje que incidiría sobre dicho dique dada su condición de gran obra portuaria y ser, en aquellos días, el dique de escollera realizado a mayor profundidad.

El Profesor Suárez Bores y sus colaboradores en el laboratorio de Puertos (L.Tejedor y J.C. Santás) propusieron a la Autoridad Portuaria de Bilbao la instalación y operatividad de un sistema de medida de oleaje por boya acelerométrica, con transmisión por radio y recepción en el propio puerto, sistema que ya había sido probado en el Laboratorio de Puertos en algunas campañas aisladas de carácter temporal con buenos resultados. Dicho sistema fue puesto en funcionamiento por el Puerto de Bilbao en 1975.

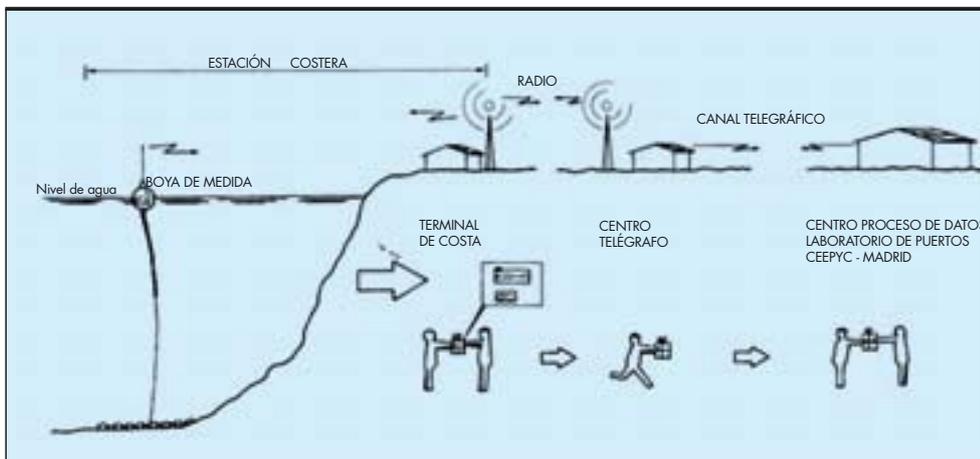
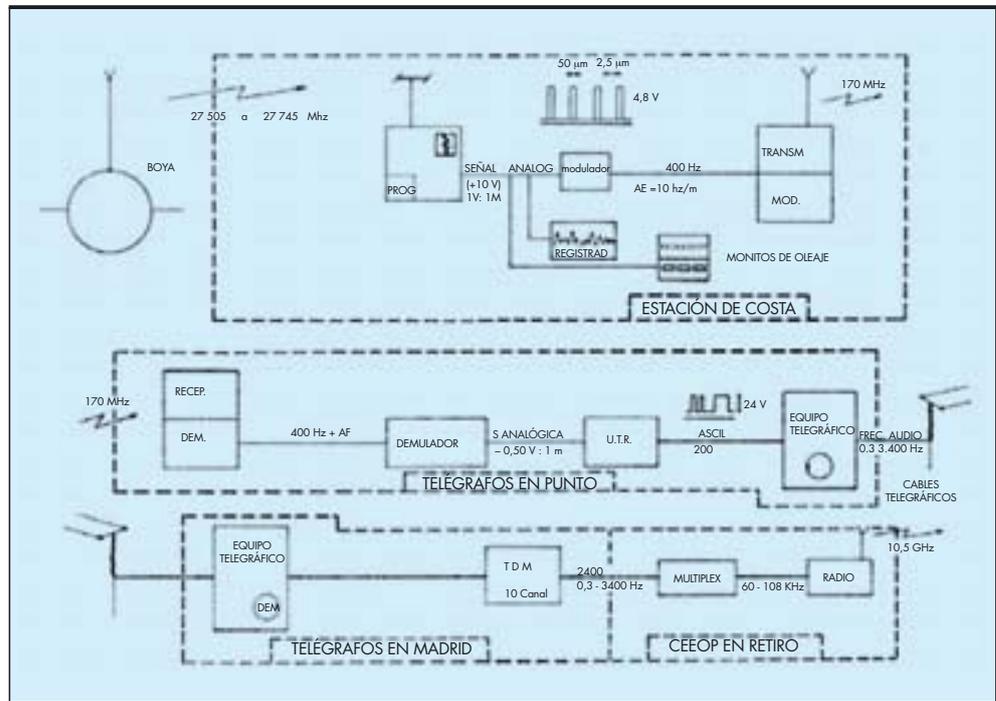


FIGURA 2. Diagrama funcional de una estación REMRO con boya de superficie (1983). En la estación costera se registra la curva del oleaje en papel, que es enviado por correo a la estación central, donde se analiza por el método de Drapper. La señal analógica que llega vía telégrafos es registrada en cintas magnéticas, tanto para su almacenamiento como para su análisis posterior.

**FIGURA 3.** Muestra las tres fases de acondicionamiento de la señal emitida por la boya hasta su llegada a la estación central en Madrid (CEEOP es el actual CEDEX). La señal obtenida en la estación de costa debe ser acondicionada para enviarse al centro telegráfico más cercano en el punto, desde el que llega al centro telegráfico en Madrid y, finalmente, a la estación central en el Centro de Estudios de Puertos y Costas (antes Laboratorio de Puertos, del CEDEX).

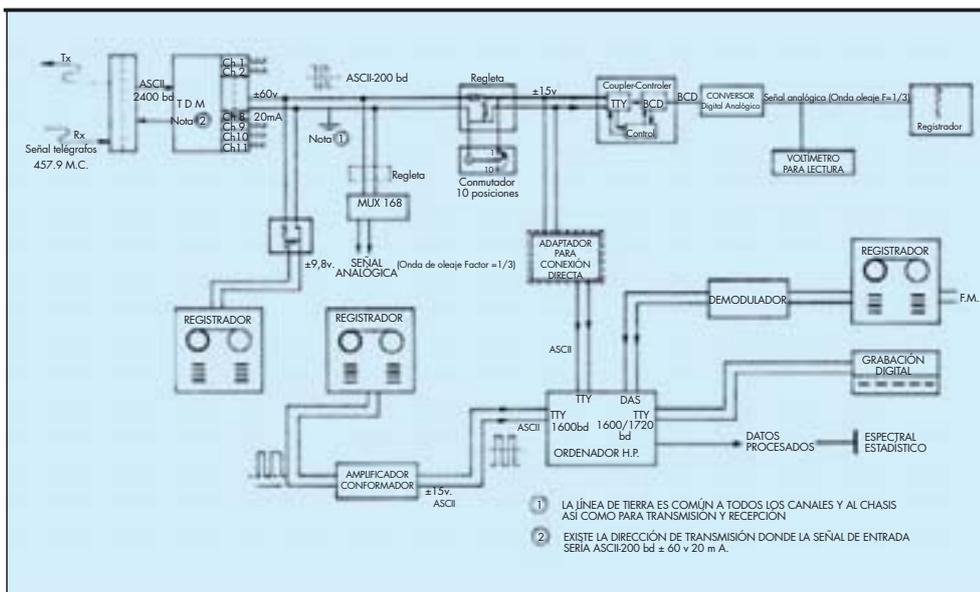


La obra del Dique de Punta Lucero se había construido de acuerdo a la tecnología más avanzada, incluidos ensayos en laboratorio aunque con oleaje monocromático, dado que no existía en España otra opción mejor. El dique se rompió, con graves consecuencias, en el transcurso de un fortísimo temporal que fue registrado en la estación de medida, con una ola máxima de más de 15 metros. La información proveniente de la boya acelerométrica permitió caracterizar las condiciones climáticas de los momentos del fallo del dique bajo el fuerte temporal. Con los datos registrados, el profesor Suárez Bores modificó los cálculos de las escolleras y el dique fue restaurado.

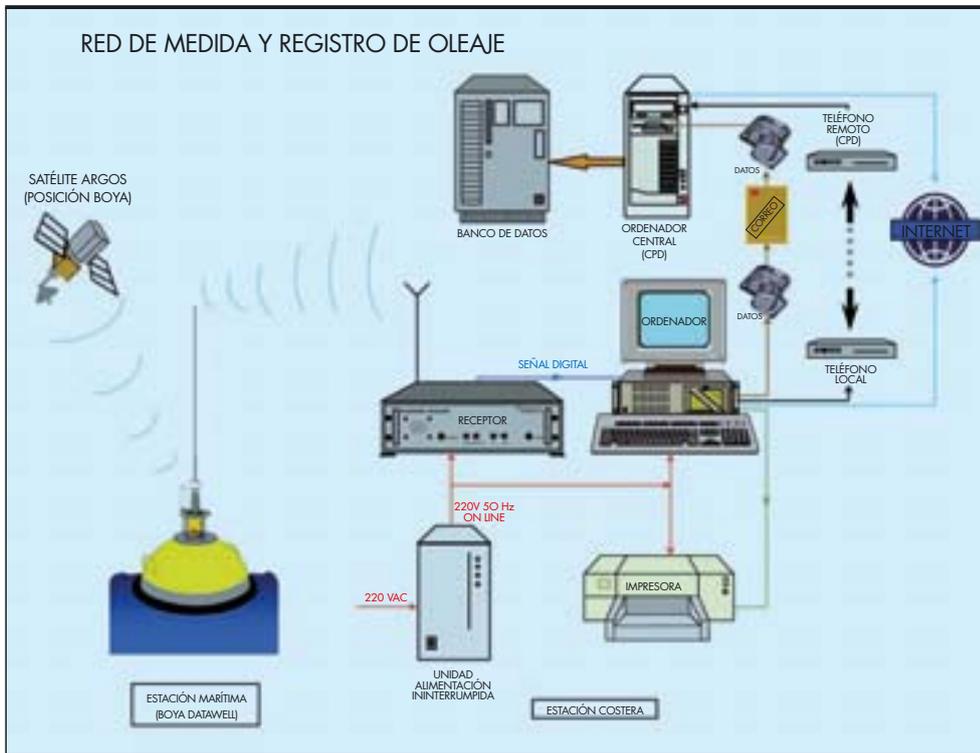
Por otra parte, el comportamiento del nuevo sistema medidor en condiciones marítimas muy duras avaló la conveniencia del cambio de sistema medidor existente en la red hasta ese momento por sistemas de medida de oleaje por medio de boyas acelerométricas.

El esquema de funcionamiento está representado en la Figura 2.

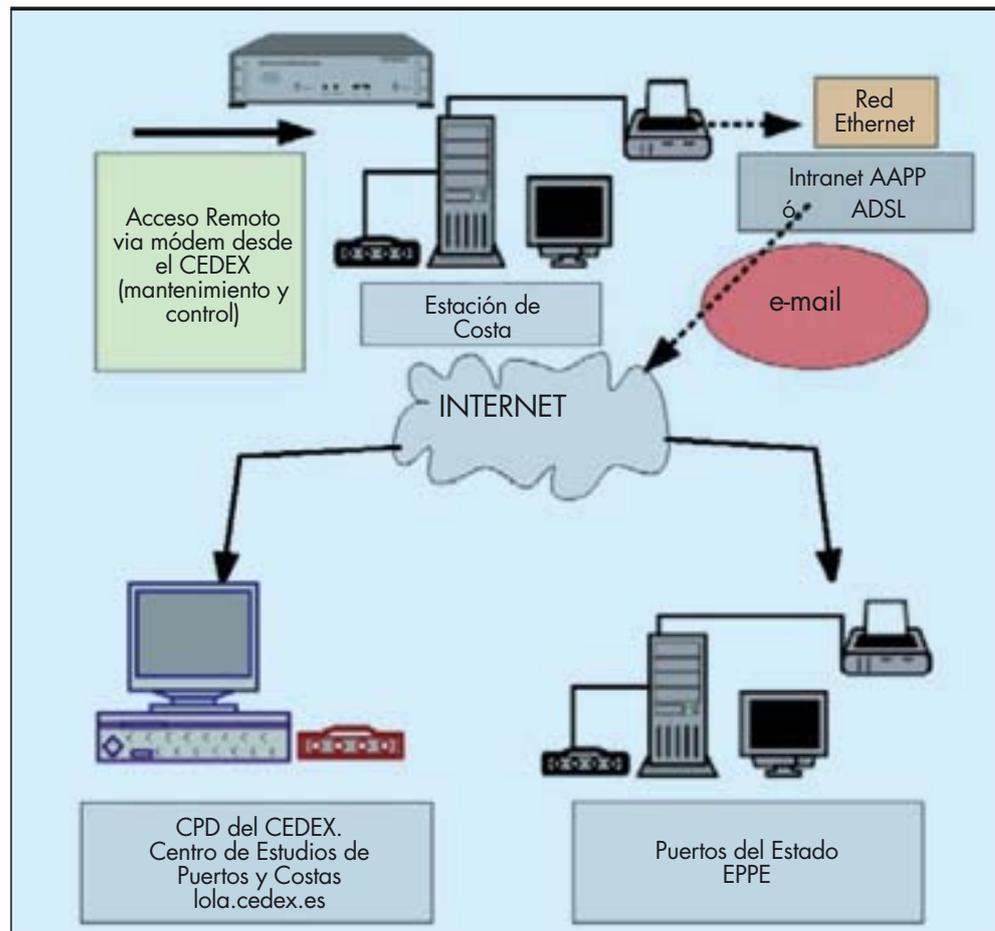
En las dos figuras siguientes (Figuras 3 y 4) se representan en detalle las diversas transformaciones de la señal emitida por la boya en su camino hasta la estación central.



**FIGURA 4.** Esquema de grabación de las señales procedentes de las distintas estaciones, cada una por un canal diferente. Las señales analógicas grabadas son posteriormente procesadas en un ordenador en el que se ejecuta el programa de análisis de oleaje apropiado para obtenerse los parámetros típicos del oleaje deseados.



**FIGURA 5.** Diagrama funcional de una estación REMRO (2004). La boya es vigilada por el sistema de satélites Argos para asegurar su posición correcta y hacer su seguimiento en un eventual caso de alejamiento de la misma. Un ordenador bajo S.O. Linux en la estación costera controla el registro programado de datos. Automáticamente los datos son enviados a la estación central, que los transfiere al banco de datos. La estación central también ejerce control remoto sobre las estaciones costeras.



**FIGURA 6.** Esquema de las comunicaciones hasta 2008, fecha de la transferencia de la REMRO a Puertos del Estado los datos registrados en la estación costera eran transferidos al CEDEX para su control y a Puertos del Estado, para incluirlos en el Banco de Datos General. Desde el terminal del CEDEX se podía acceder a la configuración de las estaciones costeras, actuando como un terminal remoto de las mismas.

#### 4. LA REMRO EN LA ACTUALIDAD

A raíz de la experiencia de Bilbao, se van sustituyendo progresivamente los sensores de presión por boyas acelerométricas, como parte del Convenio entre el CEDEX y la Dirección General de Puertos y Costas del Ministerio de Obras Públicas, siendo de destacar la colaboración de las Autoridades Portuarias participantes en el proyecto al tener una estación REMRO en su zona.

A partir de 1982, en sucesivos convenios con la Dirección General de Puertos y de acuerdo con las disponibilidades presupuestarias, se plantea una profunda reestructuración que incluye dos puntos importantes:

- Normalizar el equipamiento de todas las estaciones para dotar al conjunto de un marco de uniformidad que permitiera desarrollar un programa rutinario común de mantenimiento de los equipos y explotación de los datos.
- Incorporar progresivamente todas aquellas mejoras disponibles en cuanto a grabación de datos y comunicaciones siguiendo el rápido avance que empezaban a tener estas técnicas

En 1986, con una veintena de estaciones en funcionamiento, el registro analógico es sustituido por registro digital, eliminándose la servidumbre de la transmisión telegráfica.

Tras la creación del Organismo Público Puertos del Estado se suceden los Convenios entre este organismo y el ya CEDEX, en el transcurso de los cuales se incorporan progresiva-

mente los primeros ordenadores tipo PC, las comunicaciones por MODEM telefónico y las comunicaciones vía Internet, pudiéndose realizar transferencia de datos en ambos sentidos entre las estaciones y la estación central.

En Convenios específicos independientes Puertos del Estado – CEDEX, se incorporan también boyas de medida del oleaje direccional, nuevos programas de proceso y análisis, boyas complejas oceano-meteorológicas en aguas profundas, etc., al Banco de Datos de oleaje de Puertos del Estado, en consonancia con el objetivo estratégico de este Organismo. Diversas publicaciones en distintos foros han expuesto los avances más sobresalientes <sup>4, 5, 6</sup> en los siguientes 20 años.

Finalmente, en 2008 la gestión del proyecto REMRO es transferida totalmente a Puertos del Estado, quedando desde esos momentos incorporada al Proyecto General de Redes de Medida de Puertos del Estado.

4 M. Martínez, J.C. Santás, L. Sanz. "Spanish Network for Measurement an recording of Waves: Past, present and future". 21th International Conference on Coastal Engineering. Torremolinos (Málaga). Spain. Junio, 1988.

5 M. Martínez, J.C. Santás, L. Sanz. " Spanish Network for Wave Measurement: REMRO"; 27th International Navigation Congress. Osaka 1990.

6 M. Martínez. "La Red Española de Medida de Oleaje REMRO: un proyecto en continuo desarrollo". Revista de Ingeniería Civil". Marzo 2001.

**Puerto de Málaga**  
ser y estar

Equipado logísticamente  
Perfectamente ubicado  
A 70 millas del Estrecho de Gibraltar  
Y a 1.800 millas del Canal de Suez

[www.malagaport.es](http://www.malagaport.es)

# Pedro Suárez Bores, Premio nacional de Ingeniería Civil del año 2002

MANUEL L. MARTÍN ANTÓN (\*)



Madrid. Avenida de la Capital de España, s/n. Palacio municipal de Congresos. Sala "París".

Eran las trece horas del 18 de febrero de 2004. Nos congregábamos allí alrededor de trescientas personas: autoridades y profesionales del mundo de la ingeniería y de la arquitectura, familiares y amigos.

Y allí estabas tú, como centro de atención. Tú y tu eterna sonrisa.

Era el día de la entrega de los Premios nacionales de Ingeniería Civil y de Arquitectura del año 2002.

Y allí volvimos a vernos.

A ti y a mí, Pedro, el mar nos apasiona. Nos ha ocupado y preocupado. Nos ha entretenido. Nos ha agrandado y empuñado. Y ha sido el eje de nuestro tiempo en común.

*"Yo amo al mar y le amo no solo por su inmensidad y complejidad, sino por la belleza por él creada en su diálogo con la tierra".* Eso nos confesaste aquel día a los trescientos que te escuchábamos. Yo ya lo sabía de antes.

Yo, a Pedro, le conocí en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. Hace muchos años. Tantos que me asustan. O sea... unos cuarenta.

Allí resultaba difícil ver y escuchar el mar. Aunque hubieras optado por la especialidad de "Transportes, puertos y urbanismo". Nada. No había manera. Ni siquiera en el laboratorio de puertos. Agua había, pero no era lo mismo. Ni por asomo.

(\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Presidente del Consejo de Obras Públicas.



El mar se estudiaba, se evaluaba su energía, su movimiento. Y se admiraba su inmensa fuerza. Pero no se paseaba junto a él, no se le veía, no se le escuchaba. Ni una gota de él te salpicaba.

Puertos y costas...

Pedro fue un gran profesor.

Aún recuerdo las palabras que, al glosar escuetamente su obra, le dedicó Aurelio Hernández Muñoz en aquél 18 de febrero de 2004:

*“Como profesor has demostrado una profunda vocación por enseñar, hacer partícipes a todos los alumnos de tus conocimientos. No solo has transmitido tus conocimientos, te has dado a ti mismo. Has logrado especializar las materias que impartes, has llevado a tus alumnos desde la introducción a la temática, al aprendizaje y a la preparación para la investigación. Has hecho escuela.*

*Has enriquecido intelectualmente a tus alumnos, les has sabido plantear los problemas, las preguntas a hacerse, y les has llevado a soluciones actuales para el momento que vivimos. Les has enseñado a pensar. Has sabido transmitir tus conocimientos.”*

Mi relación con Pedro fue la habitual de alumno a profesor. Siempre sentí interés por su asignatura, que él hacía, aún, más atrayente. Hasta el punto de que, al elegir las correspondientes al doctorado volvimos a vernos. Y siempre saqué buenas notas. Sobresaliente, Pedro, sobresaliente. Esto, sin duda, no quiero ocultarlo, contribuye a mi buen recuerdo de Pedro. Vamos, que ayuda mucho. Condición coadyuvante pero no suficiente.

Lo que no sabía, por aquel entonces, es que años más tarde me tocaría a mí calificarle a él. Cambió el sujeto y

cambió el predicado. Y sacó muy buena nota. Una nota excelente. La suficiente para que, ni más ni menos, se le concediese el Premio nacional de Ingeniería civil del año 2002. Yo tuve la satisfacción personal de ser Presidente del Jurado, por delegación del Ministro de Fomento.

Pedro se convirtió, así, en el primer ingeniero portuario en recibir tal distinción. Y se lo merecía, no cabe duda.

*“Un hombre hecho a sí mismo, en contacto con la naturaleza, conocedor del medio, con esfuerzo y dedicación supo definir su destino y marcar su misión en la vida, siempre al lado del medio ambiente como hombre, como profesor, como investigador y como inventor. Una vida dedicada a los puertos con una componente ambiental, componente nunca hasta entonces considerada.”*

Así le definía Aurelio en aquel día.

Y se te veía feliz, Pedro, derrochando esa sonrisa tan tuya.

Allí al lado de Miguel Fisac Serna, Premio nacional de Arquitectura del mismo año 2002, formando una pareja en la que sí uno honraba al otro, el otro honraba al uno.

Dijo de ti el entonces Ministro de Fomento, tu alumno de los años 70 y luego compañero Francisco Álvarez Cascos, que eras *“maestro de toda una generación de ingenieros y heredero e impulsor de la reconocida tradición marítima española”*.

Y es verdad, Pedro.

La motivación del jurado que te otorgó aquel premio, recalca que se te concedía *“por tu trayectoria como profesor, investigador y proyectista y por el conjunto de tu aportación a la ingeniería de puertos y costas, a través de tus trabajos y estudios sobre las costas españolas, sobre la morfología del litoral y su gestación, el oleaje y las corrientes, a la que has sabido añadir facetas de innovación tecnológica, que te convierten en un pionero mundial en las redes exteriores de prevención de oleaje, en la clasificación y formulación de playas y en el análisis multivariado para cálculos marinos, condiciones todas ellas que ponen de relieve aspectos singulares de entre los sociales, económicos, estéticos y tecnológicos que acompañan a las infraestructuras del transporte marítimo”*.

He tuteado el texto, Pedro, como te has dado cuenta. Y lo he hecho para mantener mi tono epistolar y desde el derecho que me otorga la paternidad de esa parrafada que a mí me correspondió escribir. Una justificación de la concesión del Premio que tiene de bueno y cierto lo que, como tal, de ella se desprende, a pesar de mi burda pluma.

Y cuando te veía allí, ese 18 de febrero de 2004, lo hacía recordando el aula de la Escuela, la pizarra, Pedro, la pizarra... y tú venga que te venga con la dinámica litoral, con tanto entusiasmo que, en algunos momentos, sí que creí que iba a entrar el oleaje por la cristalera.

Lo pasamos bien juntos, Pedro. Tú enseñando y yo aprendiendo. Y los dos conversando. A ti, como a la mayoría de los profesores, no había que darte cuerda. Hablabas sin parar. Yo, simplemente, te seguía el juego de la conversación.

Tengo un imborrable recuerdo de ti, Pedro, pero no me puedo callar algo que llevo dentro y no tengo por menos que reprocharte. Ni una, ni una sola vez, estuve contigo y con Aurelio, en la cuesta de las Perdices, oyéndote hablar de las migraciones en el Paleolítico y el Mesolítico o de la historia del pueblo astur, degustando, como hacíais, un rodaballo salvaje. Y mira que me hubiera gustado. La conversación y el rodaballo, a cual más.

Asignatura pendiente, profesor. Hasta que la apruebe, recibe mi admiración, mi respeto y un abrazo.

# Síntesis físico-matemática del Método Sistémico Multivariado

PEDRO SUÁREZ BORES

El **Método Sistémico Multivariado**, nace como consecuencia de los criterios propuestos para la reparación de las graves averías sufridas en el dique de escollera de Punta Lucero, Bilbao en 1976, y que resumimos en la siguiente definición:

*“Toda obra debe construirse para cumplir con la **función** a que se destina, debiendo **resistir**, en consecuencia, cada una de sus partes y en su conjunto (como un sistema), la acción sinérgica de todos los **agentes** –ambientales, antrópicos, etc.– a toda clase de **fallos** –estructurales, funcionales, ambientales, etc.– durante toda la **vida de diseño** (previsible) para la obra y a un nivel de **fiabilidad de diseño** (admisible)”, Bores (1977).*

## 1. ACCIÓN DE LOS AGENTES EXÓGENOS (OLEAJE, ETC.). ESTIMA DISTRIBUCIÓN MULTIVARIADA DE PROBABILIDAD

En general, el fallo de las obras marítimas se origina por la **acción del oleaje**, que origina corrientes y presiones entre y sobre los cantos de los diques de escollera, extrayéndoles de su posición, y provoca el vuelco, deslizamiento ó rotura de las obras monolíticas. Las variables determinan estas corrientes, presiones, etc. son mecánicas: velocidad, cantidad de movimiento, etc., pero, mediante la teoría de las ondas, Airy (1845), hacemos un cambio de esas variables **dinámicas**, reales, a variables **geométricas**: ( $H_{1/3}$ ), ( $L_4$ ), etc. que, a su vez, estimamos mediante las variables aleatorias de **estado**  $H_{1/3}$ ,  $T_{opt}$ , etc. Evidentemente estas variables, geométricas y aleatorias, sólo “**virtualmente**” son representativas de la acción del oleaje. En consecuencia, la utilización de estos **modelos matemáticos** generará **incertidumbres**.

Las variables de estado que determinan el oleaje son : la altura de ola significativa ( $H_{1/3}$ ), el periodo óptimo ( $T_{opt}$ ) y la dirección ( $\theta$ ) que nos definen el **estado del mar**, y la persistencia ( $N$ ) que nos determina su **duración** a lo largo del tiempo. A estas variables se agrega el **nivel del mar** ( $S = SM + SA + \dots$ ), que nos localiza la posición de la acción del oleaje sobre la obra.

Pero estas **variables exógenas, fundamentales**, no son las únicas posibles. Otras variables como la anchura del espectro ( $\epsilon$ ), que nos define la edad y constitución del oleaje, también existen y no son consideradas en esta aproximación. Evidentemente, esta **limitación** del número de variables exógenas, introduce nuevas **incertidumbres**.

Siendo el oleaje un proceso estocástico de dos componentes: uno de corto periodo, que nos determina los estados del mar, y otro de largo periodo, cuyo periodo básico es el año, en el que se suceden los estados del mar dando lugar a temporales, marejadas y calmas, su conocimiento requiere la **observación**, adecuada e ininterrumpida durante un plazo al menos de **11 años** y mejor un múltiplo de este plazo, que constituye el **hiperciclo fundamental**.

Esta observación debe realizarse en el punto de ubicación de las futuras obras, punto que no se conoce con antelación suficiente para garantizar los plazos antes mencionados. El problema así planteado fue la génesis de la **Red Exterior Española de Registro del Oleaje**, siendo aprobado nuestro proyecto por el entonces Ministerio de Obras Públicas en 1968. Sus **especificaciones** tomadas, literalmente, de Bores (1973), (1974), fueron:

1. **Ausencia de Refracción:** Todos los sensores de la Red Exterior se instalan sobre fondos superiores a los **cuarenta metros**.
2. **Ausencia del efecto de configuración del fetch:** Salvo en el caso de costas rectilíneas, como Valencia, por ejemplo, los sensores se instalan frente a cabos pronunciados –cabo Machichaco, por ejemplo–, a ser posible situados en cambios de dirección de la costa –cabo Palos, por ejemplo–.
3. **Posibilidad de interpolación lineal entre cada dos estaciones:** La distancia entre cada dos estaciones consecutivas se proyecta suficientemente pequeña para permitir la estima de las características del oleaje en cualquier punto intermedio por simple interpolación lineal entre las dos estaciones contiguas.
4. **Posibilidad de correlación entre los puntos exteriores de la RED y los correspondientes de la plataforma costera, con profundidades reducidas (en donde se realiza el estudio correspondiente).** Se prevé su estima por métodos numéricos y/o mediante la función de transferencia obtenida entre los sensores de la RED y los sensores instalados, al menos durante un año, en los puntos en estudio.

Los datos requeridos para un **diseño estructural extremal** constituyen un **estadístico de extremos anuales**, y la **Matriz Climática Extremal** correspondiente deberá formarse, al menos, con los valores de las variables fundamentales ( $H_{1/3}$ ), ( $T_{opt}$ ), ( $\theta$ ), ( $N$ ), ( $S$ ) ocurrientes durante el **máximo** de los **temporales máximos anuales** en el punto, o puntos, del **trazado** de la obra correspondientes a las secciones tipo.

En aproximaciones de mayor precisión debieran incluirse, según hemos indicado, la anchura del espectro ( $\epsilon$ ), etc.

En la Tabla 1 presentamos el clima correspondiente al diseño estructural del dique de escollera de Punta Lucero del puerto de **Bilbao**.

En este caso consideramos que la marea meteorológica, en esta costa y a esa profundidad es pequeña comparado con la marea astronómica. Por consiguiente estimamos que  $S = S_A$  y, en consecuencia, ( $S$ ) será una variable independiente del estado del mar por lo que su determinación la realizamos independientemente.

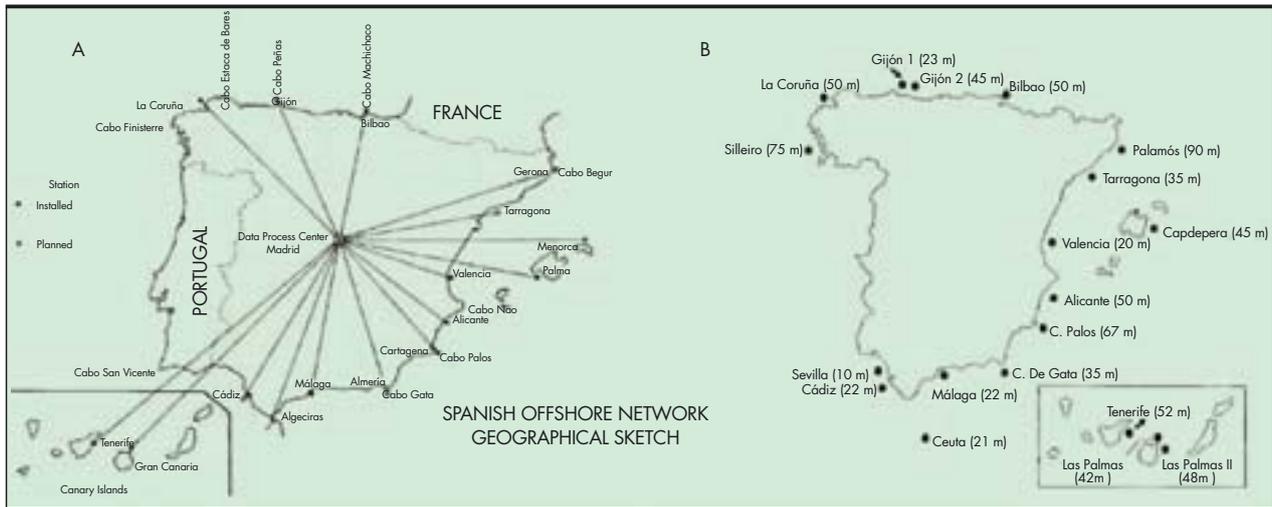


FIGURA 1. La Red Exterior Española REMRO (1968). A. Proyecto 1968. B. Situación actual.

MATRIZ CLIMÁTICA EXTREMAL (*)							
Punta Lucero – Bilbao							
Fecha	H1/3	Topt	$\theta$	N	$S_M$	$\epsilon$	–
	(m)	(sg)	(°)	(olas)	(m)		
85/86.03.24	6.92	14.79	277	563	–	–	
86/87.11.23	6.27	20.03	304	873	–	–	
87/88.02.10	6.6	18.71	304	880	–		
88/89	–	–	–	–	–		
89/90.02.12	6.77	14.97	285	980	–		
90/91.12.11	4.87	11.14	304	1792	–		
91/92.03.27	5.27	11.73	264	1049	–		
92/93.02.27	4.89	10.25	256	1445	–		
93/94.12.16	5.79	14.8	308	956	–		
94/95.03.08	5.29	15.59	315	971	–		
95/96.02.08	8.05	16.8	309	556	–		
96/97.11.20	6.89	15.65	295	572	–		
97/98.01.02	5.28	14.46	300	681	–		
98/99.12.20	5.98	12.97	301	643	–		
99/00.12.27	6.79	13.53	304	661	–		
00/01.11.06	5.97	13.48	306	1264	–		
01/02.11.09	4.61	9.84	295	2062	–		
02/03.12.02	4.98	14.22	292	973	–		

(\*) El año climático se extiende desde el **solsticio** de verano hasta el solsticio de verano del año siguiente.

TABLA 1.

Uno de los problemas más importantes de las redes de registro es la vulnerabilidad de los registradores particularmente ante los temporales. Por es motivo pueden quedar fuera de servicio durante un plazo mayor o menor perdiéndose un información de altísimo interés.

La solución más correcta desde el punto de vista de la información es la redundancia de la información, lo que puede conseguirse simplemente multiplicando el número de registradores en el punto. Pero ya que esto es insostenible por su coste puede al menos obtener la información en el mismo punto y sincrónicamente mediante registro directo y mediante previsión con métodos numéricos.

Dada la sincronía durante los tiempos de servicio los métodos de previsión podrían tararse con la mayor precisión y en caso de avería del registrador los métodos de previsión podrían proporcionar una información valiosísima y suficientemente aproximada del oleaje. Esta podría considerarse como una especificación más a las cuatro propuestas en los años setenta.

Cómo decíamos en la Revista de Obras Públicas de Noviembre 1977:

*“Ciertas variables - altura de ola, periodo, etc., - dependen de un mismo agente, y aunque para un cierto estado del proceso pueda existir independencia entre ellas, al evolucionar todas ellas con el componente de estado, de alguna forma estarán relacionadas, ligadas, entre si. En general, siendo (E) la variable representativa del estado del proceso*

$$v_i = \sigma_{v_i}(E) y_{v_i} + \mu_{v_i}(E) \quad (1)$$

*o bien, en diseños con rango extremal, si (v<sub>p</sub>) es la variable principal,*

$$v_i = \sigma_{v_i}(v_p) y_{v_i} + \mu_{v_i}(v_p) \quad (2)$$

*siendo (μ) el valor medio de la distribución, (σ) la desviación estándar e (y) la variable unitaria.*

*Tanto σ<sub>v<sub>i</sub></sub>(v<sub>p</sub>) como μ<sub>v<sub>i</sub></sub>(v<sub>p</sub>) pueden ser funciones lineales, polinómicas, trascendentes, etc., correladas con la variable principal (v<sub>p</sub>) y, sólo en caso de independencia, constantes.*

Ya que consideramos que la variable principal es representativa del estado del mar, en el caso de **rango de diseño extremal**, sólo la variable principal sigue una distribución extremal, (Gumbel), mientras que el resto de las variables, correladas con ésta, siguen distribuciones medias (Gauss).

Admitiendo, entonces, una aproximación lineal,

$$\begin{aligned} \sigma(H_{1/3}) &= \sigma \\ \mu(H_{1/3}) &= b H_{1/3} + c \end{aligned}$$

las variables fundamentales, deducidas de la Matriz Climática Extremal correspondientes al Dique de Punto Lucero, Bilbao, vienen dadas por:

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= 0.888 y & + & 5.494 \text{ Gumbel} \\ T_{opt} &= 2.197 y + 1.789 & H_{1/3} & + 3.639 \text{ Gauss} \\ \theta &= 16.24 y + 3.948 & H_{1/3} & + 271.7 \text{ Gauss} \\ N_{1/3} &= 431.2 y & + & 995.4 \text{ Gauss} \\ S &= 0.402 y & + & 2.5 \text{ Gauss (*)} \end{aligned}$$

en donde (y) es la variable unitaria que relaciona las variables fundamentales (H<sub>1/3</sub>, etc.) con la distribución de probabilidad correspondiente : Gumbel, Gauss, etc.

(\*) Pendiente de un mejor ajuste.

Desde un punto de vista estrictamente matemático, cualquier otra distribución, Weibul, etc., puede ser utilizada. No-

sotros utilizamos la distribución Gauss porque es la que siguen los procesos y fenómenos naturales, cuando el número de elementos es suficiente, y la distribución de Gumbel porque es, precisamente, la asíntota de las distribuciones de tipo exponencial, como es la de Gauss.

Por otra parte además de la correlación “simple”, con una sola variable, la principal, caben estimas de la distribución multivariada de probabilidad mas “complejas”, con dos y mas variables de correlación.

## 2. COMPORTAMIENTO RESISTENTE DE LAS OBRAS MARÍTIMAS. DOMINIO DE FALLO

Las diversas partes de las obras –por ejemplo, espaldón, manto principal, bermas, etc., en el caso de los diques de escollera,– así como la obra completa, como un conjunto, pueden fallar de diferentes maneras, con distintos **modos de fallo**, que dependen de muy variados factores y producen distintos efectos: Ruina de la obra, agitación en las dársenas, etc. Algunos de los modos de fallo de los componentes de las obras pueden ser **excluyentes**, como por ejemplo fallo al **vuelco** y al **deslizamiento** de los espaldones y del cuerpo de los diques verticales.

Agrupamos en **clases** a todos aquellos **modos de fallo**, (**homogéneos**), que producen los mismos efectos. No deberían combinarse fiabilidades de distintas **clases** de fallo: Por ejemplo la extracción de cantos del manto (Fallo Estructural), con el rebase del dique (Fallo Funcional).

Las diferentes **clases** pueden, a su vez, dividirse en **subclases** de fallo, según los diferentes enfoques –estático, mecánico, químico, etc.– de cómo se origina el fallo. En la **clase estructural** distinguimos: fallo de **estabilidad**, fallo **mecánico** y fallo **material**.

Las obras puede considerarse cómo **compuestas** cuando están formadas por partes (**elementos**) que se repiten pretendidamente iguales, sólo diferenciadas por la incertidumbres propias de su **construcción**. Son obras **singulares** en caso contrario. Son ejemplos de obras **compuestas** las obras **lineales**, como los diques y pantalanés, y de obras **singulares** las plataformas de perforación petrolífera y los duques de Alba.

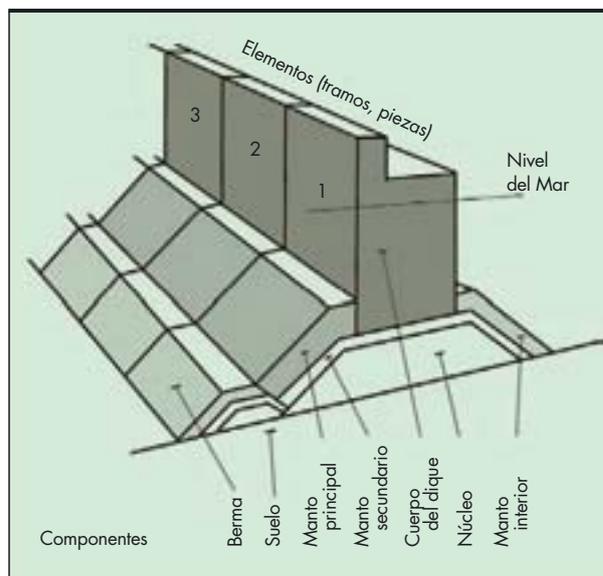


FIGURA 2. Esquema estructural de los diques, verticales y de escollera.

En las **obras compuestas** cabe entonces distinguir entre **fallo elemental**, cuando el fallo afecta a un **sólo elemento**, o **integral** cuando afecta a **todos, desde un punto de vista estadístico basta con “todos” se refiera a la mitad**. En el caso de las **obras singulares** sólo cabe la alternativa de **fallo integral**.

Salvo en el caso de resonancia, que se procura evitar, el fallo de los **componentes** se produce según dos **alternativas**: de forma **gradual**, con una fase de averías crecientes (por la acción de varias olas grandes, superiores a un cierto **umbral**, que he hemos denominado **olas activas**, Bores (1968)) o de forma **instantánea** (por la acción de una sola ola, la mayor del temporal máximo anual, del año pésimo durante el periodo de retorno previsto para la obra). Las **averías**, el **daño**, del componente pueden ser **inicial, parcial o total**, con fallo gradual, o sólo **total** con fallo instantáneo.

Para resistir la acción de los agentes exteriores ó exógenos, definidos por sus correspondientes variables, cada componente de las obras viene determinado por los valores de sus variables endógenas, peso de los cantos, talud del dique, etc. En principio, todas estas variables, exógenas y endógenas, pueden ser: **Libres**, dependiendo, únicamente, del azar, como las variables climáticas, el encaje de los cantos, etc.; **fijas**, impuestas por **decisiones de rango superior** (análisis funcional, trazado, etc.); y de **diseño**, que siguiendo patrones sancionados por la experiencia, la economía, etc., se establecen cómo **estándares** y simplifican el proceso de dimensionamiento de las obras: espesor de los mantos, etc.

Cuando la desviación estándar ( $\sigma$ ) de alguna variable endógena, ó exógena, es muy pequeña, comparada con su correspondiente valor medio ( $\mu$ ), tal cómo sucede con el peso de los bloques artificiales ( $W_b$ ), esta variable puede considerarse cómo **determinista**, quedando entonces determinada esta variable por un sólo número ( $\mu$ ), Bores (1980) (1982), constante, ( $W_b = \mu_b$ ), en lugar de tres ( $\sigma, \mu, p$ ), o mas, cómo ocurre con las variables **aleatorias**, por ejemplo ( $H_{1/3} = \sigma$  y  $\mu$ ).

Muy distinto es el caso de la variable ( $\cot\alpha$ ), cuya dispersión afecta no sólo al ángulo del talud ( $\alpha$ ) sino a la propia construcción del dique, ya que, por estar colocados los cantos al azar, tanto su orientación como su encaje y el espesor de los mantos ofrecen una gran variedad, tanto a lo largo como a lo ancho del manto.

La **construcción del modelo físico** introduce, pues, nuevas **incertidumbres**, físicas, que se agregan a las anteriormente señaladas. Estas incertidumbres son mayores en el **prototipo**, en la naturaleza, que en el modelo.

En la Revista de Obras Públicas de Noviembre 1977, decíamos:

*“Las variables exógenas de las acciones, sobrecargas, solicitaciones, etc. de los agentes climáticos, geodinámicos, etc. pueden ser relacionados en cada análisis aleatorio multivariado con las variables endógenas, estructurales, funcionales, etc. por medio de un modelo –matemático, físico, etc.– definido por la función:*

$$\kappa(v_1, \dots, v_j, \dots) = 0 \quad (8)$$

*que caracteriza las condiciones críticas de fallo y sirve de límite de integración de:*

$$p = \int_{\kappa} f(v_1, \dots, v_j, \dots) dg(v_1) \dots dg(v_j) \dots \quad (9)$$

*(integral de Lebesgue–Stieltjes) que representa la probabilidad multivariada de fallo al nivel de riesgo (de averías) que se considere.”*

En el caso de los diques de escollera, el **límite de integración**, ( $\kappa = 0$ ) viene dado por la hipersuperficie característica

$$\kappa(H_{1/3}, T_{opt}, \theta, N, S_M, S_A, \dots; \cot\alpha, W_b, \gamma_b, \gamma_a) = 0 \quad (8)_a$$

en donde  $W_b$  representa el peso de los bloques, y considerando la variable:

$$S = S_M + S_A + \dots$$

como compuesta y las variables ( $W_b$ ), ( $\gamma_b$ ), ( $\gamma_a$ ), como deterministas, toma la forma:

$$\kappa(H_{1/3}, T_{opt}, \theta, N, S; \cot\alpha) = 0 \quad (8)_b$$

que es un **funcional**, que por afectar a un problema físico, en donde la experimentación es habitual, tiene una fácil, aunque algo laboriosa, solución.

Para simular la acción del oleaje en condiciones tales como ocurren en la naturaleza, los **ensayos** se realizaron fijando un **estado** ( $H_{1/3}, T_{opt}, \theta$ ) y un **nivel del mar**, ( $S$ ), constantes. En esta situación, en cada ensayo ( $e_1$ ), se mantuvo el ataque de forma continua, chequeando el crecimiento de la avería en función del número de olas ( $N$ ).

Como consecuencia de las **incertidumbres** originadas tanto por el **modelo matemático** como por el **modelo físico**, etc., según ya hemos indicado, si realizamos un segundo ensayo idéntico al anterior ( $e_2$ ), con el mismo **estado**, ( $H_{1/3}, T_{opt}, \theta$ ), y con el mismo **nivel**, ( $S$ ), **del mar**, las **averías** del componente en función de ( $N$ ) son distintas, evolucionan de forma diferente. Lo mismo ocurre en los sucesivos ensayos ( $e_j$ ) iguales y posteriores. También lo mismo ocurre y en mayor medida, en la naturaleza.

Con los resultados obtenidos con los sucesivos ensayos ( $e_j$ ) en condiciones idénticas, que constituyen un **experimento** ( $\epsilon$ ), determinamos los valores medios, ( $\mu(\epsilon=1)$ ), y las desviaciones estándar, ( $\sigma(\epsilon=1)$ ), para el punto de chequeo de las averías. Con estos valores determinamos las curvas de averías correspondientes a cada nivel de certidumbre de este experimento, y así sucesivamente, Bores (1979)<sub>b</sub>, Figura 3.

Con los puntos así obtenidos con los diferentes **experimentos** se determinan las **trazas** de las diversas hipersuperficies de fallo ( $\kappa = 0$ ), sobre el plano [ $H_{1/3}, N$ ].

En la Figura 4 se muestran estas **trazas**, para los porcentajes de avería del (3%) y (100%) al nivel de certidumbre ( $p = 0.5$ ), Bores (1979)<sub>b</sub>.

### 3. PROBABILIDAD DE FALLO DEL COMPONENTE. MÉTODOS DE INTEGRACIÓN

Existen diversos métodos de integración de la expresión (9) una vez conocido, por vía **analítica** o **experimental**, el límite de integración ( $\kappa = 0$ ).

#### 3.1. MÉTODO DIRECTO

Conocidas las hipersuperficies ( $\kappa = 0$ ), que nos definen el límite del **dominio de fallo** para cada porcentaje de averías ( $d$ ) y cada nivel de certidumbre ( $c$ ), directamente podemos determinar si los puntos correspondientes a la **matriz climática extremal**, se encuentran en este dominio de fallo o no, y, en consecuencia, obtener directamente la probabilidad de fallo del componente mediante la conocida **ecuación fundamental de la probabilidad**.

$$\text{probabilidad de fallo} = \frac{\text{número de puntos en el dominio de fallo}}{\text{número total de puntos}}$$

En diseños **estructurales**, que han de tener una vida de servicio del orden de 50 años y una fiabilidad admisible sensi-

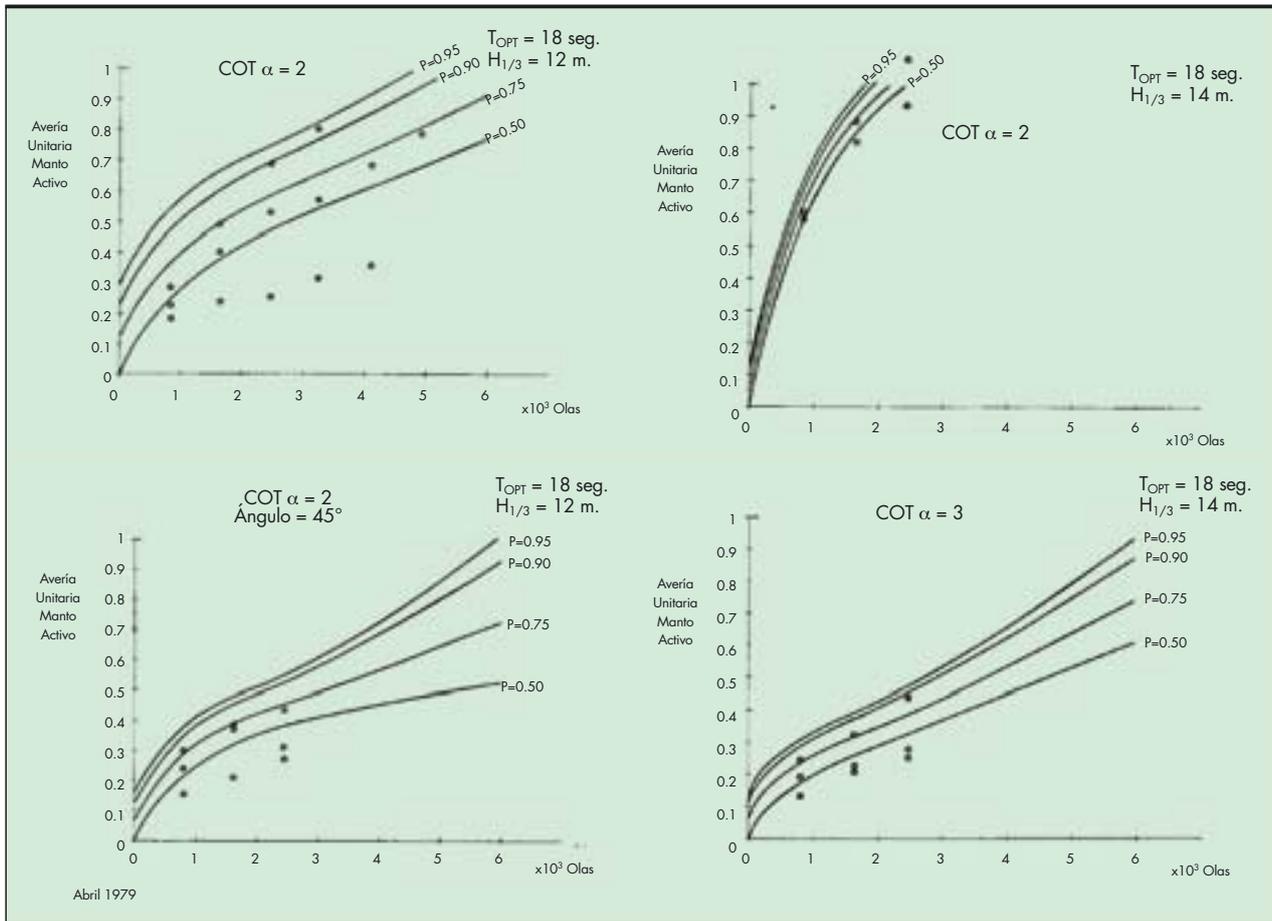


FIGURA 3.

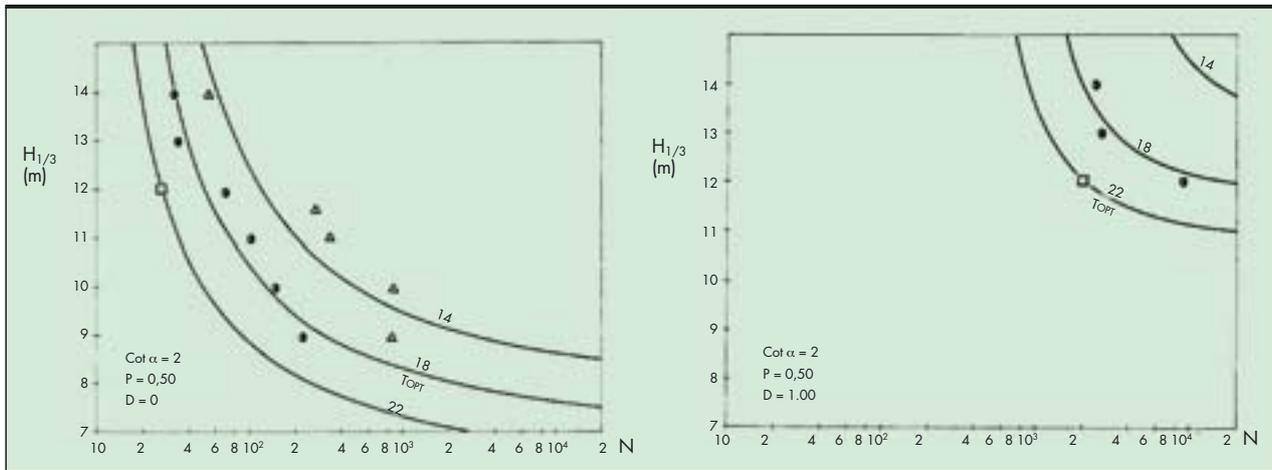


FIGURA 4.

blemente superior a 0.5, lo que equivale a periodos de retorno superiores a los cien ó más años, resulta que las series temporales de registro son muy cortas y el número de observaciones en el dominio de fallo cero, sin que esto pueda inducir a que la probabilidad de fallo sea cero. Con clases de fallo funcionales,

ambientales, etc., en las que el número de observaciones puede ser muy numeroso, muchas de estas observaciones se encontrarán dentro del dominio de fallo y cabe entonces la aplicación directa de la **ecuación fundamental de la probabilidad**.

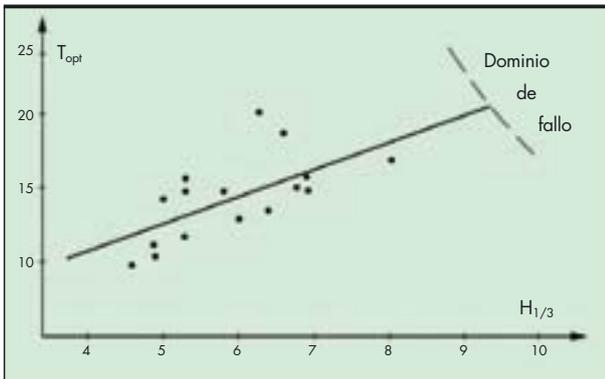


FIGURA 5. Aplicación del Método Directo con dos variables. Datos del dique de Punta Lucero, Bilbao.

Cuando no disponemos de información suficiente para aplicar el Método Directo es necesario:

- a) Conocer por vía analítica u otros procedimientos la función multivariada de densidad de probabilidad,  $f()$ , de la integral (9), o bien
- b) Estimar la función multivariada de densidad de probabilidad,  $f()$ , haciendo recurso de las distribuciones de las variables fundamentales exógenas ( $H_{1/3}$ ), ( $T_{opt}$ ), ( $\theta$ ), ( $N$ ), ( $S$ ), para lo cual nos vemos obligados discretizar el espacio de probabilidad y esta función  $f()$ .

3.2. MÉTODO MATRICIAL

Denominamos **métodos matriciales**, precisamente, a esta segunda alternativa b) que acabamos de enunciar, en la que

la transformamos en discretos de los hiperespacios continuos, **físico**, de **fallo**, y **estadístico**, de **probabilidad**, determinados ambos por las variables aleatorias continuas ( $H_{1/3}$ ), ( $T_{opt}$ ), ( $\theta$ ), ( $N$ ), ( $S$ ).

La discretización de estos hiperespacios continuos, se realiza mediante una partición en celdas, cuyos centros de gravedad corresponden a los puntos que definen el hiperespacio discreto, y a los que asignamos la totalidad de la probabilidad existente en la celda correspondiente. La suma total de las probabilidades de las celdas extendida a todo el hiperespacio debe ser a igual a la unidad, que es la **condición universal de las distribuciones de probabilidad**, uni o multivariadas, continuas o discretas.

El **fallo**, o no, de la celda se decide en razón de si el centro de gravedad de ésta se encuentra, o no, dentro del dominio de fallo, cuyo **límite** (hipersuperficie  $\kappa = 0$ ) para cualquier **porcentaje de avería** y **cualquier nivel de certidumbre** suponemos conocido.

La probabilidad de fallo se deduce, en este caso, simplemente, de la suma de los términos de la matriz de probabilidad de fallo, resultante de la **intersección** de las **matrices** de probabilidad y de dominio de fallo.

$$p = \sum (\text{matriz de fallo} \cap \text{matriz de probabilidad})$$

Como el método directo, el **método matricial** permite la visualización numérica de los espacios **físico**, de **probabilidad** y de **probabilidad de fallo**.

Presentamos a continuación un ejemplo bivariado, con las variables aleatorias ( $H_{1/3}$ ) y ( $T_{opt}$ ), estimadas con datos tomados del dique de Punta Lucero, Bilbao, que estamos siguiendo, y, que recordamos, son:

$$H_{1/3} = 0.888 y + 5.494 \text{ Gumbel}$$

$$T_{opt} = 2.197 y + 1.789H_{1/3} + 3.639 \text{ Gauss}$$

Matriz de la ESTIMA DE LA DISTRIBUCIÓN BIVARIADA DE PROBABILIDAD						
$T_{opt}$ (sg)	2	4	6	8	10	12 $H_{1/3}$
27	0	0	0	0	0.0003303	0.0004511
25	0	0	0	0.0004196	0.001872	0.0006368
23	0	0	0.000166	0.004415	0.00487	0.0004146
21	0	0	0.003257	0.02123	0.00584	0.0001243
19	0	0	0.02904	0.04689	0.00323	0
17	0	0.001467	0.1185	0.04777	0.0008219	0
15	0	0.01108	0.2223	0.02244	0	0
13	0	0.03837	0.1923	0.004844	0	0
11	0	0.06114	0.07672	0.000478	0	0
9	0	0.04495	0.01405	0	0	0
7	0	0.01522	0.001174	0	0	0
5	0	0.002364	0	0	0	0

TABLA 2.

Matriz del DOMINIO DE FALLO						
Topt (sg)	2	4	6	8	10	12 H <sub>1/3</sub>
27	0	0	0	1	1	1
25	0	0	0	0	1	1
23	0	0	0	0	1	1
21	0	0	0	0	1	1
19	0	0	0	0	1	1
17	0	0	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	1
13	0	0	0	0	0	1
11	0	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

TABLA 3.

Matriz del DOMINIO DE FALLO						
Topt (sg)	2	4	6	8	10	12 H <sub>1/3</sub>
27	0	0	0	0	0.0003303	0.0004511
25	0	0	0	0	0.001872	0.0006368
23	0	0	0	0	0.00487	0.0004146
21	0	0	0	0	0.00584	0.0001243
19	0	0	0	0	0.00323	0
17	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

TABLA 4.

Probabilidad de fallo =  $p = \sum$  (matriz de probabilidad de fallo) = 0.01779

Fiabilidad de fallo =  $\phi = (1 - p)^{\text{Vida previsible}} = 0.4076$

Con particiones en celdas de menor tamaño se obtiene mayor aproximación, pero se complica rápidamente la visualización de las matrices al aumentar el rango y el número de dimensiones.

### 3.3. MÉTODO GENERAL DE INTEGRACIÓN

Cuando el número de variables considerado es grande, como es el caso que nos ocupa, el cálculo matricial exige una potencia de cálculo desmesurado, si tenemos en cuenta que el número de variables fundamentales difícilmente puede reducirse por debajo de seis. El **método de integración numérica**, por ser iterativo, Bores (1977), mantiene siempre

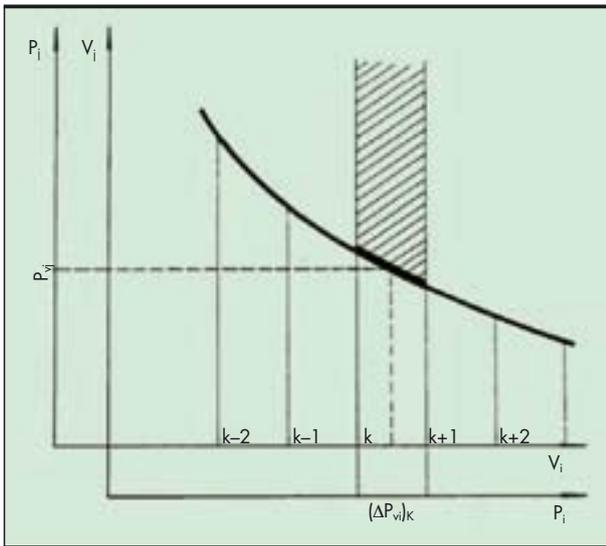


FIGURA 6. Probabilidad de fallo del intervalo diferencial (k) en el plano  $[v_i, v_j]$ . Figura tomada de Bores (1980).

el proceso de integración numérica en términos lineales y permite, así, resolver el problema, sean cuales sean, las dimensiones del espacio, el número de variables aleatorias, con un ordenador mínimo (en Bilbao utilizamos un IBM 5100).

La probabilidad de fallo para el caso de dos variables  $H_{1/3}$  y  $T_{opt}$ , puede ser expresada entonces en la forma:

$$p = \sum_{k=2}^n f(T_{opt}(H_{1/3}) \geq \kappa)_k \Delta p(H_{1/3})_k \quad (9_2)$$

y para tres variables

$$p = \sum_k \sum_j \{f(T_{opt}(H_{1/3}) \geq \kappa)_j \Delta p(N(H_{1/3}))_j\}_k \Delta p(H_{1/3})_k \quad (9_3)$$

que corresponden, en dos y tres dimensiones a la integral de Lebesgue-Stieltjes, (9).

La extensión a más de tres variables aleatorias, a más tres dimensiones, es inmediata.

#### 4. ESTIMA DE PROBABILIDAD DE FALLO DE LAS BERMAS

Conocidas la probabilidad de fallo del manto principal en superficie podemos estimar la fiabilidad de los cantos del manto a cualquier profundidad mediante sencillas consideraciones físico-matemáticas.

Para ello seguimos literalmente, salvo correcciones de estilo y reducciones de texto, el Report sobre Diques de escollera presentado por nosotros a la Comisión Internacional del P.I.A.N.C. en Enero de 1973, Haslemere (Inglaterra), y que ha servido como Apuntes de Diques en la Escuela desde 1979, Bores (1979)<sub>b</sub>. Se mantiene la numeración original de 1973, agregándose subíndices a las fórmulas agregadas ó modificadas.

##### 4.1. CONSIDERACIONES FÍSICO-MATEMÁTICAS SOBRE ESTABILIDAD DEL MANTO

Haciendo recurso del teorema de Barillon consideramos el equilibrio de los cantos admitiendo que durante el ascenso del fluido por un lecho granular (talud) la circulación se establece hacia arriba y hacia el interior del manto y hacia abajo y el exterior durante el descenso. Esto nos permite presentar el análisis en forma directamente relacionable con el equilibrio de fuerzas clásico. Figura 7.

Denominando (T) y (N) a las proyecciones del peso sumergido, ( $P_s$ ), ( $F_T$ ) y ( $F_N$ ) a las proyecciones de las fuerzas hidrodinámicas, ( $l_T$ ) y ( $l_N$ ) a los brazos de palanca según la tangente y la normal respectivamente e ( $\Delta l$ ) a la proyección de la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza (F) y el del peso ( $P_s$ ), después de trasladar la fuerza (F) al centro de gravedad del canto tenemos:

Equilibrio hacia arriba:

$$(F_T - T) l_T + F \Delta l = (N + F_N) l_N \quad (1)$$

o bien:

$$(F_T - T) = \frac{l_N}{l_T} (N + F_N) - \frac{\Delta l}{l_T} F \quad (2)$$

Equilibrio hacia abajo:

$$(F_T + T) l_T + F \Delta l = (N - F_N) l_N \quad (3)$$

o bien:

$$(F_T + T) = \frac{l_N}{l_T} (N - F_N) - \frac{\Delta l}{l_T} F \quad (4)$$

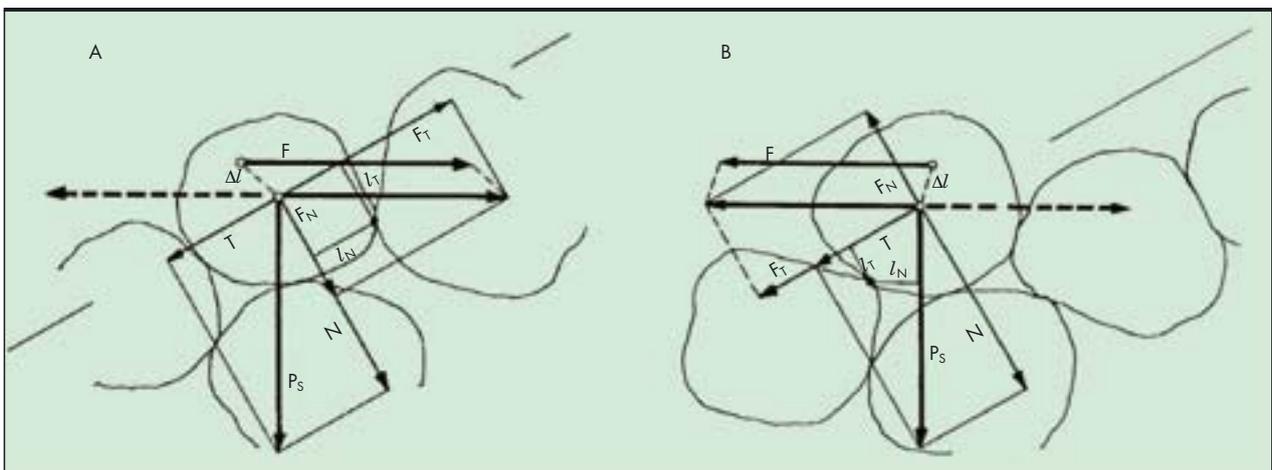


FIGURA 7. A. Equilibrio hacia arriba. B. Equilibrio hacia abajo

Ambas expresiones pueden ser escritas en la forma general:

$$F_T - 7T = f_{NT} (N \pm F_N) - \Delta f \cdot F \quad (5)$$

en donde:

$$T = PS \sin \alpha \quad (6)$$

$$N = PS \cos \alpha \quad (7)$$

$$F_T = PS \cos \beta \quad (8)$$

$$F_N = PS \sin \beta \quad (9)$$

siendo ( $\alpha$ ) el ángulo del talud del manto principal y ( $\beta$ ) el formado por las fuerzas hidrodinámicas con el talud.

Eliminando ahora las fuerzas ( $T$ ), ( $N$ ), ( $F_T$ ) y ( $F_N$ ) entre las expresiones (5), (6), (7), (8), (9) y ordenando resulta inmediatamente:

$$\frac{P_s}{F} = \frac{\cos \beta - 7 \operatorname{fsen} \beta - \Delta f}{f \cos \alpha \pm \operatorname{sen} \alpha} \quad (10)$$

Las fuerzas hidrodinámicas, ( $F$ ), originadas por la circulación de un fluido sobre un sólido **aislado y cerca del contorno** viene dadas por la suma de los efectos de forma, rozamiento superficial, inerciales y de sustentación. Los tres primeros tienen la dirección y sentido de la tangente de la trayectoria del fluido, mientras que el cuarto, el efecto de sustentación, es normal a ella y dirigido en el sentido de separación del canto del contorno. Por otra parte los dos primeros suelen englobarse en un solo término, particularmente cuando el régimen es turbulento, como es, sin duda, el caso que nos ocupa.

Admitiendo entonces que para el canto situado en la capa superior del conjunto granular sea aplicable una formulación de la misma estructura que para el sólido aislado, aunque cambiando, lógicamente, los coeficientes, y siendo ( $\delta$ ) el ángulo existente entre las líneas de corriente y la fuerza ( $F$ ), en el punto de aplicación de ésta, podemos escribir -véase, por ejemplo, Bores (1968)-.

$$F \cos \delta = \frac{1}{2} \rho C_D S u^2 + \rho C_M \nabla \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (11)$$

y

$$F \sin \delta = \frac{1}{2} \rho C_L S u^2 \quad (12)$$

en donde:

- S es la superficie del canto opuesta al movimiento.
- $\nabla$  es el desplazamiento, volumen sumergido del canto.
- $\rho$  es la densidad del fluido, y
- $C_D, C_M, C_L$ , son los coeficientes de arrastre, inercial y de sustentación,

Elevando al cuadrado las expresiones (11) y (12) y sumando y extrayendo la raíz cuadrada se obtiene:

$$F = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \rho C_D S u^2 + \rho C_M \nabla \frac{\partial u}{\partial \tau}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \rho C_L S u^2\right)^2} \quad (13)$$

o bien:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D S u^2 \left( \left( 1 + \frac{\rho C_M \nabla \frac{\partial u}{\partial \tau}}{\frac{1}{2} \rho C_D S u^2} \right)^2 + \left( \frac{C_L}{C_D} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

y eliminando ( $F$ ) y el peso sumergido, ( $PS$ ),

$$P_s = \nabla (\gamma_c - \gamma_a) \quad (16)$$

entre las expresiones (10), (14) y (16) y simplificando se obtiene:

$$\frac{\nabla}{S} = C_D \left( \left( 1 + \frac{\rho C_M \nabla \frac{\partial u}{\partial \tau}}{\frac{1}{2} \rho C_D S u^2} \right)^2 + \left( \frac{C_L}{C_D} \right)^2 \right)^{1/2} \frac{\gamma_a \cos \beta - 7 \operatorname{fsen} \beta - \Delta f}{\gamma_c - \gamma_a} \frac{u^2}{2g} \quad (17)$$

Ahora bien, tanto la superficie, ( $S$ ), del canto como su volumen ó desplazamiento, ( $\nabla$ ), pueden ser expresados en función de una longitud característica ( $l$ ), en la forma:

$$S = k_S l^2 \quad (18) \quad ; \quad \nabla = k_V l^3 \quad (19)$$

en donde ( $k_S$ ) y ( $k_V$ ) son unos coeficientes, superficial y volumétrico respectivamente.

Sustituyendo entonces ( $S$ ) y ( $\nabla$ ) en la expresión (17) se deduce:

$$l = \frac{C_D k_S}{k_V} \left( \left( 1 + \frac{\rho C_M \nabla \frac{\partial u}{\partial \tau}}{\frac{1}{2} \rho C_D S u^2} \right)^2 + \left( \frac{C_L}{C_D} \right)^2 \right)^{1/2} \frac{\gamma_a \cos \beta - 7 \operatorname{fsen} \beta - \Delta f}{\gamma_c - \gamma_a} \frac{u^2}{2g} \quad (20)$$

y recordando (19):

$$P = \gamma_c \nabla = \gamma_c k_V l^3 \quad (21)$$

resulta finalmente:

$$P = \gamma_c k_V \left( \frac{C_D k_S}{k_V} \right)^3 \left( \left( 1 + \frac{\rho C_M \nabla \frac{\partial u}{\partial \tau}}{\frac{1}{2} \rho C_D S u^2} \right)^2 + \left( \frac{C_L}{C_D} \right)^2 \right)^{3/2} \left( \frac{\gamma_a \cos \beta - 7 \operatorname{fsen} \beta - \Delta f}{\gamma_c - \gamma_a} \right)^3 \left( \frac{u^2}{2g} \right)^3 \quad (22)$$

que es la expresión general del **equilibrio estático** de los cantos de un lecho inclinado y desprovisto de cohesión para una corriente cualquiera y que constituye la generalización de la fórmula de isbach.

#### DIQUES DE ESCOLLERA ROMPEOLAS

En el caso en que el movimiento del fluido esté originado por el un tren de ondas, la expresión (22) puede transformarse de acuerdo con las leyes del movimiento ondulatorio en formas aptas para las aplicaciones prácticas en la Técnica Marítima.

En efecto sobre el manto de los diques de escollera rompeolas la onda rompe total o parcialmente por efecto de la rápida disminución de profundidad y cuando adquiere su máxima velocidad, tanto en la fase de ascenso como en de descenso podemos admitir que la velocidad de la vena líquida es quasi permanente, evolucionando de manera relativamente lenta por efecto gravitatorios y de rozamiento con y a través de los mantos, particularmente del principal. Como primera estima podemos considerar entonces, en este caso, la aplicabilidad de la expresión (22)<sub>a</sub>.

La expresión de la velocidad máxima horizontal ( $u$ ) puede ser escrita, de acuerdo con la teoría lineal de las ondas, Airy (1848),

$$u = 2\pi r / T \quad (37)$$

en donde:

$$r = \frac{H}{2} \frac{\operatorname{Ch} 2\pi \frac{d-z}{L}}{\operatorname{Sh} 2\pi \frac{d}{L}} \quad (38)$$

y:

$$T^2 = \frac{2\pi}{g} L \operatorname{Cth} \frac{2\pi d}{L} \quad (39)$$

Eliminando entonces (r) y (T) entre las expresiones (37), (38) y (39) y simplificando se obtiene:

$$\frac{u^2}{2g} = \frac{\pi H^2}{2} \frac{Ch^2 2\pi \frac{d-z}{L}}{Sh4\pi \frac{d}{L}} Cth \frac{2\pi d}{L} \quad (40)$$

y eliminando  $u^2/2g$  entre (22)a y (40) resulta finalmente:

$$P = \gamma_c k_v \left( \frac{C_D k_S}{k_v} \right)^3 \left( 1 + \left( \frac{C_L}{C_D} \right)^2 \right)^{3/2} \left( \frac{\gamma_a}{\gamma_c - \gamma_a} \frac{\cos \beta}{f \cos \alpha \pm \sin \alpha} \frac{7 f \sin \beta - \Delta f}{\cos \alpha \pm \sin \alpha} \right)^3 \left( \frac{\pi H^2}{2} \frac{Ch^2 2\pi \frac{d-z}{L}}{Sh4\pi \frac{d}{L}} Cth \frac{2\pi d}{L} \right)^3 \quad (42)_a$$

que constituye una primera estima de la expresión general del equilibrio estático de un dique rompeolas a la acción de una onda monocromática.

Para una determinada forma de los cantos, en la expresión hacemos el cambio de variable:

$$C_\Phi = k_v \left( \frac{C_D k_S}{k_v} \right)^3 \left( 1 + \left( \frac{C_L}{C_D} \right)^2 \right)^{3/2} (\cos \beta \frac{7 f \sin \beta - \Delta f}{\cos \alpha \pm \sin \alpha})^3$$

cuya desviación estándar, etc. reflejarán las incertidumbres generadas por los parámetros:

$$(C_D), (C_L), (k_v), (k_S), (f), (\beta), (\Delta f)$$

y por la propia precisión del modelo fisicomatemático utilizado. Con este cambio la expresión (42)<sub>a</sub> puede escribirse en la forma abreviada:

$$P = \gamma_c C_\Phi \left( \frac{\gamma_a}{\gamma_c - \gamma_a} \frac{1}{f \cos \alpha \pm \sin \alpha} \right)^3 \left( \frac{\pi H^2}{2} \frac{Ch^2 2\pi \frac{d-z}{L}}{Sh4\pi \frac{d}{L}} Cth \frac{2\pi d}{L} \right)^3 \quad (42)_z$$

Para cada una de las (N) ondas de un tren de características (H, T,  $\theta$ ) actuando sobre un dique situado sobre un fondo de profundidad (d), el peso de los cantos dependerá, desde superficie al fondo, de la profundidad (z) del punto en consideración y de las características particulares del dique a esa profundidad ( $\alpha, C_\Phi, f, \gamma_{c(z)}$ ).

En superficie ( $z = d$ ) y  $Ch2\pi((d-z)/L) = 1$ , en consecuencia podemos escribir la expresión (42)<sub>z</sub>

$$P_{z=d} = \gamma_c C_\Phi \left( \frac{\gamma_a}{\gamma_c - \gamma_a} \frac{1}{f \cos \alpha \pm \sin \alpha} \right)^3 \left( \frac{\pi H^2}{2} \frac{1}{Sh4\pi \frac{d}{L}} Cth \frac{2\pi d}{L} \right)^3 \quad (42)_{z=d}$$

con lo cual, dividiendo ambas expresiones (42)<sub>z</sub> y (42)<sub>z=d</sub>, se obtiene:

$$\frac{P}{P_{z=d}} = \frac{\left( \gamma_c C_\Phi \left[ \frac{\gamma_a}{\gamma_c - \gamma_a} \frac{1}{f \cos \alpha \pm \sin \alpha} \right]^3 \right)_z}{\left( \gamma_c C_\Phi \left[ \frac{\gamma_a}{\gamma_c - \gamma_a} \frac{1}{f \cos \alpha \pm \sin \alpha} \right]^3 \right)_{z=d}} \left( Ch^2 2\pi \frac{d-z}{L} \right)^3 \quad (42)_f$$

en donde los subíndices indican las características de los parámetros del manto particularizados en superficie, ( $z = d$ ), y en el nivel (z) en cuestión.

Evidentemente esta expresión, (42)<sub>f</sub>, nos permite, así, analizar el comportamiento del manto a las distintas profundidades, considerando todas las variaciones posibles de manto : talud, forma, peso específico, etc. de los cantos ocurrentes a ese nivel (z).

Dicho en otras palabras, la expresión, (42)<sub>f</sub>, representa la **función de transferencia** del efecto de **cada una de las ondas particulares**, teóricamente todas iguales, sobre la estabilidad **media** de los cantos del manto principal, desde la superficie al nivel (z).

Conocido el comportamiento del manto en superficie, la expresión (42)<sub>f</sub> puede considerarse como una primera estima de la expresión general del equilibrio estático de los distintos niveles de los dique rompeolas a la acción de una onda monocromática, en relación con el equilibrio en superficie.

#### 4.2. ESTIMA DE DIMENSIONAMIENTO DE LAS BERMAS CON OLAJE REAL

Ya que los resultados del apartado anteriores se refieren específicamente a cada **onda** monocromática de características (H, T,  $\theta$ ), actuando a la profundidad (z), sobre un dique situado sobre un fondo de profundidad (d), si esta **onda** es **activa** y se cumple la “función de transferencia”, con los parámetros ( $C_\Phi$ ) al nivel de certidumbre correspondiente, **el dique se averiará en cualquier punto (z), desde la superficie al fondo, con igual probabilidad de fallo.**

En forma similar sometido el dique a un oleaje con estado del mar permanente, el abordaje de una **ola activa** de características ( $H_i, T_i, \theta_i$ ), averiará el manto principal en superficie y/o a la profundidad (z), con igual probabilidad de fallo si se verifica la función de transferencia.

La ola siguiente, de características ( $H_{i+1}, T_{i+1}, \theta_{i+1}$ ), puede ser mayor o menor, ser activa o no, averiando o no el manto a cualquier profundidad y lo mismo sucederá con todas las olas siguientes.

Ya que la secuencia de presentación de las alturas de ola es totalmente aleatoria el grado de avería originado por un estado del mar con una persistencia de (compuesto por) (N) olas deberá referirse, dada la aleatoriedad del oleaje y de los factores antes indicados, a los valores medios, definidos por las variables características ( $H_{1/3}, T_{opt}$ , etc.). De esta manera podemos ajustar el valor del parámetro ( $C_\Phi$ ) –y en su caso del parámetro (f)– con la dispersión generada por las diversas incertidumbres introducidas: ya mencionadas en el caso de las ondas monocromáticas, a las que se agregan, en su caso, las debidas a la aleatoriedad del oleaje.

Precisamente esta variabilidad entre las sucesivas olas (i), (i+1), que no existe en el caso de las ondas, en la consideración de las ondas (olas) **activas** no parece, al menos teóricamente, afectar a la función de transferencia, pues esta se refiere a las características de cada una de las ondas (olas).

La función de transferencia nos permite, así, “trasladar” todos los resultados de la experimentación realizada en superficie para el manto principal, incluidos todos efectos sinérgicos de las variables (incluidos peralte, grouping, etc.) a cualquier profundidad ( $z < d$ ).

$$\frac{P}{P_{z=d}} = \frac{\left( \gamma_c C_\Phi \left[ \frac{\gamma_a}{\gamma_c - \gamma_a} \frac{1}{f \cos \alpha \pm \sin \alpha} \right]^3 \right)_z}{\left( \gamma_c C_\Phi \left[ \frac{\gamma_a}{\gamma_c - \gamma_a} \frac{1}{f \cos \alpha \pm \sin \alpha} \right]^3 \right)_{z=d}} \left( Ch^2 2\pi \frac{d-z}{L} \right)^3 \quad (42)_f$$

con:

- f = 2,38 para escolleras naturales de esfericidad media.
- f = 2,84 para bloques paralelepípedicos 2:2:3.

### 5. FIABILIDAD DE DISEÑO ADMISIBLE PARA LA OBRA

Conocida la fiabilidad del sistema, de la obra, ineludiblemente se nos plantea una cuestión fundamental: ¿Es **alta** o **baja** la **fiabilidad** obtenida para el dique, para el **sistema**?, ya que en términos de probabilidad la **seguridad absoluta** es una **utopía**. El **riesgo** de fallo siempre existe.

En nuestros Apuntes de la Escuela, "Análisis de fiabilidad de los sistemas de diseño", Bores (1980), propusimos que la Fiabilidad de diseño de las obras marítimas debía estar basada en los siguientes tres **principios** fundamentales:

1. Todas las obras, todos los sistemas de diseño, responsablemente diseñados deben tener una fiabilidad admisible o de diseño, ( $\Phi$ ), que, obviamente, debe cumplir la **condición fundamental**

$$1 \geq \Phi \geq 0.50$$

ya que, por razones obvias, incluso las obras mas insignificantes debieran tener una fiabilidad no inferior a ( $\Phi = 0.50$ ).

2. La fiabilidad admisible, ( $\Phi$ ), lógicamente debe depender del **grado** de importancia que en principio consideramos dependiente del **ámbito geográfico** a que afectan estas obras, así como al **rango** de importancia dentro de ese ámbito.
3. La fiabilidad de diseño de las obras debiera ser también función de diversos **factores** que afectan a las consecuencias del fallo de las obras dentro de su ámbito. En principio debieran ser mas seguras, tener mayor fiabilidad ( $\Phi$ ), las obras, los sistemas, cuyo fallo puede ocasionar la pérdida de vidas humanas o quebranto de su bienestar, afectar a la seguridad nacional, a la integridad y estabilidad ambiental del medio y/o producir la pérdida y/o inmovilización de bienes importantes.

Es decir, la fiabilidad admisible o de diseño es un problema multivariado en el que consideramos como "variable principal" el **grado** de importancia de las obras, ( $G$ ), compuesta por dos variables simples: El **ámbito** y el **rango** de importancia.

Consideramos que esta "variable principal" se distribuye, como primera estima, siguiendo la distribución de Gumbel, por ejemplo, ya que tratamos de determinar con la mayor garantía posible su comportamiento en los extremos.

En 1980, consideramos el espacio **geográfico** / económico dividido en **tres ámbitos** (Planetario / Regional / Local), cualitativamente bien diferenciados y con connotaciones cuantitativas del orden de ( $10^4/10^2/10^0$  M€), lo que, dada la enorme amplitud de los ámbitos considerados, cabe, evidentemente, matizar mediante una división tricotómica adicional, con **rangos**, (alto / medio / bajo), (H / M / L).

La unión de ambos criterios nos produce un espacio aleatorio bidimensional de decisión, que podemos representar como una matriz simétrica sencilla en la que se valoran con la

misma importancia la situación de (ámbito local / rango alto) y (ámbito planetario / rango bajo).

Estimando las sucesivas bandas de partición del dominio:

$$1 \geq \Phi \geq 0.50$$

de acuerdo con el principio **1**, y admitiendo una partición de la distribución de probabilidad con incrementos ( $\Delta y$ ) de la variable unitaria ( $y$ ) crecientes, según una progresión geométrica de razón **tres**, obtenemos:

**GRADOS de IMPORTANCIA**, Matriz de incrementos ( $\Delta y$ )

ámbito geográfico (nivel económico)	planetario $10^4$ M€	regional $10^2$ M€	local $10^0$ M€
<b>rango ↓</b> alto	8.1	2.7	0.9
medio	2.7	0.9	0.3
bajo	0.9	0.3	0

Considerando como valor inicial de ( $y$ ) el correspondiente a una probabilidad ( $p = 0.50$ ) que en el caso de la distribución de Gumbel es ( $y = 0.367$ ), y sumando esta cantidad a todos los distintos miembros de la matriz anterior resulta:

**GRADOS de IMPORTANCIA**, Matriz de la variable unitaria ( $y$ )

ámbito geográfico (nivel económico)	planetario $10^4$ M€	regional $10^2$ M€	local $10^0$ M€
<b>rango ↓</b> alto	8.467	3.067	1.267
medio	3.067	1.267	0.667
bajo	1.267	0.667	0.367

de la cual, inmediatamente, se deduce la matriz de probabilidad mostrada en la Tabla 5.

Una más clara y precisa asignación de la estima de equivalencias entre los conceptos lingüísticos, cualitativos, y los "equivalentes" cuantitativos de los valores medios y de los límite de las bandas viene dado en la Tabla 6.

Ahora bien el **principio 3** nos señala que la fiabilidad de las obras debiera depender también de otros factores entre los cuales se encuentra, como no, el **coste** de la obra, pero no solo el **coste**. Existen otros factores, no fácilmente valorables económicamente, que también deben ser considerados.

La **actividad** ó actividades –portuaria, defensa de costas, etc.– del sistema en la que se integran las obras es también un factor importante en la decisión sobre la fiabilidad de diseño de éstas, pues el fallo de las obras repercutiendo sobre el funcionamiento del sistema tiene unas consecuencias muy distintas según esa actividad o actividad.

La paralización de un puerto deportivo por fallo de alguna de las obras que lo integran es, evidentemente, indeseable pero ello supone, en el peor de los casos, que los usuarios tengan que cambiar su deporte preferido por otro deporte durante el tiempo de reparación.

G – GRADOS de importancia, Matriz de probabilidad (p) -Gumbel			
ámbito geográfico (nivel económico medio)	planetario $10^4$ M€	regional $10^2$ M€	local $10^0$ M€
<b>rango ↓</b> alto	0.9999957	0.98607	0.81158
medio	0.98607	0.81158	0.5984
bajo	0.81158	0.5984	0.5

TABLA 5.

G – GRADOS de importancia, Bandas de probabilidad (p) -Gumbel			
Ámbito / Rango	Fiabilidad	Valores medios bandas	Valores límites bandas
Planetario Regional Local			
alto	0.9999957	10 <sup>4</sup>	5.10 <sup>3</sup>
medio alto	0.98507	10 <sup>3</sup>	5.10 <sup>2</sup>
bajo medio alto	0.8116	10 <sup>2</sup>	5.10 <sup>1</sup>
bajo medio	0.598	10 <sup>1</sup>	5.10 <sup>0</sup>
bajo	0.5	10 <sup>0</sup>	

TABLA 6.

Distinto es el caso de los puertos comerciales, en cuyo caso lo que se paraliza es la actividad económica y comercial directa o indirectamente relacionada con el puerto.

Las bases navales constituyen una modalidad portuaria que deben tener la máxima fiabilidad, pues perder una guerra o aunque solo sea una batalla por el fallo de una obra portuaria, de un buque, etc. puede tener consecuencias históricas. Recordemos la Armada Invencible.

Distinguimos, así, tres niveles de **actividad: Defensa, producción /servicios y recreo**, incluyendo en defensa no solo la militar sino la de protección civil, sanidad, etc.

Cabe extender la reflexión sobre el factor actividad a un aspecto que consideramos, de alguna manera, complementario de éste y que nos merece la mayor atención: La **indispensabilidad**.

Desde el punto de vista de la teoría de sistemas las obras marítimas pueden resultar **indispensables** al ser nudos del sistema de transporte y su fallo puede paralizar partes fundamentales de este sistema, afectando, en ocasiones decisivamente, entornos geográficos fundamentales y/o sectores comerciales básicos, sin posibilidad, razonable, de otras alternativas.

Por ejemplo, el puerto de Rotterdam es indispensable para tránsito de mercancías de la Europa Occidental, su paralización repercute sobre la totalidad del planeta en forma importante, no puede ser substituido por ningún puerto cercano. La paralización del puerto pesquero de Bermeo obliga a derivar su tráfico a algún otro puerto o puertos cercanos, como Lequeitio, Motrico, e incluso al propio Bilbao. Su indispensabilidad es baja y su ámbito meramente local. La **indispensabilidad** puede entonces ser **total, sectorial o nula**.

Factor de fundamental importancia en el diseño de las centrales nucleares, industrias químicas de alta toxicidad, etc., es la **peligrosidad**.

Por las consecuencias del fallo distinguimos tres niveles de **peligrosidad: accidental, catastrófica, genética**.

Consideramos que la **peligrosidad** del fallo de un sistema es **accidental** cuando sus efectos se restringen al marco personal, individual, y al presente, aunque pueda haber varios individuos afectados y alguno pueda quedar inválido. Tal es el caso de la mayor parte de los accidentes de circulación, de los accidentes laborales, etc.

Cuando las consecuencias del fallo del sistema alcanzan a un gran número de personas, como en el caso de la rotura de presas, de accidentes de aviación, etc., afectando al cuerpo social, la **peligrosidad** será denominada **catastrófica**.

En los niveles anteriores se excluye todo daño genético a la especie. Cuando este daño ocurre la **peligrosidad** será denominada **genética**.

El **coste económico**, considerado desde el siglo XX como básico no debe valorar únicamente los gastos derivados de la restauración de la obra sino también los bienes directamente, afectados y/o dependientes, así como la restauración del entorno ambiental y social afectados, incluido el **daño psicológico** (por pérdida de imagen, alarma social, etc.). Cabe entonces considerar tres niveles, acumulativos, de consideración del coste económico: El **coste menor** (bajo) correspondiendo únicamente a los gastos de reparación de la obra, el **coste medio** al anterior mas la compensación de los bienes directamente afectados o dependientes y **mayor** (alto) al anterior mas los de restauración del entorno ambiental y social afectados, incluido el **daño psicológico** (por pérdida de imagen, alarma social, etc.).

Existen, pues, diversos factores que modifican el grado de importancia, principio **III**, y que hacen el problema multivariado. En cada caso particular, para cada uno de los cuatro factores considerados : Actividad, Indispensabilidad, Coste y Peligrosidad, existe un valor del grado de importancia (G), que resulta modificado, ponderado, por dicho factor.

Como primera estima consideramos que estos **factores de importancia**, como en el caso de los **grados** de importancia siguen progresiones geométricas sencillas, de razón (1/2) para los tres primeros casos y (1/5) en el cuarto, en la forma que mostramos en la Tabla 7.

F – FACTORES de importancia			
/ Sectores			
Actividad	Defensa	Producción	Recreo
	1 / 4	1 / 2	1
Indispensabilidad	Total	Sectorial	Ninguna
	1 / 4	1 / 2	1
Coste (Restauración)	Ambiental	B. Defendidos	Obra
	1 / 4	1 / 2	1
Peligrosidad (Vidas humanas)	Genética	Catastrófica	Accidental
	1 / 25	1 / 5	1

TABLA 7.

En estas condiciones, consideramos como valor representativo de la **fiabilidad** la **media potencial**, resultante de la raíz enésima (n = 4) del producto de los (n) grados de importancia (GA), (GI), (GC) y (GP) elevados a (ponderados por) los (n) factores correspondientes (FA), (FI), (FC) y (FP).

$$IVe \quad \Phi = \sqrt[4]{G_A^{F_A} \cdot G_I^{F_I} \cdot G_C^{F_C} \cdot G_P^{F_P}}$$

Según podemos comprobar, ni la estructura matemática de la estima, ni los valores asignados a los grados y factores, ni los resultados obtenidos con la estima propuesta en el 1980 han cambiado apreciablemente, excepto en el sentido de una mayor coherencia y simplificación conceptual. Y esto por dos razones: **Primero** porque los valores de la fiabilidad admisible o de diseño obtenidos para todos los casos considerados, abarcando un espectro muy amplio, corresponden muy bien con lo que dicta el sentido común y la opinión de los especialistas. **Segundo** porque, precisamente desde entonces, se vienen imponiendo en el mundo métodos de análisis, tales como la "fuzzy logic", en ciertos aspectos similares a nuestra propuesta.

#### APLICACIÓN PUERTO DE BILBAO

Factores de importancia		Grados de importancia	
Sector		Ámbito/Nivel	Rango
actividad	servicios	regional	medio
indispensabilidad	sectorial	regional	medio
coste	defendidas	10 <sup>2</sup> M€	bajo
peligrosidad	accidental	local	bajo

Factores	=	0.5	0.5	0.5	1
Grados	=	0.812	0.812	0.598	0.5

$$Radm = 0.812^{0.5} \times 0.812^{0.5} \times 0.598^{0.5} \times 0.5^1 = 0.749$$

lo que con una vida previsible o de diseño de 50 años corresponde a un periodo de retorno (τ)

$$\tau = 173 \text{ años}$$

Nos parece interesante, incluso a nivel de resumen, comparar estos resultados con otros ejemplos de la técnica marítima e incluso con otros casos de la ingeniería:

#### Puerto de recreo José Banús

actividad	recreo	local	alta
indispensabilidad	ninguna	local	baja
coste	obra	10 <sup>0</sup> M€	media
peligrosidad	accidental	local	bajo

Factores	=	1	1	1	1
Grados	=	0.812	0.5	0.598	0.5

$$Radm = 0.59 \quad \tau = 95 \text{ años}$$

#### Presa de Assuan Rio Nilo (Egipto)

actividad	servicios	regional	alto
indispensabilidad	total	regional	alto
coste	+ ambiental	10 <sup>4</sup> M€	alto
peligrosidad	catastrófica	regional	alto

Factores	=	0.5	0.25	0.25	0.20
Grados	=	0.986	0.986	0.999996	0.986

$$Radm = 0.996 \quad \tau = 15.000 \text{ años}$$

#### Presa Río de las Piedras (Abastecimiento Huelva)

actividad	servicios	local	media
indispensabilidad	sectorial	local	alta
coste	work	10 <sup>0</sup> M€	alto
peligrosidad	accidental	local	media

Factores	=	0.5	0.5	1	1
Grados	=	0.598	0.812	0.812	0.598

$$Radm = 0.763 \quad \tau = 185 \text{ años}$$

#### Puente de Golden Gate (San Francisco)

actividad	servicios	regional	alto
indispensabilidad	total	regional	alto
coste	obra	10 <sup>2</sup> M€	alto
peligrosidad	catastrófica	local	alto

Factores	=	0.5	0.25	0.25	0.2
Grados	=	0.986	0.986	0.986	0.812

$$Radm = 0.985 \quad \tau = 3.370 \text{ años (50)}$$

### 6. FIABILIDAD DE DISEÑO ADMISIBLE PARA LOS COMPONENTES

Conocida la estima de la fiabilidad de diseño del sistema es importante estimar como debe repartirse esta fiabilidad entre los diversos componentes de fallo de la obra. Esto puede realizarse mediante el análisis económico ya que ninguno de los tres factores: **ámbito**, **necesidad** y **peligrosidad**, ni sus respectivos **grados** resultan afectados, ya que se conserva la **fiabilidad de diseño del sistema**.

En el caso de **fallo total** (100% averías) de cualquiera de los componentes, se produce la ruina de la obra, o al menos de uno de sus elementos (caso de obras compuestas), con lo cual ésta, en general, dejará de cumplir con su función. El puerto, etc., quedará entonces fuera de servicio, al menos parcialmente.

Podemos, al menos como primera estima, (Bores 80) considerar la obra como un sistema en serie, con lo cual de acuerdo con la regla de Lúser:

$$\Phi = \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \dots = \prod_i \phi_i$$

en donde (Φ) es la fiabilidad de diseño del sistema y (φ<sub>i</sub>) la fiabilidad de diseño del componente (i).

Por otra parte ya que coste total de la obra (C) es, evidentemente, la suma de los costes (C<sub>i</sub>) de todos los componentes (i)

$$C = C_1 + C_2 + \dots = \sum_i C_i$$

En el caso de dos componentes, el sistema de ecuaciones se reduce a:

$$\begin{aligned} \Phi &= \phi_1 \cdot \phi_2 \\ C &= C_1 + C_2 \end{aligned}$$

cuya solución es inmediata admitiendo la siguiente **hipótesis** complementaria:

El riesgo de fallo de los componentes (ρ<sub>i</sub> = 1 - φ<sub>i</sub>) es inversamente proporcional a sus respectivos costes (C<sub>i</sub>), o sea:

$$\frac{C_1}{1 - \phi_1} = \frac{C_2}{1 - \phi_2}$$

De las tres ecuaciones anteriores inmediatamente obtenemos:

$$\phi_2 = \frac{(C_1 - C_2) + \sqrt{(C_1 - C_2)^2 + 4C_1C_2\Phi}}{2C_1}$$

y

$$\phi_1 = \Phi / \phi_2$$

La extensión de este razonamiento a cualquier número de componentes es inmediata, ya que puede considerarse el sistema dividido primeramente en dos subsistemas y cada uno de éstos, a su vez, en otros dos, hasta llegar a determinar la fiabilidad de todos los componentes del sistema.

Como **ejemplo** de aplicación consideremos el dique de Punto Lucero, **Bilbao**, que nos está sirviendo guía en esta exposición,

$$\text{Fiabilidad de diseño} \quad \Phi = 0.749$$

Considerando que la fiabilidad del espaldón, núcleo, mantos secundarios, suelo, en este caso pueden consideradas como  $\Phi_k = 1$ , la Estima relativa de los costos y fiabilidades de los restantes componentes son:

Manto principal	$C_M = 100$	$\Phi_M = 0.784$
Berma superior	$C_{B1} = 20$	$\Phi_{B1} = 0.977$
Berma inferior	$C_{B2} = 10$	$\Phi_{B2} = 0.992$

### ESTIMA 3 : DISEÑO OPTIMO

#### - INPUT

##### DESIGN

FORM0	=		ARMOR
DEPT0	=	0	BLOCKS
WEIGHT0	=	155	m.
DENSITY1	=	2.35	tons
TALUS1	=	2	tons/m <sup>3</sup>

FORM1	=		BERMS
DEPT1	=	19.8	BLOCKS
WEIGHT1	=	14	m.
DENSITY1	=	2.8	tons
TALUS1	=	2	tons/m <sup>3</sup>

FORM2	=		ROCKS
DEPT2	=	30.3	m.
WEIGHT2	=	5	tons
DENSITY2	=	2.35	tons/m <sup>3</sup>
TALUS2	=	2	

#### SPECIFICATIONS

CONFIGURATION	LINEAL
FAILURE	ELEMENTAL
DAMAGE	= 100
RANK	EXTREMAL
PRECISION	HIGH
CONFIDENCE	= 0.5
	LIFE = 50

#### - OUTPUT

##### FAILURE CLASS : STRUCTURAL

RELIABILITIES  
SUBCLASS : • STABILITY, COMPONE. SUBCLASS CLASS

- ARMOR **0.784**
- BERM1 **0.977**
- BERM2 **0.992**

**0.76**

- RESISTENCE, (estimate) 0.99
- DURABILITY, (estimate) 0.994

**STRUCTURAL RELIABILITY, 0.748**  
**ADMISSIBLE RELIABILITY, 0.749**

### 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS MÁS DESTACADAS SOBRE EL MSM

- (1977) Suárez Bores P. –Análisis aleatorio multivariado. Terminología y conceptos básicos– R.O.P. no. 3151 pags. 831-836.
- (1979) Suárez Bores P. –Sistemas aleatorias multivariados de estabilidad. Aplicación a las Obras Marítimas. R.O.P. no. 3168. pags. 257-262.  
Componente de fallo gradual del manto principal de los diques de escollera. R.O.P. no. 3168. pags. 263-282.
- (1980) Suárez Bores P. –Obras Marítimas Exteriores. Análisis de fiabilidad de los sistemas de diseño. Apuntes de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. D.L M-32820-1980 ISBN 84-7493-024-3.
- (1982) Suárez Bores P. –Obras Marítimas Exteriores. Análisis de fiabilidad de los sistemas de diseño. Apuntes de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 2ª Edición.
- (1990) Almazán J. L. –“Criterios de evaluación económica de macro-proyectos de infraestructuras para el transporte”.– Tesis doctoral E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Univ. Politécnica de Madrid. (Aplicación MSM).
- (1999) Arribas R. (1999). –“Jerarquización de impactos en la dinámica estuarina de la Ría de Huelva”– Tesis doctoral. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Univ. Politécnica de Madrid. (Aplicación MSM).
- (2001) Suárez Bores P. –Después de Iribarren: El Método Sistemico Multivariable– R.O.P. no. 3406. pags. 13-28.

# Recuerdos de Pedro

VICENTE NEGRO VALDECANTOS (\*)

Dos de las lunas de las hojas caídas del año dos mil diez fueron sombrías. En la primera de ellas, perdí a una de mis referencias humanas, un bastión en mi formación como persona, en mi forma de ser y comportarme, mi padre. En la otra, se fue alguien básico en mi profesión y en la forma de entender la ingeniería del mar, Pedro. Estas líneas pretenden ser un homenaje, una semblanza y un recordatorio de casi treinta años de conversaciones y vivencias entre los dos.

Conocí a Pedro en las aulas de tercero, un día que tres candidatos vinieron a explicarnos su programa electoral porque se presentaban a Director de la Escuela. Estábamos a comienzos de los ochenta, una etapa nueva, de aire fresco, y la actitud seria, directa, rígida, tal vez, clásica, no encajaba con el espíritu renovado y revolucionario que en las aulas se respiraba. El cambio también se detectaba en la escuela pero amortiguado y, ligeramente, retrasado, no encajando en la mentalidad y directrices expuestas por él. Aquellas elecciones las ganó D. José Antonio Torroja, no teniendo ningún contacto nuevo con Suárez Bores hasta llegar a la asignatura de quinto curso de Puertos y Costas.

Corría el año 1983 y, no sé si la asignatura o la persona, me cautivó. Era la primera vez que en una árida escuela de estructuras, se hablaba de paisaje, de obras que se integraban en escenarios naturales, de respeto ambiental e inquietud por observar el medio físico natural, de diferentes puntos de vista de diseñar las obras marítimas, desde su estabilidad estructural y funcional hasta en la arquitectura de sus formas, ante la melodía de las ondas y las acciones de las olas.

Pedro era un profesor diferente. No sé si de la Edad Media o del siglo XXI, singular, atípico, hecho a sí mismo, con una inteligencia natural y una intuición magnífica. También era una persona distinta. Adelantado a su tiempo, pues nacido en Valladolid (8 Junio 1929), siempre se consideró asturiano, ligado a su interior, a su cuenca minera, a la pequeña localidad de Ujo y la capital del concejo, Mieres. Su recorrido hasta llegar a Asturias, le hizo tener una niñez en Cervera de Pisuerga, corazón de la montaña palentina donde su padre estaba vinculado al negocio de la construcción; no acostumbrarse a aquel frío y semejante humedad, y, desear la estación de verano. En ella, se sentía más a gusto, creativo y despierto. Era un verdadero géminis.

Tal vez allí, encontró su pasión por la prehistoria; aquellos túmulos y castros anteriores a la dominación romana. Por la geografía, en una comarca de valles apretados y zonas bajas, repletas de pozos de extracción, y, por el agua, con el río Caudal. No sé lo que sentía, cuando después de la lectura de alguno de sus trabajos, me comentaba los juegos con su hermano tirándose por las laderas y dándose golpes, alguno contra alguna de las piedras del camino y de la vida “por eso soy tan listo”, me decía y el amor a su madre, que perdió tan joven y marcó su adolescencia.

Durante los cursos de 1945 – 46 a 1948 – 49, estudió la carrera de Facultativo de Minas y Fábricas Metalúrgicas en Mieres, terminando con el número uno de su promoción. Como anécdota en su expediente figura su destino en Eléctrica del Viesgo y su oficio “pinche”. Estos estudios son simultaneados con los de Bachiller, cursos 1947 – 48 a 1950 – 51. Pedro tenía entonces 22 años.

En mayo de 1955 ingresó en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, terminando en el curso 1958 – 59 del Plan 1947 con la calificación de “Bueno”. Obtuvo en el año 1963 el título de Doctor Ingeniero de Caminos con su Tesis “Notas sobre la Mecánica de Fluidos”.

A Pedro le gustaba mucho estudiar ciertas disciplinas y asignaturas, pero otras las dejaba un poco de lado. Algunos de sus amigos de promoción le animaban a que tenía que aprobar todas las materias, porque en aquella época la Escuela funcionaba por cursos completos y exámenes globales como una prueba de conjunto y paso al curso siguiente con suficiencia completa.

Le gustaban mucho las obras marítimas y D. José Flores, delegado del curso, intercedió con el Profesor Ramón Iribarren para que se incorporase al CEDEX ya que Pepe comenzaría una brillante carrera en Dragados y Construcciones, renunciando a la beca y dejando la investigación a la brillante inteligencia de su compañero y amigo. También le gustaba bastante salir, especialmente, con una chica americana que conoció y por la que renunció a su viaje de fin de carrera por Italia. Pepe Flores también le cubrió entonces, mandando postales de diferentes lugares emblemáticos italianos al domicilio paterno.

En enero de 1960 comienza su labor investigadora en el Laboratorio de Puertos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, siendo nombrado Jefe de la Sección de Investigación Pura el 30 de noviembre de 1964. Para entonces, ya se había incorporado a la escuela. En el curso 1961 – 62 fue nombrado Profesor Adjunto de la Cátedra de Puertos, actuando como tal en los cursos 1961 – 62 y 1962 – 63.

Al aplicarse los estudios portuarios en la citada escuela como consecuencia del Plan 1957, fue encargado de las clases teóricas y prácticas de las asignaturas de Puertos en cuarto curso y Obras Exteriores en quinto curso, función que ya venía desempeñando desde 1962 – 63 en la primera y 1963 – 64 en la segunda.

En septiembre de 1968 gana por oposición la primera Cátedra de Puertos en el país, cargo que como Catedrático desempeña hasta su jubilación el 30 de septiembre de 1999. Posteriormente nombrado Profesor Emérito estuvo vinculado a la escuela con docencia e investigación en doctorado hasta bien entrado el curso 2004 – 2005, donde por edad y salud, impartía sus clases en el amplio y luminoso salón de su casa de la calle Vegafría en el madrileño barrio de Puerta de Hierro.

Las clases en el Plan 75 y 83 siempre fueron a mitad de mañana. A Pedro le gustaba levantarse y asearse, desayunar

(\*) Dr. Ingeniero de Caminos. Profesor Titular UPM.

FIGURA 1. Expediente de Pedro Suárez Bores de Facultativo de Minas, Mieres 1949.

nar sin agobios, y, llegar con tranquilidad a la escuela sobre las diez. Siempre de rica conversación, debatía sobre la lección; o, sobre las nuevas ideas y contribuciones en la clasificación de costas o en el análisis multivariado; o contaba alguna historieta de su estancia en el laboratorio; de la rigidez de Iribarren; de la dificultad en introducir la geometría estadística; de las relaciones con el Ministerio; de sus amigos de la profesión, de lo que pasó en la Isla de Wight, de las patentes... Siempre había algún tema ameno para debatir, antes de pintar en el encerado con trazo grueso y dibujo fácil los temas de oleaje, costas o diques.

Tras la clase, en función de sus trabajos o investigaciones regresaba a casa sobre la una. En otras ocasiones, volvía a la sala de profesores a dedicarse al diálogo, tanto de historia, como de genética, como de puertos o de costas, y, algún que otro chisme; qué se cuenta por el ministerio, qué obras tiene Dragados, que sabes de Miguel, a quién van a nombrar cuando había cambios políticos, ...

Como profesor proporcionó a sus alumnos, numerosas contribuciones en el campo del oleaje, las formas costeras, el análisis sistémico y el diseño de obras marítimas sostenibles. Arquitecto de sueños e ingeniero del medio natural, su conocimiento del litoral y el uso de la técnica para su res-



FIGURA 2. Certificación académica personal con la calificación de "Bueno".

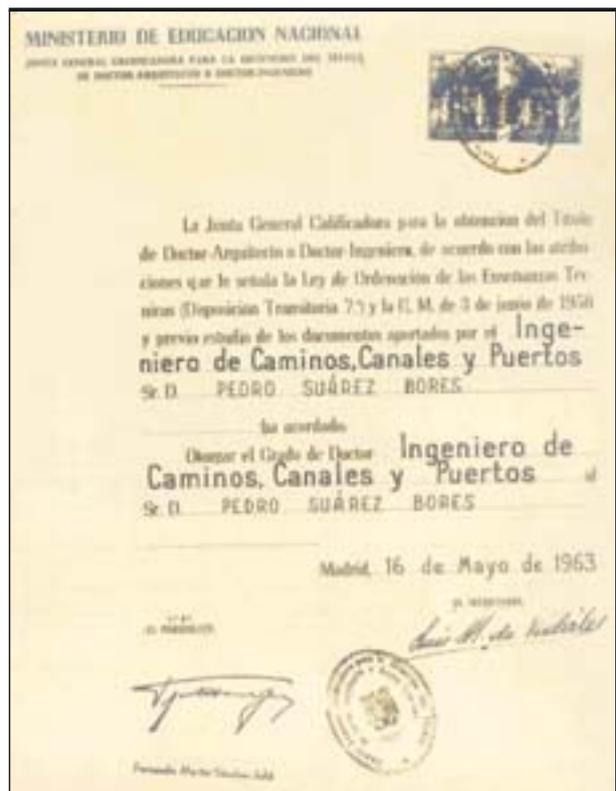


FIGURA 3. Certificado de Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, 1963.

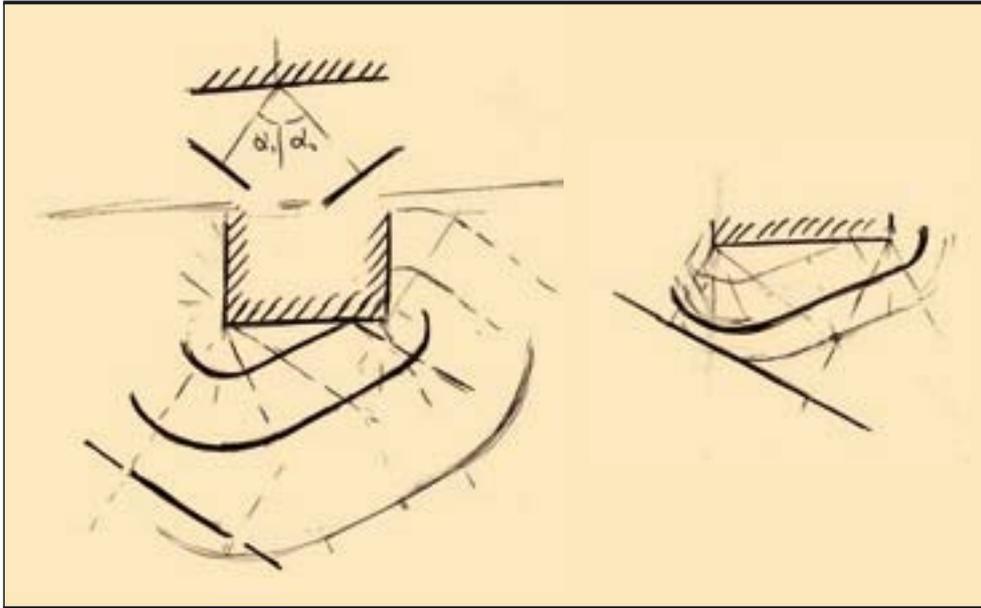


FIGURA 4. Dibujos originales de Suárez Bores sobre doble difracción y reflexión.

peto, fue su máxima preocupación. Su evolución de la matemática y la física avanzada al paisaje, demuestra la “razón y ser” de las obras en un medio muy frágil y sometido a notables acciones de envergadura energética notable.

De carácter afable a temperamental; de crítica feroz a tratamiento cariñoso o casi paternal; de una meticulosidad y rigor exhaustivo; a Pedro siempre lo recordaré por su maravillosa conversación en su despacho viendo las extraordinarias vistas desde su amplísimo ventanal; o los paseos donde bien Bond o Winston, sus “bulldogs enanos”, jugueteaban, se cansaban y enredaban sin parar; por sus ideas evolucionadas en el tiempo a nivel ambiental y territorial; por su cariño y el de su familia, Zoe, Pedro, Billy y Zoe hija que cada vez que iba a su casa o llamaba por teléfono, me transmitían afabilidad. Cuando conocí a Pedro apenas tenía veintidós años, ahora, con casi cincuenta, siendo también geminis, comprendo sus cambios de carácter, sus broncas (de las que he sido objeto de muchas), sus períodos de desilusión y frus-



FIGURA 6. Pedro, mi mujer y yo el 6 Julio 1990.

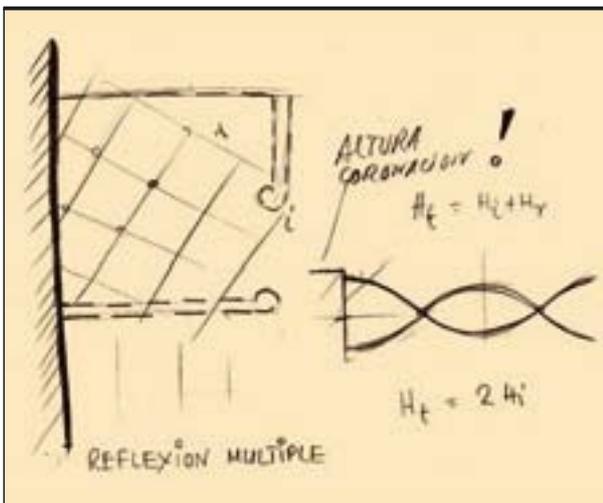


FIGURA 2. Dibujos originales de Suárez Bores sobre reflexión múltiple.

tración en un escenario como el de la ingeniería de España y la idiosincrasia de nuestro país; su pasión por disfrutar desde el buen vino a un libro; de un buen asado a un super ordenador.

Cuando falló Punta Lucero en Marzo y Diciembre de 1976, el apoyo de su amigo Fernando Rodríguez, le facilitó el salto al mundo de la computación, de los grandes ordenadores y de la programación en “Apple”, donde programaba con brillantez los métodos clásicos y novedosos de la ingeniería del mar, desde Iribarren o Hudson al sistémico multivariado.

Hoy pasados muchos años desde que acabé los estudios, repaso la escuela y sus personas, desde Ortuño a Fernández Palacios, desde Arredondo a Carlos Benito, desde Batanero a Herrero, aquellos profesores que el tiempo aleja de nuestras mentes. Sin embargo, las figuras de Clemente, José Antonio y Pedro siempre vienen a mi memoria con una sonrisa, una idea y una palabra de cariño y motivación.

Estas reflexiones son solo un recuerdo y pretenden ser un reflejo de mi amistad.



POR UN TRANSPORTE MARÍTIMO  
MAS SEGURO Y SOSTENIBLE

# APOSTAMOS POR LA INNOVACIÓN

Puertos del Estado es pionero en el análisis y prospección del medio físico marino. Con modernas redes de medida y previsión de parámetros climáticos, correntímetros, y una extenso elenco de recomendaciones para obras marítimas, podemos satisfacer todos los requerimientos de calidad y seguridad que exige la planificación y la logística del transporte marítimo y sus infraestructuras.

En [www.puertos.es](http://www.puertos.es) podrá ampliar la información que necesite para su actividad comercial en nuestros puertos y sobre las 28 Autoridades Portuarias que los gestionan.



Puertos del Estado

[www.puertos.es](http://www.puertos.es)



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE FOMENTO

ACORTAMOS DISTANCIAS. ACERCAMOS PERSONAS.

[www.fomento.es](http://www.fomento.es)

# Pequeños recuerdos de los grandes maestros.

## Una introducción a un artículo inédito de Pedro Suárez Bores

FELIPE MARTÍNEZ MARTÍNEZ (\*)

En el curso 1967-68. los alumnos de cuarto (plan 57 – promoción CLVIII) de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, tuvimos como profesores de la asignatura de PUERTOS a Alejandro Alvariño, Modesto Vigueras y Pedro Suárez Bores. Un trío de ases. Los tres, desgraciadamente, ya fallecidos.

Alejandro Alvariño explicaba –con profundidad, detalle y claridad ejemplares– todo lo relativo a la construcción de muelles, gradas y otras obras interiores de los puertos. Las gradas de Alvariño y su cálculo me han acompañado en cuantas botaduras he tenido ocasión de presenciar.

Modesto Vigueras, el incomparable Modesto, nos abriría los ojos al campo de la explotación portuaria y a muchas cosas más relacionadas con el negocio y transporte marítimos.

Con sus esquemáticas exposiciones gráficas, acompañadas de cuantos detalles verbales fuere menester, quedaban para siempre grabados en la memoria los hoy tan manejados, y manidos, conceptos de intermodalidad, intercambiabilidad, logística, hinterland, foreland y un largo etcétera que algunos creen haber descubierto recientemente. Varias plantas, cuatro diagramas y un par de secciones transversales, siempre con el muelle y el tinglado, servían para aunar y resumir una gruesa monografía sobre el particular que, con seguridad, Modesto titularía Introducción a una investigación previa sobre el “asunto”.

No recuerdo exactamente, pero creo que ni Alvariño ni Modesto facilitaban texto alguno de su autoría.

Pedro Suárez Bores, Pedro para los amigos y Bores para las referencias bibliográficas, se ocupaba de oleaje y diques, ¡y de las costas!, teniendo como telón de fondo el texto de Casto Nogales y Ramón Iribarren. Proporcionaba como contrapunto dos libritos, de los cuáles era autor, a fin de orientar y facilitar el seguimiento de sus clases: “Introducción a la estructura del Oleaje” (Bores, 1967), “droga dura” para aquel entonces, y la “Introducción a los procesos litorales y evolución litoral” (Bores, 1963). Conservo, todavía, los dos “libritos” con algunas anotaciones en sus páginas junto con varios esquemas directamente transcritos de la pizarra de la vieja escuela, ya por entonces a punto de dejar de serlo en el curso siguiente. La dinámica litoral de la costa de Huelva y la “transgresión flandiense” figuran entre las notas a que me refiero, junto con un guión para el manejo del ábaco integrado de Pedro Suárez Bores.

Con Bores entramos, sin saberlo, en una nueva concepción del oleaje, aprendimos a calcular el peso de los cantos del manto de un dique y, particularmente, nos introdujo al paisaje costero y a la dinámica litoral. Todo parecía tener su explicación en función de los avatares de transporte de sedimentos.

Bores nos acompañó, allá por la Semana Santa del 68, al viaje de prácticas a las playas y puertos del Sur. Con tal motivo y en unas bodegas del Puerto de Santa María conocí a Pedro, Facultativo de Minas, Dr. Ingeniero de Caminos y aspi-

rante a la Cátedra de Puertos, que ganaría algunos meses más tarde. Calidez y cercanía contrastaban con los “formulones” a base de integrales triples de aquella “Introducción a la estructura del oleaje”. La playa de la Puntilla todavía lucía en todo su esplendor antes de Puerto Sherry, y en Valdelagrana comenzaba el proceso urbanizador. Siete u ocho años atrás sus pinarillos llegaban hasta el mar. En el Puerto, Pedro/Bores salpicó los caldos con multitud de anécdotas y vivencias de sus ya perdidos días asturianos. Al día siguiente, todavía con la “mar de leva” en nuestro estómago visitamos el puerto de Cádiz y, en concreto, la nueva estación marítima en trance de inauguración. Ciertamente, lo de la Estación no iba mucho con Pedro y sus aficiones de entonces.

Mantuve con Pedro, desde mediados los ochenta, una cercana relación, primero como Director del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX y, más tarde, como Director General del CEDEX y, más allá, como amigo, con independencia de los avatares de la vida profesional.

En los años noventa, Pedro me invitaba, anualmente, a presentar el CEDEX a sus alumnos para contarles algo acerca de los trabajos e instalaciones más relevantes de la Institución. Creo que la “clase” concitaba el interés de las tres partes: Pedro, alumnos y la mía, tanto a nivel personal como institucional.

Su apasionamiento por lo que se denomina “geodinámica externa”, la geomorfología y por lo que yo entiendo como el “ciclo sedimentario”, plegamientos aparte, se compadecía no muy bien con otros asuntos de nuestras conversaciones: “el urbanismo litoral”, la arquitectura portuaria y costera y otros elementos antrópicos. Todo ello, junto con los problemas de sus patentes venía a completar el guión del almuerzo (pulpo, empanada y rodaballo), siempre o casi siempre en Portonovo, en la carretera de La Coruña, lugar al cual, indefectiblemente, acudíamos en el coche de Pedro, que conducía con todos los amarres (largos, traveses y springs) posibles al vehículo. Fanático de la seguridad y sus coeficientes, la vulnerabilidad y el riesgo, no podía actuar de otra forma quien comenzó con la “reliability” algunos años antes de que estuviera en boga. Con el orujo, no podían faltar las múltiples aplicaciones del método sistémico multivariado que cada año iban engrosando en número y, tampoco, sus críticas a determinadas visiones de la enseñanza y práctica de las ingenierías portuaria y costera.

Nada más lejos de mi intención que recurrir a la hagiografía para estas líneas en recuerdo de Pedro Suárez Bores. No tengo empacho alguno en señalar que Pedro fue un pionero, también multivariado (clima, costa, puerto, teoría, enseñanza y práctica), y que a él se debe, sin duda, un elevado porcentaje del nivel de nuestras ingenierías portuaria y costera.

Con motivo de una frustrada publicación para conmemorar el trigésimo aniversario del CEDEX, se solicitó a Pedro el artículo que figura a continuación y que, entonces, no vio la luz y aparece, ahora, veintitantos años después, con plena vigencia de muchos de sus contenidos y para deleite del lector interesado.

(\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

# Contribuciones españolas recientes a la Ingeniería de Costas

PEDRO SUÁREZ BORES

## 1. INTRODUCCIÓN

Alguien señaló hace ya algunos años que los puertos más importantes del mundo no tienen obras de abrigo. ¡Y tenía razón!. Las obras marítimas realmente exteriores, abiertas a los oleajes oceánicos y formando dársenas abrigadas no son frecuentes en ninguna costa del planeta. Generalmente, la construcción de puertos se realiza en áreas naturalmente abrigadas, "harbours". Solo en España y algunos otros, pocos, países esto no sucede, a pesar de que las costas españolas, incluso las del Mediterráneo son, salvo excepciones, muy batidas.

La climatología, geografía y una larga historia: con agricultura muy temprana y tácticas guerreras de tierra calcinada, junto con costas muy poco articuladas, son elementos fundamentales que han comprometido a España en una pugna con el mar que ha perdurado durante milenios. Antes de nuestra Era los protogallegos –megalíticos ó célticos, pero seguro preromanos– habían ya construido un refugio, **Bares**, cuyo largo pasado resistiendo la acción del mar se manifiesta en la esfericidad y pulimento de sus desgastados cantos. Los restos del puerto de **Ampurias** –quizá griegos, probablemente romanos– nos muestran en sus ruinas la dureza de los Levantes, mientras que el puerto de Ostia, su coetáneo, se encuentra intacto, enterrado entre los aluviones del Tiber.

Desde tan lejanos tiempos y mucho más en la actualidad el uso de la costa en la Península Ibérica es variadísimo: recreativo (balneario, náutico), industrial (pesca, transporte, etc.) etc...

Respondiendo a esta necesidad la Ingeniería de Costas ha tenido y tiene en la actualidad una gran vitalidad.

## 2. OLEAJE Y DIQUES

Hace ya más de medio siglo que en la revista de Obras Públicas de Abril de 1934 se publicaba un artículo del entonces Catedrático de Puertos de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, **Don Eduardo J. de Castro**, titulado **Diques de Escollera**, en el que este eminente ingeniero proponía una fórmula para el cálculo del peso de los cantos del manto principal de los diques de escollera. Junto con las fórmulas de Sainflou (1928) y Lira (1929), para diques verticales, la contribución del Prof. Castro sobre diques de escollera vino a constituir la base tecnológica de la naciente ingeniería de Costas, hasta entonces puramente artesanal, al estar limitados los criterios de dimensionamiento de los diques a una serie de rutinas y recomendaciones.

No tenemos conocimiento del método seguido por Castro para la deducción de su fórmula pero el término correspondiente a la densidad:

$$d / (d-1)^3$$

nunca ha sido discutido y se perpetúa en todas las fórmulas propuestas posteriormente, Iribarren (1938), Hedar (1953), Hudson (1959), (1961), Iribarren (1965), Losada (1980), etc. Incluso el término correspondiente a la altura de la ola:

$$H^3$$

es también conservado en todas las formulaciones posteriores, con una sola variable climática, Iribarren (1938), Hedar (1953), Hudson (1961), Iribarren (1965), etc. Solamente el término en ( $\alpha$ ) ha sido objetado, Iribarren (1938), Hedar (1953), Iribarren (1965), etc.

Su sucesor en la Cátedra de Puertos, nuestro querido maestro e insigne ingeniero, **Don Ramón Iribarren**, metodiza el cálculo de las obras marítimas exteriores, pasando de unas soluciones más o menos empíricas a una auténtica Ingeniería de Costas. Sobre bases deterministas Iribarren investiga la estructura de la fórmula para diques de escolleta, (1938), (1965), deduce nuevas fórmulas de aplicación a los diques verticales con y sin rotura del oleaje y, lo que es quizás más importante, metodiza la determinación de la altura de onda, determinista, de cálculo y normaliza el dimensionamiento de la sección de los diques: verticales, mixtos y de escollera (1956).

Aunque la teoría de las ondas había sido totalmente desarrollada, tanto en profundidades indefinidas como reducidas, ya en el siglo pasado –Gerstner (1809), Airy (1845), Sotkes (1880), etc.– y su aplicación a la propagación del oleaje en el mar había sido ya considerada por el gran geomorfólogo norteamericano Davis y recogida por Johnson (1919), Benezit (1924), etc., su aplicación metódica al proyecto de las obras marítimas estaba por hacer. Sin duda su **Método de los Planos de Oleaje**, (1941), (1949), constituye una posibilidad práctica de determinar una onda de cálculo en cualquier punto de costa, habida cuenta de la posible refracción –expansión frontal– y difracción –expansión lateral– que pudiera existir. Una buena parte de su contribución en este campo se encuentra compendiada en un **Tratado de Obras Marítimas Exteriores: Oleaje y Diques**, (1956), redactado con la colaboración de Don Casto Nogales.

Al iniciarse la segunda mitad del presente siglo se introducen los métodos estadísticos en el estudio del oleaje: Geometría estadística, Longuet-Higgins (1952), Análisis espectral, Pierson (1952), Distribuciones medias y extremales de estados del mar, Saville (1953), etc. El oleaje deja de ser tratado como una onda teórica para ser considerado como un proceso estocástico de dos componentes: Uno de largo período –descrito por los correspondientes distribuciones de sus variables en el año medio–, otro de fluctuación, de corto período –descrito por las distribuciones de las variables para un estado del mar–.

Siendo el registro directo el método más adecuado para la observación de las diversas variables estocásticas, tanto del oleaje como otros agentes climáticos, nuestra solución consistió en el Proyecto e instalación de la **Red Exterior de Registro del Oleaje**, Bores (1973), (1974), formada por un sistema de registro constituido por un conjunto de estaciones de observación situadas sobre el litoral, tanto de la península como de las islas, Baleares y Canarias, cumpliendo las siguientes especificaciones fundamentales:

- Ausencia de refracción en el lugar de emplazamiento de los registradores.
- Ausencia de efecto de configuración del fetch local.

- Ausencia de singularidades climáticas entre cada dos registradores, permitiendo la interpolación lineal de las observaciones entre los datos de registradores consecutivos.
- Posibilidad de correlación entre los puntos de observación de la red y los restantes puntos de la plataforma costera.

Desde un punto de vista informático la Red Exterior de Registro del Oleaje fue diseñada como un sistema centralizado, Tejedor (1974), directamente conectado cada estación de la Red con una Central de Proceso y registro de datos instalada en el Laboratorio de Puertos de Madrid.

El proyecto de un nuevo pantalán en el Puerto de Sagunto, encargado por Cubiertas y Tejados en Abril de 1976, así como el estudio de las averías del Dique de Punta Lucero, encargado por la Junta del Puerto de Bilbao en Agosto de 1976, nos planteó el problema general de la estabilidad de las obras marítimas con varios componentes de fallo, cada uno de ellos con sus correspondientes clases, modos, etc. de fallo y cada uno de ellos con sus variadas variables aleatorias.

La definición general del Método Sistemático Multivariado, contribución resultante de estos estudios, Bores (1977), (1978), (1979), sintetiza su alcance:

“Todas las realizaciones del hombre –obras, operaciones e ideas– se ejecutan y, previamente, se diseñan para cumplir una determinada función durante un cierto tiempo, vida previsible o de servicio, debiendo poder resistir sin ninguna clase de fallo, tanto de sus componentes como de la realización como un conjunto, la acción combinada de todas las variables de todos los agentes ambientales –climáticos, geodinámicos, etc.– antrópicos, etc. con unas determinadas especificaciones de las variables de diseño –precisión/vulnerabilidad/rango/certidumbre– y para una fiabilidad admisible ó de diseño.”

Los ensayos realizados en el Danish Hydraulic Laboratory y en el Hovercraft Corporation Laboratory, por encargo de la Junta del Puerto de Bilbao durante los años 1977 y 1978 nos ha permitido la estima de las curvas caracterís para el manto principal de los diques de escollera.

### 3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD, CLASIFICACIÓN Y FORMULACIÓN DE PLAYAS

El año 1947 es muy importante en el análisis de estabilidad de las playas abrigadas, ya que en el número de Mayo de la Revista de Obras Públicas se publican unas reflexiones de D. Ramón Iribarren sobre la sobreelevación teórica originada por el movimiento ondulatorio de las ondas de gravedad antes de su rotura. En el número de Junio hace aplicación de esta sobreelevación teórica originada por el movimiento ondulatorio de las ondas de gravedad antes de la rotura a la playa de Fuenterrabía y posteriormente a otras del litoral guipuzcoano –Deva, etc.–, estimando las corrientes producidas por este gradiente de sobreelevación teórico. Esta contribución tiene un gran valor en lo que afecta a la posible existencia de otras corrientes y transporte sólido litoral que las originadas por la incidencia oblicua del oleaje, única considerada hasta entonces principalmente por la escuela americana, Putnan, Munk y Traylor (1949) y otros, pero de ninguna manera permite deducir la forma de estabilidad de las playas abrigadas.

Precisamente el hecho de que la sobreelevación real, física, así como las corrientes y transporte sólido asociados  $Q_s$ , se produzca únicamente en el estrán y su inmediato entorno, lo mismo que ocurre con las corrientes producidas por la incidencia oblicua del oleaje  $Q_a$ , Johnson y otros (1949), etc. hacen que el transporte total litoral  $Q_t$  sea precisamente la composición de ambos transportes  $Q_s$  y  $Q_a$ .

Cuando el transporte total,  $Q_t$ , es nulo en una determinada sección esta sección estará, evidentemente, en equilibrio, aunque cada uno de los transportes  $Q_a$  y  $Q_s$  no sean nulos. Este es el principio fundamental de nuestro **Método para el estudio de Formas Litorales Estables**, Bores (1974), aplicado por primera vez en 1968, aún en fase de investigación, en el proyecto de Playa de **Puerto Rico**, Gran Canaria.

Sobre esta base –comportamiento de las singularidades dinámicas– y tras el estudio sobre el terreno del litoral español, particularmente sobre las singularidades geométricas de las costas de Levante, de Huelva y del Ampurdán, así como las singularidades másicas de la costa mediterránea, se concretan y determinan los elementos esenciales constitutivos de las playas, tanto naturales como artificiales, que componen los criterios esenciales de nuestra **clasificación genética de playas**, Bores (1974), (1978). Estos criterios son, Bores (1978):

En planta:

- La **modalidad** de la singularidad que define la clase de la playa y que puede ser positivo ó negativa y cuyos símbolos son:

	+	-
másica	M	m
geométrica	G	g
dinámica	D	d

- La **condición de estabilidad**, indicada con los subíndices:

hiperestesia	2
estable	1
inestable	0

En alzado:

- La **naturaleza del fondo**, indicada con los subíndices:

heterogéneo	2
homogéneo	1

- El **perfil del equilibrio**, indicada con los segundos subíndices:

hipercompleto	2
completo	1
incompleto sustentado	03
incompleto submarino	04

Muy frecuentemente la **fórmula genética** de las playas evoluciona con el tiempo. La **matriz de evolución genética**, Bores (1978), permite expresar la evolución, la historia, incluyendo el futuro se éste es previsible, de las playas tanto naturales como artificiales.

Un magnífico ejemplo, bien conocido y datado, Bores (1973), lo constituye la flecha de Punta Umbría, análoga a la de Doñana, ambas en la costa de Huelva.

La evolución de la formación subaérea de Punta Umbría se inicia alrededor del quinto milenio B.P., al final de la transgresión flandense, con aportes de gravillas y arenas gruesas, provenientes del desmantelamiento de la formación pliopleistocena Lepe/Gibraleón, avanzando esta formación como flecha libre hasta alcanzar en el segundo milenio antes de Cristo (–1200) las inmediaciones de la contraflecha de Punta Arenillas, quedando ambas flechas solo separadas por el apoyo dinámico constituido por el canal de marea. Los aportes de grano fino provenientes del Guadiana, cada vez más abundantes absoluta y proporcionalmente, particularmente a partir de finales del segundo milenio antes de Cristo facilitan la evolución rápida del depósito como flecha parcialmente apoyada, que llega ya a la Cascajera en la mitad del primer milenio antes de Cristo (–600). A partir de entonces los aportes son preponderantemente de grano fino pasando la formación a ser homogénea.

Las obras en curso modificarán la configuración y formulación de la formación de Punta Umbría, que pasará a la clase G. Si admitimos, por ejemplo, un plazo de colmatación de veinte años la matriz de evolución de Punta Umbría sería:

	1			
Transgresión Flandiense	g			-1200
	2,2			
	1			
-1200	g	G		-600
	1,2			
	1			
-600	g	G		0= Presente
	1,2			
	1			
0		G		+20
	1			

Las fórmulas genéticas de playas permiten presentar en forma esquemática el proceso de la **contribución española** en el diseño funcional de playas artificiales.

	1			
1964 Teresitas	G	G	(sustentación)	
	1,4			
	1			
1968 Puerto Rico	dG	GD	(sustentación sumergida, abrigo+apoyo)	
	1,4			
	1			
1987 Veneguera	dd	DD	(abrigo+abrigo)	
	1,4			

#### 4. ANÁLISIS FUNCIONAL, ESTÉTICO Y PAISAJÍSTICO

Al menos desde hace 28 siglos el hombre viene construyendo obras en el mar: Aún quedan restos apreciables de los diques de abrigo verticales de los puertos fenicios y de escollera de Bares en Galicia.

Sorprendentemente la morfología tanto de los diques verticales fenicios como la del dique, espigón, de escollera de Bares se ha mantenido substancialmente a lo largo de los siglos, proyectándose y construyéndose, incluso en casos tan insignes como Playa Malibu (en donde se concentra el mayor número de gentes famosas del mundo) para cumplir única y específicamente con la **función** a que se destinan: defensa de ribera, apoyo, abrigo, etc. descuidando otros posibles usos y/o requerimientos tan valorados en la actualidad como son su ocupación con fines recreativos, la calidad estética, adecuación al paisaje, etc.

El progreso del turismo, particularmente litoral, plantea una problemática en las orillas de los mares, lagos y ríos que seguramente van a cambiar la morfología convencional de estas obras. Intentos en este sentido los constituyen nuestras patentes, extendidas a diversos países del área mediterránea, el Caribe, Cono Sur y Japón:

Los **Diques Paisaje**, Patente española 547.141, caracterizados por estar constituidos geoméricamente por uno ó varios haces de prismáticos y/o cilindros, preferentemente verticales, y coronación, preferentemente horizontal, escalonada en graderío y/o mosaico, formados los escalones por uno o más elementos del haz, en disposición irregular, aleatoria, y/o regular o la combinación de ambas, ofreciendo un contorno articulado con caras preferentemente verticales orientadas en muy diversas direcciones, formando una serie de entrantes y salientes simulando ensenadas, cuevas, cabos y otros accidentes costeros, formando estructuralmente estos haces conjuntos monolíticos, cooperantes tanto al vuelco como al desliza-

miento, con sus aplicaciones **Dique Paisaje Basáltico Columnar**, M.U. 289.904, **Dique Paisaje Granítico**, M.U. 291.366 y el **Dique Paisaje en terraza**, M.U. 295.249.

Los **Diques rebasables anuladores de energía**, Patente 543.747, consistente el sistema en una **plataforma cota de coronación cercana** a la del **nivel medio del mar**, en la que para ciertos estados del mar y/o de marea, astronómica y/o meteorológica, parte, partes o la totalidad de la coronación es rebasable, y cuya parte superior se dispone de manera **que actúe como disipador de energía**, al dispersar la masa líquida de rebase por su lanzamiento al aire, extender el área del impacto y/o ampliar el tiempo de percusión de la masa líquida de rebase sobre la zona abrigada, con sus aplicaciones en **altorrelieve** y en **bajorrelieve** M.U. 295.248.

Los **Diques Panorama**, Patente 556.635, caracterizados por estar constituidos por elementos tabulares y/o columnares, de bases poligonales, curvilíneas ó mixtas, preferentemente planas y/o paralelas, de caras laterales planas, alabeadas y/o mixtas, estando estos elementos separados y/o adosados, apoyados y/o enlazados estática y/o hiperestáticamente, formando redes espaciales, de elementos yuxtapuestos y superpuestos en disposiciones regulares y/o irregulares, aleatorias, de coronación escalonada y contorno con entrantes y salientes, preferentemente irregulares, aleatorios, parcialmente reflectantes, formando un conjunto, generalmente, parcialmente permeable.

Cualquiera de estos **Diques** pueden descansar sobre una o varias banquetas o sobre una o varias banquetas o sobre diques de escollera convencionales, preferentemente sumergidos, que actúan como cimentación y cuyas coronaciones quedan sustituidas por los propios Diques, que actúan así como superestructura de las obras. Motivos económicos y/o constructivos deciden la solución a adoptar.

Las **ventajas** de estos nuevos tipos de **Diques** sobre los diques, espigones, convencionales, son numerosas e importantes, pues no solo se refieren a mejoras estructurales y/o funcionales, sino también, a aspectos tan valorados en la actualidad, especialmente en ambientes residenciales, recreacionales, etc., como son los estéticos, paisajísticos, etc...

Mayor ventaja aún, funcionalmente, supone la disminución del coeficiente de reflexión pues la agitación en el entorno de la obra se reduce, debido no solo a la menor altura de la ola reflejada, sino, también a la variedad de las direcciones de la ola reflejada. Esto ocurre no solo del lado del mar, sino, también, en la áreas (dársenas, calas, radas, etc.) interiores, lo que evita las posibles resonancias y/o las posibles reflexiones múltiples dentro de estas. Todo ello procura las ventajas adicionales siguientes:

- Permite el mejor uso recreativo (baño, náutica, etc.,) en la totalidad del entorno interior y exterior del mismo.
- Facilita el atraque de embarcaciones, aunque este atraque sea recomendable, en muchas ocasiones, solo en temporada.
- Facilita, en su caso, el apoyo de las posibles playas, lo que resulta problemático en el caso de los diques, espigones, convencionales.

Todos estos nuevos tipos de diques permite su ocupación con fines recreativos: solarium, baño, pesca, tribuna de espectáculos o del propio panorama, paseo, etc., al mismo tiempo que proporciona accesos a/y desde el agua: mar, río, lago, etc. Esta ocupación para usos recreativos aumenta sustancialmente el aforo del borde costero (marino, lagunar, fluvial, etc.) lo que produce una ventaja adicional, esencial, sobre la situación actual, particularmente en ciertos casos, en que por ausencia de playas y especiales condiciones de la

costa natural, la obra puede proporcionar, incluso, la totalidad del número de plazas.

Por otra parte, el uso recreativo de la propia obra incrementa las posibilidades del borde costero, lo que no solo mejora la cantidad sino, incluso, la calidad de la oferta recreativa. Todas estas ventajas repercuten directamente sobre la rentabilidad (económica, social, etc.) de la inversión, al disminuir el corriente coste/plaza y aumentar la calidad de la oferta.

La simulación de paisajes naturales – volcánicos, graníticos, en terraza, restinga, etc. puede limitarse a las formas estructurales o extenderse al microrelieve, textura externa y coloración de estos diques.

Los **Diques Paisaje** se caracterizan porque con altura de coronación moderada o baja en relación con la dinámica litoral actuante y para ciertos estados del mar y/o de marea, astronómica y/o meteorológica, parte, partes o la totalidad de la coronación de acuerdo con el porcentaje de energía que se desee disipar y de la dinámica litoral, así como de la función de la obra y de las características morfológicas, paisajísticas y ambientales del emplazamiento, se hace rebasable, comportándose como **disipadores de energía**.

En los diques (espigones) rebasables se permite el paso de las olas más altas, soliendo situar su cota de coronación a una altura del orden de la mitad de la de los diques (espigones) irrebables. Esta reducción permite el paso relativamente frecuente de caudales de rebase cuyo impacto súbito y concentrado en las dársenas abrigadas origina ondas de percusión, ondas de Cauchy, de muy corto período, lo que constituye un inconveniente grave para pequeñas embarcaciones (pesca, recreo, etc). Por otra parte, en los diques rebasables convencionales el manto principal del lado del abrigo, sometido a un flujo de agua descendente, se encuentra en unas condiciones de estabilidad muy precarias, salvo que la protección de coronación y/o la anchura de ésta se dimensiona con largueza, con los correspondientes inconvenientes de ocupación de espacio y elevación del costo.

Debido a su baja cota de coronación los nuevos diques evitan la formación de **“pantallas visuales”**.

Faciliten ó al menos no impiden la libre **circulación del aire** sobre las superficies inmediatas al nivel del mar, evitando el **“efecto pozo”**, particularmente grave en dársenas de pequeñas dimensiones.

Mejoran la **renovación del agua en el área abrigada** obteniéndose un flujo continuo que garantice la oxigenación de las aguas y evite el depósito de fangos y el establecimiento de condiciones anaerobias, totalmente indeseables tanto en dársenas portuarias, etc., como en playas abrigadas.

## 5. URBANISMO LITORAL

El avance tecnológico, estructural y funcional, logrado en España en este medio siglo, permite ya el tratamiento integrado de las fachadas marítimas, naciendo así lo que podemos denominar, ya, Urbanismo Litoral.

## 6. PLAYAS DE LEVANTE DE BARCELONA

Cuatro criterios fundamentales, presididos por una orientación básicamente social y estética, han decidido el dimensionamiento, trazado y ordenación de la costa: Variedad, Armonía, Funcionalidad y Capacidad.

Así, de Norte a Sur, se divide el tramo en tres sectores. El septentrional, o de POBLE NOU, con una decidida especialización deportiva, los otros dos – BARCELONA SIGLO XXI y de la BARCELONETA – recreacional. Con un trazado geo-

métrico transversal los canales de pluviales, más que aislar, conectan los tres sectores.

El SECTOR DE POBLE NOU se extiende desde la riera de Horta hasta el canal del Bogatell, quedando incluido dentro de él el canal de la Llacuna. Su frente marítimo se resuelve en tres amplias playas de concha colgadas dobles, separadas por la BASE NÁUTICA DE POBLE NOU al norte y el canal de la Llacuna, al Sur.

Formando la fachada marítima de la populosa barriada del mismo nombre –prácticamente desprovista de jardines y áreas de recreo– la vocación natural de este SECTOR DE POBLE NOU es la deportiva. Con esta finalidad su ZONA DE SERVICIOS se destina, específicamente, a estas instalaciones en variado género: Fútbol, atletismo, etc.

Los deportes acuáticos son, lógicamente, los más generosamente dotados, con una extensa BASE NÁUTICA y tres amplias playas.

Aunque también destinado a uso público, muy distinto en el enfoque dado al sector central.

Barcelona, adelantada de las Artes y de las Ciencias, con tantos y tan bellos ejemplos de la evolución artística de Occidente es, sin duda, el mejor lugar para una “experiencia del siglo XXI”.

A este fin, ocupando más de medio km. de costa, al abrigo de los temporales, pero en el mar, situamos un conjunto arquitectónico decididamente orientado al futuro. Aunque formas y volúmenes han de concretarse en el Concurso Internacional convocado a tal fin, en este Estudio, y sólo como boceto, sugerimos tres esbeltas estructuras, ligadas a tierra por una solución viaria aérea.

En el borde de la misma dársena se sitúa un PALACIO DE LOS DEPORTES ACUÁTICOS como el PARQUE MARINO deberán ser tratados por especialistas y ser motivo el primero de ellos, al menos, de un Concurso Internacional. Así para el PALACIO DE LOS DEPORTES ACUÁTICOS solo sugerimos una gran concha cubriendo un graderío. La “pista” debe incluir la posibilidad de una fuente luminosa excepcional –viejo sueño de los barceloneses– y facilidad para la exhibición de los animales marinos residentes del PARQUE.

La ciudad dispone en la actualidad de una playa muy concurrida, la Playa de la Barceloneta, que apoyada parcialmente en el Rompeolas, con una anchura variable, se extiende hasta el Paseo Marítimo.

Desafortunadamente los trabajos en la costa y en los ríos –obras, extracciones y vertidos– y muy particularmente las obras futuras de los emisarios de pluviales y las que aquí se estudian afectarán decisivamente a esta playa, por lo que se considera su estabilización y ampliación.

## 7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Airy G.B. (1945) – Tides and Waves – Enciclopedia Metropolitana.
- Benizat M. (1921) – Ports et Travaux Maritimes – Ecole Spéciale des Travaux Publics, Paris.
- Bores P.S. (1973) – Geomorfología y Dinámica Litoral – Análisis, Planeamiento y Gestión del Medio Litoral – Colegio de Ingenieros de Caminos.
- (1974)a – Formas Litorales Estables Playas Artificiales – Análisis, Planteamiento y Gestión del Medio Litoral II – Colegio de Ingenieros de Caminos.
- (1974) – Sea Observation in Coastal Areas: The Spanish Offshore Network, Proc. A.S.C.E. Waves 74.
- (1977) – Análisis Aleatorio Multivariado. Terminología y Conceptos Básicos – R.O.P., Madrid.

(1978) – Shore Classification – Proc. III International Congr. I.A.E.G.

(1979) – Sistemas Aleatorios Multivariados. Aplicación a Obras Marítimas – R.O.P., número extraord. Abril.

(1980) – Central Térmica de Cubelles: Una nueva solución para la Toma y Descarga de Refrigeración – Prog. Wat. Tech. vol 12, Pergamon Press, London.

Castro E. (1934) – Diques de Escollera – R.O.P. Abril.

Gerstner F. (1809) – Theorie der Wellen, Abhandlungen der königlichen Bohmischen Gesell – Schaft der Wissenschaften, Prague.

Hedar A. (1960) – Stability of Rock-fill Breakwaters – Chalmers Techn. Hog. Goteborg.

Hudson R.Y. (1959) – Laboratory Investigation of Rubble-mound Breakwaters – A.S.C.E. Journal of Waterways & Harbors Divisions 85 (WW3).

Iribarren R. (1938) – Fórmula para el cálculo de los Diques de Escollera – San Sebastian.

(1941) – Método de los Planos de Oleaje – R.O.P.

(1947) – Corrientes y transporte de arenas originados por el oleaje – R.O.P., Mayo.

– Corrientes y transporte de arenas originados por el oleaje – R.O.P., Junio.

(1956) – Obras Marítimas. Oleaje y Diques. Dosat, Madrid.

(1965) – Formule pour le calcul des Dignes en Anrochement Naturels ou Elements Artificiels – P.I.A.N.C. Int. Congress, Estocolmo.

Johnson D.W. (1919) – Shore Processes & Shoreline development – Hatner Publish. Co., New York.

Joly M.G. (1923) – Travaux Maritimes, La Mer et les Cotes – Librairies J.B. Bailliere et Fils, Paris.

Laval M.D. (1955) – Cours de Travaux Maritimes – Ecole Nationale del Ports et Chaussées, Paris.

Longuet-Higgins M.S. (1952) – On the Statistical Distributions of the Heights of Sea Waves – Journal Mar. Research II.

Longuet-Higgins M.S. & Stewart R.W. (1963) – A note on Wave Setup – Journal Mar. Research, 21.

Pierson W.J. (1952) – A Unified Mathematical Theory, Parts I & II – College of Eng. Research Division, New York Univ.

Savege R.P. (1957) – Model tests of Wave Runup for the Hurricane Protection Project – Bull. Beach Erosion Board, 11.

Saville TH. (1953) – Techn. Memo. nos. 36, 37 y 38 Beach Erosion Board.

(1961) – Experimental Determination or Wave setup. Natl. Hurricane Research Project – Report no. 50.

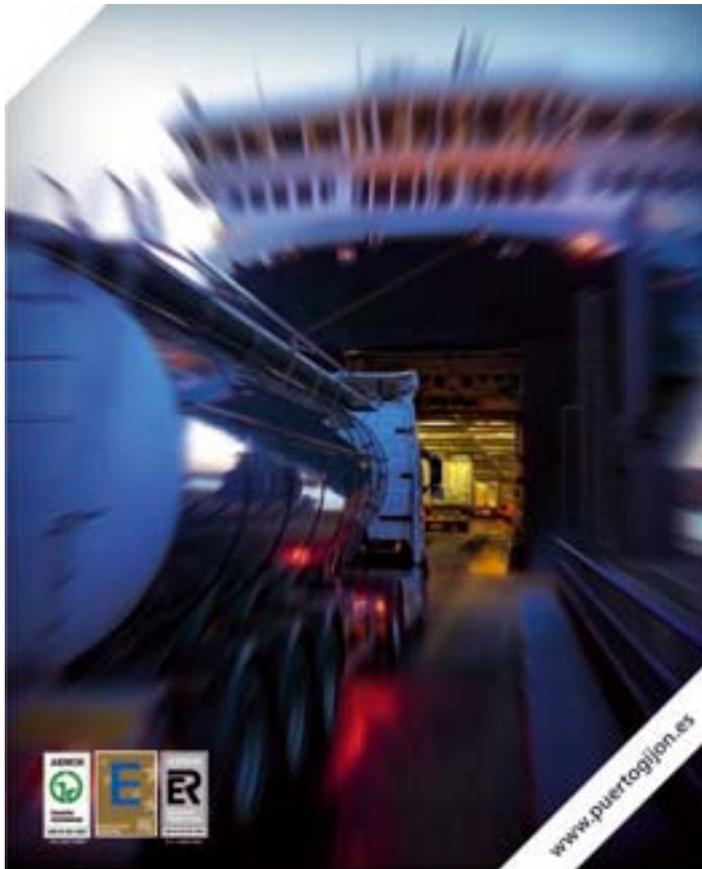
Stokes G.G. (1880) – On the theory of Oscillatory Waves – Mathematical & Physical Papers I, Cambridge Univ. Press. Cambridge.

Tejedor L. (1974) – A Teleprocess System, The Spanish Offshore Network – Proc. A.S.C.E. Waves 74.

**MUELLE SUR**

Centro Logístico Sur.  
líneas Regulares.  
Tráfico de Conenedores y Ro-ro.  
Plataforma para el transporte hortofrutícola.

- 750 metros de línea de atraque
- 13 metros de calado en bajamar
- 280.000 m<sup>2</sup> disponibles en primera, segunda y tercera zona
- Conexiones ferroviarias
- Tasas y tarifas portuarias muy competitivas



www.puertogijon.es

## Puerto de Gijón ***Motor de progreso***

Un progreso que parte de una **innovadora estrategia** de proyección internacional con un modelo de **excelencia en la gestión portuaria** que amplía horizontes para nuestros clientes.

Un progreso que acerca distancias a través de **nuevas rutas y autopistas marítimas**.

Un transporte **sostenible y competitivo** que **impulsa la economía** y hace progresar nuestra sociedad, dando forma al futuro.

Más que un Puerto, *motor de progreso*.



**Puerto de Gijón**

Autoridad Portuaria de Gijón

apc.es



### **Puerto de Cartagena** **Logística y rentabilidad**

En el Puerto de Cartagena hay un doble valor. En el Puerto de Cartagena encuentras el mejor aliado logístico conectando tus productos a los principales destinos de mercados con líneas regulares y los mejores operadores. En el Puerto de Cartagena encuentras rentabilidad con servicios eficaces, ahorrando costes y optimizando la distribución y tu competitividad. Puerto de Cartagena, doble valor.



# Puerto de la Bahía de Cádiz

4 dársenas especializadas



Contenedores  
Tráfico rodado  
Cruceros  
Pesca  
Graneles sólidos  
Graneles líquidos



Puerto de España, 17 - 11006 Cádiz  
Telf: 956 24 34 30  
Fax: 956 24 34 70  
www.puertobahia.com  
e-mail: cadiz@puertobahia.com



www.puertodeceuta.com  
Muelle España s/n  
51001 Ceuta ESPAÑA (Spain)  
Tfno.: + 34 956 527 000  
Fax: + 34 956 527 001  
apceuta@puertodeceuta.com



# La gestión integrada sostenible del litoral en la actualidad

JOSÉ LUIS ALMAZÁN GÁRATE (\*) y CARLOS FORADADA RODRÍGUEZ (\*\*)

**RESUMEN** En nuestros días, en países ubicados en latitudes medias con fachada marítima y estabilidad político-social, el litoral es objeto de diversas presiones e influencias, por lo que su equilibrio, que es de naturaleza frágil, complicada y variable, se ve amenazado. En estos países son múltiples los intereses que confluyen en él, lo que hace que sea objeto de numerosas presiones económicas y políticas. Por ello, su gestión adecuada es uno de los objetivos que se ha planteado la Unión Europea, intentando prevenir la creciente erosión favorecida por la presión humana (edificaciones, infraestructuras, etc.) y la amenaza creciente de la posible influencia del calentamiento global con su efecto de cambio climático global, y muy discutible efecto sobre el litoral (cambios de régimen ciertos y variaciones de nivel ficticias).

La gestión integrada sostenible del litoral es, por lo tanto, una de las herramientas que se presentan como más eficaz en la actualidad, unida a la gestión del riesgo y a la evaluación ambiental estratégica (SEA). El adecuado uso de los Sistemas de Información Geográfica constituye una herramienta básica para una gestión integrada del litoral real y tecnificada, en vez de una gestión basada en dogmas discutibles no cuestionados. De todo ello se plantea una perspectiva actualizada en el presente trabajo.

**ABSTRACT** *Nowadays the coast is the target of several pressures and influences and consequently its balance is delicate, complicated and variable. The numerous interests meet on make it being the centre of many economic pressures. Therefore, its management is one of the aims of the European Community, trying to prevent the raising erosion helped by the population pressure (buildings, infrastructures, etc.) and the raising influence of the global warming with its possible effect on climate change. The integrated coast management is one of most effective tools nowadays as well as risk management and the Strategic Environment Asement (SEA) with the adequate use of the Geographical Information Systems. An updated perspective is created in this paper, from all of the above.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Hasta no hace muchos años, la sociedad ha contemplado el litoral como un medio físico de recursos inagotables y, aún hoy, en diversos países, sigue así considerado; de una tolerancia ilimitada para todo tipo de actuaciones y, en muchas ocasiones, como lugar de ubicación de diferentes industrias, sin ningún control de vertidos al mar, ríos, estuarios y atmósfera. Sin embargo, el progresivo aumento del bienestar económico y social ha convertido al litoral en el objetivo de un nuevo conjunto de actividades, sobre todo de carácter lúdico, en los países desarrollados o, al menos, con suficiente estabilidad y seguridad político-social y ubicados en latitudes medias, que lo han transformado en el foco de atracción de la población residente y turística. Asimismo, la fijación temporal o definitiva de la residencia en el mismo litoral o en lugares próximos se ha convertido en un símbolo de bienestar, dando lugar al conjunto de ventajas e inconvenientes que se derivan de la concentración de asentamientos humanos.

De esta forma se comienza a crear una floreciente economía de servicios (turismo litoral) que atrae a más población en busca de empleo, lo que, a su vez, exige una serie de inversiones en diferentes tipos de actuaciones que empiezan a in-

fluir en el estado de las infraestructuras y servicios que precisan los asentamientos humanos concentrados, y que no siempre pueden desarrollarse al ritmo marcado por el aumento de población. Dichas actuaciones consisten en el desarrollo de infraestructuras ligadas al agua (limpia y sucia), de abastecimientos (captación, almacenamiento, transporte y tratamiento), saneamiento (redes de saneamiento, colectores e impulsiones, depuración y tratamiento de fangos) y nuevas infraestructuras de acceso: ferroviario, por carretera, aeropuertos y aeropuertos, redes capilares de calles y caminos, servicios hospitalarios, bomberos, policía (local y estatal), colegios, centros superiores de formación, recogida y tratamiento de residuos sólidos urbanos, servicios de atención a mayores y minusválidos, servicios de protección a menores, servicios de limpieza, parques y jardines, fuentes y mobiliario urbano; etc. además del desarrollo de nuevas urbanizaciones.

Todas estas actuaciones, difíciles de coordinar y de permitir un desarrollo sostenible armónico en el mundo terrestre convencional, ven agudizada su problemática global de gestión en las proximidades del litoral, donde se dan condicionantes adicionales y específicas sobre los ya complejas derivadas de los asentamientos urbanos con crecimiento superior al meramente vegetativo.

Tradicionalmente, la costa y el medio litoral terrestre asociado a ella han sido el lugar de penetración de peligrosas incursiones de piratas y rufianes, y por ello, solamente ocupada por dotaciones de fuerzas defensivas y de aviso, mejor o peor organizadas, con familias o sin ellas, en función de la capacidad militar y organizativa que ejerciese el poder sobre el ámbito terrestre y costero, con capacidad de proyectar su sobera-

(\*) Prof. Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos y Ldo. CC Económicas y Empresariales. Funcionario excedente del Cuerpo de Ingenieros del Estado. PTU UPM.

(\*\*) Ing. Caminos, Canales y Puertos. Diplomado en Estudios Avanzados. Funcionario del Cuerpo de Ingenieros del Estado.

nía (por la razón de su fuerza) sobre las aguas litorales próximas al borde costero. Así, por ejemplo, en España era conocido que por habitar en el entorno de Tarifa se perdonaban al reo sus crímenes, por grandes que éstos hubiesen sido: *“mata al Rey y vete a Tarifa”* dicho popular de la época.

En tiempos posteriores, países como Francia y otros, siguieron este ejemplo en la creación de cuerpos militares expedicionarios en ultramar, como fue el caso de la “legión extranjera”.

Hoy en día, comienzos del s. XXI, la población, en general, no conoce bien en detalle la situación que se da en las costas de por ejemplo Somalia, pero es un hecho que en ellas existe piratería y, desde luego, ninguna agencia de viajes ofrece viajes y estancias turísticas en las costas de Somalia, a pesar de que en términos históricos la zona debió ser privilegiada en muchos sentidos.

Los fenómenos asociados al nuevo modelo de asentamientos en países ubicados en latitudes medias con litoral y estabilidad político-social, relativamente nuevos en el tiempo, plantean nuevos problemas, y novedosos han de ser los métodos para resolverlos; el viejo aforismo *“todo debe cambiar para que nada cambie”* cobra rabiosa actualidad en ciertos países, entre los que España ocupa una muy destacada posición.

Esta nueva problemática que se da, sobre todo, en los países desarrollados, donde se considera al litoral como un fin cada vez más deseado y un valioso medio natural respecto al que habían permanecido indiferentes las fuerzas político-sociales y los poderes económicos, que ya en el siglo pasado (s. XX) comenzaron a darse cuenta de los problemas que ellos mismos estaban originando, llegándose a una toma de conciencia de la situación, creada en gran parte por una actividad humana necesitada de organización para no ser descontrolada e inconveniente.

Los aumentos de población, como todo cambio del “status quo”, presentan ventajas e inconvenientes, y en el conjunto de “stakeholders”, unos salen beneficiados y otros perjudicados. El administrador prudente debiera, o al menos ésa es la posición que defienden los tecnócratas, maximizar los beneficios para el mayor número posible de “beneficiarios” y minimizar los costes (inconvenientes), procurando que éstos afecten al menor número posible de personas; siempre, desde luego, en los posicionamientos técnicos, democráticos y liberales, con el máximo respeto a los derechos adquiridos.

Esta nueva gestión debe resolver problemas superados en otros ámbitos, aunque de forma distinta según en qué bloques de países, ya que se plantean preguntas clave donde el bien común y los derechos individuales pueden colisionar, como por ejemplo es el asociado al concepto de “propiedad privada”, incontestable, en principio, en la cultura occidental donde está inmersa España, pero inexistente en países muy vinculados históricamente también a España, como es el caso de Cuba en la actualidad, por ejemplo, entre otros muchos, organizados social y políticamente en el marco de las creencias comunistas, tan respetables, al menos en principio, como las liberales y democráticas.

El crecimiento socio-económico tiene costes y beneficios, el “gratis total” es una bonita utopía que, desgraciadamente, no se ajusta en absoluto a la realidad, al menos, desde que Adán y Eva fueron expulsados del paraíso terrenal, que los estudiosos ubican entre los ríos Tigris y Éufrates, es decir, en lo que hoy es Irak.

La industria, por ejemplo, genera empleo, pero consume energía cuya producción, si no es nuclear, emite CO<sub>2</sub> a la atmósfera. La emisión de anhídrido carbónico origina el conocido efecto invernadero, que influye sobre el ritmo de los ciclos históricos naturales, alterándolos y provocando un incremento y aceleración del calentamiento global que sufre el pla-

neta Tierra en la actualidad. Surge entonces la consabida discusión sobre el cambio climático y los efectos que ello puede provocar, como la variación en la frecuencia e intensidad de los temporales, la irregularidad del clima, las variaciones en la altura y dirección del oleaje, etc. A todo ello se une la discusión sobre la realidad o ficción de la existencia o no de la subida del nivel del mar con sus efectos sobre el litoral y los procesos de erosión de litoral.

Cierto es que la tecnología ofrece soluciones en muy diversos ámbitos, por ejemplo, y en relación al caso comentado (emisiones de CO<sub>2</sub> y sus efectos), el empleo de tecnologías que reducen las emisiones de gases con efecto invernadero en los procesos de producción industrial, o el desarrollo de potentes sumideros de CO<sub>2</sub>, siendo precisamente la mar oceana un medio de excepcionales condiciones para transformar el CO<sub>2</sub> atmosférico para, con la energía de la luz solar, alimentar algas microcelulares y macroalgas, que son fuente de producción de biocombustibles con residuos de glicerina (citamos este ejemplo en concreto para hacer notar una de las líneas de investigación en el que están integrados los autores de este artículo).

El medio litoral, como frontera tierra-mar, goza de características específicas, algunas de ellas de especial complejidad, y todas ellas en un marco dinámico, siendo así que el gestor administrativo tradicional y el político legislador están acostumbrados a moverse en medios estáticos, y los cambios profundos suelen asociarse a procesos convulsivos, por lo general indeseables.

En relación con todo lo antes expuesto, conviene señalar que el sistema litoral es un ámbito dinámico y en el que tienen lugar una serie de interacciones entre los diferentes fases que lo componen (aire, agua y tierra) y entre sus tres subsistemas (físico y ambiental, económico-social e institucional). La alteración de cualquiera de ellos modifica el equilibrio existente que, por las especiales características del sistema litoral, se encuentra en un equilibrio frágil, delicado, dinámico y complejo. Conseguir la preservación de este equilibrio dentro de los límites razonables en una estrategia sostenible e integrada es el objetivo fundamental de la gestión integrada sostenible del litoral o, en su defecto, al menos conocer los cambios previsibles y minimizar sus eventuales efectos negativos. Y una vez llegados a este punto cabe preguntarse: ¿qué están haciendo los Gobiernos, las Administraciones y la sociedad para conocer, gestionar y remediar la situación? ¿qué parámetros deben conocerse y monitorizarse? ¿cuáles son las relaciones entre las variables principales, las secundarias y las correladas? ¿qué elementos son susceptibles y a qué coste generalizado?; ¿con qué medios y procedimientos se pretende solucionar o mitigar las situaciones detectadas como indeseables?.

Responder a este conjunto de preguntas de forma ordenada, sistemática y verificable, es decir, de forma científica, puede que no sea posible por el momento en toda su amplitud, pero, desde luego, creemos firmemente que el método científico es el más adecuado o, lo que es lo mismo, el menos malo de los posibles, para analizar, evaluar y actuar en las políticas de gestión del litoral, de aquellas zonas y países que lo precisen, por haber experimentado los beneficios y los inconvenientes de la presión antrópica sobre su ámbito natural.

## 2. ANTECEDENTES DEL PROCESO DE LA GESTIÓN LITORAL

Como una primera línea de búsqueda de respuesta a las cuestiones planteadas en el apartado anterior, se esboza a continuación, de una forma resumida, la evolución del proceso y las etapas que ha experimentado la gestión litoral en el mundo occidental, en el que actualmente se encuentra España.



FIGURA 1. Playa de las Teresitas (Santa Cruz de Tenerife).



FIGURA 2. Aplicación de la metodología de los planos de oleaje del Prof. Dr. D. Ramón Iribarren.

En un principio puede considerarse que entre las primeras naciones que tuvieron conciencia del fenómeno de la erosión litoral y de los problemas que entraña fueron España y los Estados Unidos de América, que ya en 1930 con su “Corps of Engineers Shore Protection Program”, encargado por el Congreso al “Army Corps of Engineers” para diseñar y planificar proyectos de defensa litoral, así como la investigación básica en este campo.

En esa década, en España, se avanzó enormemente en la comprensión de los fenómenos relacionados con el transporte sólido litoral, la propagación del oleaje en aguas someras y la

interacción entre los sedimentos y el oleaje, tanto en las formas costeras de depósito como en las de erosión.

La metodología de los “planos de oleaje”, pionera en el mundo, desarrollada por el Prof. D. Ramón Iribarren, dotó a los ingenieros de la herramienta básica para entender, y en consecuencia poder actuar, sobre los procesos litorales. Así la primera playa artificial del mundo se proyectó y construyó (y hoy sigue siendo un recurso turístico de primera magnitud) en España, concretamente nos referimos a la Playa de las Teresitas en la Isla Canaria de Tenerife.

Más adelante, en Estados Unidos se aprobó el National Flood Insurance Program (1968) para la protección de las poblaciones del litoral mediante un nuevo planeamiento urbanístico. En Estados Unidos se promulgó, en el año 1972, la importante Coastal Zone Management Act (CZMA) declarando de interés nacional la gestión eficiente de la zona costera.

Al mismo tiempo, en el Club de Roma (1972) se hace la primera mención a la degradación del litoral en la Conferencia de Estocolmo, donde se plasma en el Primer Programa de Acción para la Comunidad Europea.

En España, la entonces Dirección General de Puertos y Costas bajo la dirección del ingeniero D. Fernando Martín de Vidales, pone en marcha una ejemplar actuación, el Plan Indicativo de Usos del Litoral (PIDU), donde trabajan, entre otros destacados ingenieros del ámbito marítimo y portuario en España, D. Victoriano Fernández Dupuy (lamentablemente ya fallecido), D. Justo Mora Alonso-Muñoyerro (ex Subdirector General del Dominio Público Hidráulico), D. Antonio Lechuga Álvaro (destacado experto e investigador en el ámbito litoral) y otros muchos que constituyen el germen "non nato" de ingenieros expertos en el conocimiento del medio litoral.

Cuanto más estrechos resulten ser los márgenes de maniobrabilidad política en la gestión de los espacios complejos, y el litoral lo es de excepción, mejor para los intereses globales del país o comunidad correspondiente, reconociendo que en ámbitos dinámicos y complejos resulta imposible, además de ridículo, buscar en la técnica la solución global a la compleja problemática y al conjunto de diversos intereses entrecruzados y muchos de ellos contradictorios.

Consciente de esta situación la Unión Europea, en 1981 aprobó la Carta Europea del Litoral creando una experiencia piloto para los países miembros, denominada "impacto litoral" promoviendo una acción concertada en dicho ámbito.

Con posterioridad, en 1987 la "World Commission on Environment" elaboró el conocido informe "Brundtland" donde aparece el concepto de desarrollo sostenible en el que se formulan

sus tres principios fundamentales, de aplicación directa a la gestión integrada del ámbito litoral:

- Mantenimiento de los procesos ecológicos esenciales y sistemas de desarrollo de la vida. Lo que evidentemente presupone conocerlos y monitorizarlos adecuadamente.
- Preservación de la biodiversidad genética y biológica. Estableciendo las necesarias diferencias en su tratamiento en los diferentes niveles de desarrollo y complejidad de los seres vivos.
- Utilización sostenible de los espacios y de los ecosistemas. Colocando al hombre como centro de todas las actuaciones, en una concepción humanista de la gestión integrada, acorde con los principios básicos que sustentan la civilización occidental y las bases de la Unión Europea, con principios básicos que tienen al hombre como centro de atención principal. (Otras culturas, tan respetables como la occidental, se apoyan en otros valores, lícitos también, sin duda, pero diferentes).

Poco después en la Conferencia de Río Janeiro de 1992, convocada por la ONU, sobre Desarrollo y Medio Ambiente (UNCED), se confirmaron dichos principios, siendo la Agenda 21 el plan de acción de dicha conferencia. Pero también al mismo tiempo, en el año 1992 se redacta el Tratado de Maastricht, donde se adopta como objetivo el crecimiento sostenible que respete el medio ambiente y la introducción de los principios de cautela, de subsidiariedad y de proporcionalidad. Más adelante, se redactó en el año 1995 el informe Dobris sobre el Medio Ambiente en Europa en el que se estudia la situación del litoral europeo, proponiendo la adopción de una política que compatibilice las actividades humanas con el medio ambiente y teniendo en cuenta las necesidades económicas locales.

Pero es más adelante cuando, en la Unión Europea, se ponen en marcha diferentes programas de demostración de la gestión integrada del litoral. De este modo se llegó al Tratado de Amsterdam en 1999, donde se estableció como objetivo el conseguir un crecimiento sostenible y no inflacionista que respete el medio ambiente. Todas estas conclusiones se plasman



**FIGURA 3.** Acantilado de Los Gigantes (forma costera de erosión).

en enero de 2001 en el documento COM (2001) 31 final como propuesta de la nueva estrategia europea en el medio ambiente. Asimismo en el año 2000 se aprobó en la UE la Directiva Marco del Agua que está relacionada con la gestión litoral especialmente en lo que se refiere a las aguas de transición, de la desembocadura de los ríos, costeras y portuarias.

Al año siguiente se promulga por la Unión Europea la importante Recomendación 2002/413/CE de aplicación de la gestión integrada de las zonas costeras en Europa de gran trascendencia para la evolución de la gestión del litoral. En paralelo a los preparativos de esta Recomendación se forma un grupo de investigación sobre los crecientes efectos de la erosión en el litoral europeo redactándose una serie de importantes informes aplicando criterios de dicha Directiva entre los que cabría destacar: "A guide to coastal erosion Management practices in Europe. Lessons learned. Final version (Mayo de 2004)" y la importante "Development of a Guideline Document on Strategical Environment Assessment. (SEA) and Coastal Erosion. Final report. (Noviembre de 2004)". De este modo se empieza a relacionar la gestión integrada sostenible del litoral con la evaluación ambiental estratégica en relación con la cual se promulgó la importante Directiva 2001/42/CE de implantación de la SEA que ha tenido su aplicación en España mediante la Ley 9 /2006, de 28 de Abril, sobre evaluación de determinados planes y programas.

### 3. CONCEPTOS Y METODOLOGÍAS ACTUALES DE LA GESTIÓN INTEGRADA SOSTENIBLE DEL LITORAL

En la documentación de la estrategia europea para la IZCM (Integrated Zone Coast Management) en español Gestión Integrada de Zonas Litorales (GIZL), se afirma que: "el concepto de desarrollo sostenible se basa en la asunción de que el bienestar económico, la justicia social y la protección del medio ambiente son indisociables a largo plazo". Y también se dice en dicho documento: "la IZCM es un proceso dinámico, continuo e iterativo destinado a promover la gestión sostenible de las zonas costeras".

Por lo tanto, la IZCM (GIZL) asume y aplica dos conceptos fundamentales en la moderna gestión medioambiental, estableciendo la necesidad de contemplarlos conjuntamente: la gestión integrada y el desarrollo sostenible. Estos dos conceptos fundamentales e indisociables según las directrices emanadas de la Unión Europea para el establecimiento de las políticas que han de guiar la gestión del ámbito litoral en los espacios costeros europeos, cobran un gran protagonismo al más alto nivel estratégico como se puede observar en las Recomendaciones y Directivas de la Unión Europea, incluidas naturalmente las relativas a la ordenación del territorio.

La esencia fundamental de la sostenibilidad y tal vez su definición más clara se encuentra en el conocido informe Brundtland: "es posible conseguir un camino de desarrollo económico para la economía global que contemple las necesidades de las actuales generaciones, sin comprometer las oportunidades de las generaciones futuras, para satisfacer sus propias necesidades". De este modo la sostenibilidad ha pasado a ser un factor determinante en la forma en que los recursos, el medio ambiente, las cuestiones sociales y la justicia deban ser considerados en la toma de decisiones. Vemos así como esta nueva forma de pensar se ha convertido no sólo en una parte fundamental del nuevo proceso de toma de decisiones, sino también, en muchas naciones, en una realidad expresada en los programas políticos y plasmada en los cuerpos legislativos y reglamentos de aplicación. Al mismo tiempo, y como consecuencia de ello, cobran importancia dos cuestiones que pasan a ser fundamentales: la información técnica, con lo que ello

supone de inversión en toma de datos, modelización y monitorización, y los dilatados periodos de tiempo requeridos para completar los procesos de toma de decisiones, considerando y abriendo debate constructivo a todos aquellos individuos y colectivos afectados o con aportaciones sustanciales a considerar, al tener en cuenta el conjunto de los nuevos principios y muy en particular los relacionados con la sostenibilidad, sin por ello comprometer el desarrollo, imprescindible para mantener los niveles de empleo y crecimiento económico que permitan hacer sostenible la economía en su conjunto y muy en particular la financiación de la sociedad del bienestar y el mantenimiento del sistema de pensiones.

Compatibilizar sostenibilidad y desarrollo es el nuevo reto, es decir, el objetivo que debe inspirar las nuevas políticas litorales es el del desarrollo sostenible, de acuerdo con las recomendaciones establecidas recientemente por la Unión Europea, en vez de las ya obsoletas de "precaución, cautela...", que por otra parte debemos decir que en un medio fundamentalmente dinámico como es el medio litoral, resultan de fácil aplicación equivocada, pues hay que recordar que "no actuar en un medio dinámico es una opción de actuación", no siendo ciertas las tesis mantenidas por algunos aficionados autodidactas de que si no se hace nada todo sigue igual, eso sencillamente no es cierto, al menos en los medios dinámicos, y el medio litoral lo es por excelencia.

Es por ello que la sostenibilidad es la consideración principal de las actividades de estímulo al desarrollo actuales sobre las actuaciones que comprometen a las generaciones futuras. Como consecuencia de ello muchos planificadores relacionan los principios de la planificación con los del desarrollo sostenible. Ello es el embrión conceptual del nuevo concepto de la evaluación ambiental estratégica, que propone, como creemos es razonable, proceder a la evaluación ambiental de las actuaciones, incluidas como tales las no actuaciones, durante el proceso de planificación.

Por otra parte, el principio de la sostenibilidad incorpora diferentes ideas metodológicas y técnicas específicas de diversas disciplinas, siendo su objetivo principal el de conseguir el desarrollo multisectorial para progresar en la consecución de los objetivos con los menores costes generalizados y atrasos. La palabra integrado revela los intentos de las diferentes organizaciones para hacer trabajar a las distintas partes que componen la realidad dentro de un único sistema que es el proceso de planificación y gestión integrada.

Es indudable que el desarrollo sostenible de la costa debe basarse en un entendimiento adecuado de los procesos litorales apoyado en una técnica ingenieril bien fundamentada con datos suficientes. De este modo podría decirse que la gestión integral de las áreas litorales tiene por objeto la resolución de los problemas presentes y futuros en el litoral, encontrando un balance sostenible entre el bienestar económico y el medioambiental, apoyado en un análisis muy cuidadoso de los problemas sociales. Ello supone la integración de todas las políticas sectoriales y la integración en los procesos de todas las instancias administrativas pertinentes.

La integración de las Administraciones Públicas en la España postconstitucional, con el crecimiento de la Administración Autonómica, y las carencias de la Administración Local, constituye una asignatura pendiente de análisis en profundidad, lo que no es fácil dada la cadencia cuatrienal de los procesos electorales en España y la fragmentación ideológica entre los partidos que representan a la mayoría de la ciudadanía, lo que da pie a una sobrevaloración política de las minorías y de los localismos.

Asimismo resulta necesaria la integración de los elementos conceptuales que determinan los comportamientos del me-

dio físico en los ámbitos terrestre y marino, para poder comprender los que se dan en su borde o frontera, la Costa, y que precisamente por su carácter de borde, son de mayor complejidad, quedando fuera del alcance de los “no iniciados” en las técnicas correspondientes.

Dado que los procesos de participación pública no exigen, como es lógico, la adecuada cualificación técnica de todos aquellos que opinan, los procesos pueden resultar largos y tediosos, o lo que es peor encaminarse por el falso camino de atender a los que más problemas pueden crear ante la opinión pública que a los que más razones tienen, abriéndose un flanco injusto y de elevado coste en el largo plazo.

Podemos concluir que “la gestión integrada lo es en el tiempo y en el espacio y es intrínsecamente planificadora”. En este caso la palabra “planificación” debe entenderse en el sentido más amplio del desarrollo estratégico de políticas, y por supuesto comprende la evaluación ambiental estratégica.

La planificación litoral requiere un correcto conocimiento del sistema litoral y de sus tres subsistemas: físico y ambiental, institucional y económico. Ello implica determinar el área objeto de estudio, el tipo de planificación (estratégica o sectorial) y el ámbito geográfico de la planificación. Por ello, la planificación siempre deberá referirse a un “área litoral”, que es un ámbito en que confluyen muy diversas acciones que provocan todo tipo de efectos e impactos y que se hallan íntimamente relacionados entre sí, de modo que se puede afirmar que en un área litoral tienen presencia los componentes terrestres y marítimos, y además los específicos del carácter de borde o frontera, diferente según el grado de influencia mu-



FIGURA 4. Playa apoyada sobre un obra artificial que interrumpe, de manera parcial, el transporte sólido litoral.

tua, que es variable en el tiempo, a corto, medio y largo plazo, con funciones diferentes de relación, y que además, no tiene dimensiones uniformes.

El simple enunciado del marco sobre el que tienen competencias diversas administraciones, y que ha cobrado valor e interés en fechas relativamente recientes, pone de manifiesto la complejidad del problema.

El área litoral se puede definir siguiendo la definición recogida en la obra de (Kay, R. (1999) “Coastal Planning and Management”: “la franja de tierra seca y espacio oceánico adyacente (agua y tierra sumergida) en la que los procesos terrestres y los usos soportados por la tierra afectan directamente a los usos y procesos oceánicos y viceversa”.

En español distinguimos entre los términos “oceánico” y “de mar”, aunque con el paso del tiempo y la castellanización se ha quedado obsoleta la diferenciación entre “la mar oceánica” y “el pequeño mar mediterráneo”, también denominado “el gran río salado”, y que en el lenguaje marinero tradicional se resume en “la mar” y “el mar”. Creemos debiera, al menos, corregirse la extendida definición antedicha de Kay, R., y sustituir el “espacio oceánico” por “espacio marítimo”, que incluiría los conceptos de “la mar” y “el mar”.

Como una simple aplicación de la extendida definición anterior, surge el concepto de “grado de litoralidad”, que representa la magnitud de la interacción entre los procesos litorales y marítimos en relación a los terrestres, función ésta de la distancia de la costa terrestre inmediata. De esta forma, para el caso de una playa (lo que en España denominamos con mayor precisión científica “forma costera de depósito”), se podría representar la curva dibujada en la figura que se muestra a continuación, donde se representan los valores según los tres subsistemas integrantes del sistema litoral.

Por lo general, los límites de las áreas litorales se definen según el particular aspecto de la gestión litoral que se pretenda estudiar, es decir, el área litoral se define según el uso para el que se pretende gestionar y del propósito con el que se intenta dicha gestión, depende su definición. Ésta es una visión funcional, sin duda, pero poco científica. Nosotros nos aproximamos al concepto de litoral desde la óptica de la ingeniería civil de puertos y costas, pero desde muchos otros puntos de vista, la extensión del área litoral variará según las características de la materia a gestionar, por ejemplo, la población litoral, el turismo litoral, la estructura política del ámbito litoral en una región dada, etc.

En el marco de la gestión litoral, desde la óptica exclusiva de la ingeniería de costas, y al tener en cuenta el problema de la erosión, la Unión Europea ha formado el grupo de trabajo del proyecto “Eurosion”, que tras sus trabajos e investigaciones, utiliza varios conceptos para delimitación de las zonas de estudio para la gestión litoral integrada. El más importante, aunque ya relativamente conocido, es de la “célula de sedimentos litorales”, que son unidades o áreas litorales donde a lo largo de una determinada longitud de la costa y sus zonas adyacentes asociadas, el movimiento de sedimentos está localizado, acotado y limitado. Son unidades para el estudio de los procesos litorales, donde los procesos físicos son dependientes entre sí y ayudan al estudio y tratamiento de los problemas ingenieriles derivados de la erosión, de forma que las actuaciones que se lleven a cabo en cada una de ellas no afecte a las contiguas. Cada célula puede contener un conjunto de fuentes sedimentarias (acantilados erosionados, desembocadura de ríos...) reservas y sumideros de sedimentos (playas, cañones submarinos...). A este respecto, conviene mencionar el informe redactado por el grupo “Conscience”: “Coastal erosion control based on the concept of sediment cells” (Enero de 2010).

Según el informe de Eurosion: “Part IV. A guide to coastal erosion management practices in Europe. Lessons learned.

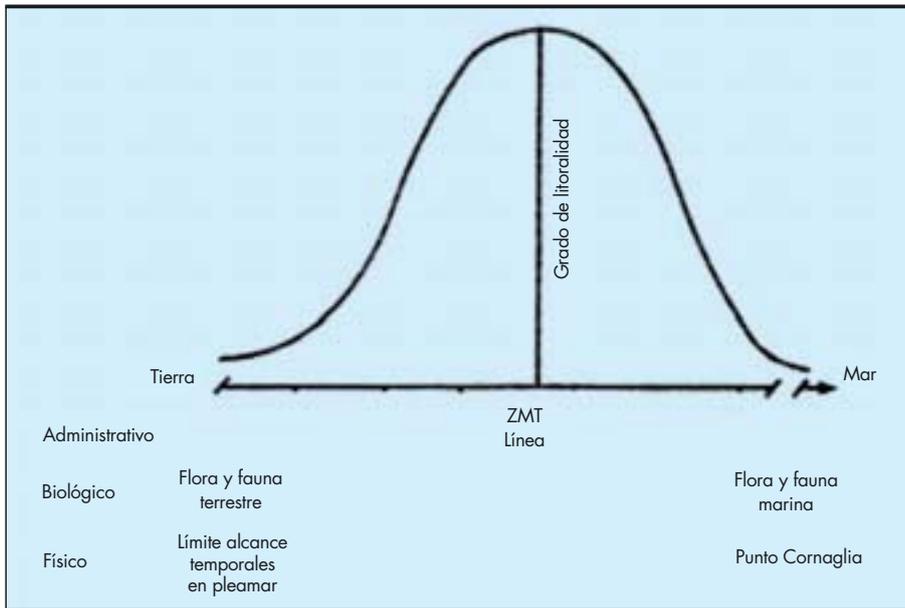


FIGURA 5. Grado de litoralidad para una costa.

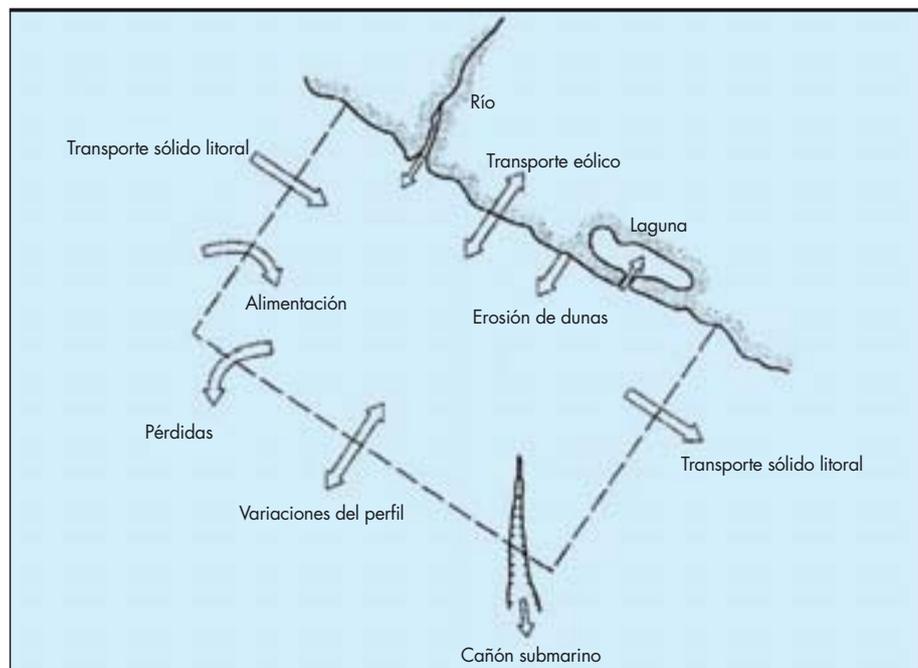


FIGURA 6. Célula de sedimentos litorales

Final version (Mayo de 2004), y basándose en el estudio de estas células litorales en diferentes lugares del litoral europeo como Normandía, Sussex, Holanda, etc., se afirma que para las obras litorales hay tres principios claves de gestión:

- Mantener la cantidad total de sedimentos (en reposo o en movimiento) dentro de cada célula litoral.
- Las medidas que se adopten han de favorecer los procesos naturales o afectarlos lo menos posible (solución blanda).
- Si no hay otra opción, se pueden utilizar obras rígidas (solución dura) para mantener los sedimentos en la célula.

Asimismo, el proyecto “Eurosion” utiliza otros conceptos, como son:

- Resistencia o elasticidad litoral (coastal resilience): que es la capacidad inherente a cada tramo de costa para adaptarse y restablecer su equilibrio ante los efectos de la erosión y los derivados del cambio climático, recuperando sus funciones ambientales en un plazo de tiempo adecuado.
- Reservas estratégicas de sedimentos (Strategic Sediment Reservoirs): son las reservas de sedimentos previstas en diferentes tramos de costa para restablecer el equilibrio litoral de sedimentos en cada célula litoral y conseguir así la resistencia litoral.
- Estado favorable de sedimentos: donde se denota la situación en que el balance favorable de sedimentos se halla equilibrado.

Por otra parte, conviene destacar cómo el adecuado tamaño de la célula litoral está en función de las necesidades del estudio que se pretende comenzar y del problema litoral en cuestión que hay que resolver.

Como ya se ha indicado con anterioridad, se halla en implantación la metodología de la gestión integrada sostenible del litoral en la Unión Europea, así como en otros lugares a lo largo del mundo. A este respecto conviene recordar la promulgación de la Recomendación 2002/413/CE sobre la GIZC (Gestión Integrada de Zonas Costeras), que, como elemento de planificación y gestión que es, admite los siguientes principios generales y estratégicos:

- El principio de la toma adecuada de decisiones, que no olvida los principios de precaución y prevención.
- El principio de actuación racional, que recoja los principios anteriores.
- El principio de la capacidad limitada, el cual afirma que todos los recursos naturales empiezan a sucumbir una vez superado un determinado umbral de utilización sin posibilidad de recuperación.
- El principio de valoración, que afirma que todos los recursos tienen un valor para el ser humano y cuando éstos se degradan, la sociedad pierde algo que tiene un valor (económico, social, cultural...), surgiendo entonces la cuestión de la metodología de la valoración (economía ambiental) muy útil en el proceso de toma de decisiones.
- El principio de responsabilidad compartida, en el que se determina el derecho y el deber de los ciudadanos, capacitados o ilustrados, a participar de algún modo en el proceso.
- El principio de recuperación patrimonial, que implica la necesidad de establecer pautas de planificación con las que sea posible recuperar parte del patrimonio costero perdido.
- El principio de desarrollo sostenible.

Nosotros entendemos que debiera complementarse con el estudio y análisis de las consecuencias que pudieran derivarse de las no actuaciones y que éstas fuesen la base de referencia para comparar con las diferentes alternativas de actuaciones planteadas y posibles.

El más amplio concepto de unidad fisiográfica, generalmente comprendida entre dos encuentros agua dulce-agua salada, puede incluir o no, una o varias células de sedimentos litorales.

La clasificación de formas costeras de Pedro Suárez Bores ayuda a comprender los procesos litorales que encuentran su mejor expresión en la formalización de la “matriz de evolución litoral”, ampliamente tratada en los textos de costas de Pedro Suárez Bores y de José Luis Almazán Gárate.

En consecuencia, se pretende que el proceso de planificación sea un proceso dinámico, adaptable a las circunstancias cambiantes y con una eficaz capacidad de adecuación a las realidades presentes, tanto sociales y económicas, como científicas y ambientales. Contempla, por lo tanto, la planificación y gestión en los tres ámbitos de los subsistemas litorales.

Asimismo, dentro del proceso de la gestión integrada se ha de mencionar el importante papel que los indicadores adecuados, correctamente monitorizados, juegan en cada etapa del proceso. El indicador es un eficaz instrumento de gestión ya que es un elemento de control de un proceso específico para el que ha sido diseñado. La monitorización adecuada de indicadores requiere el empleo de unos recursos económicos y de tiempo de los que, en general, no se dispone cuando se precisa decidir, motivo por el cual la Administración debiera adelantarse en el tiempo estableciendo un plan de monitorización de parámetros básicos correlables con otros necesarios en cada caso de aplicación concreta.

Debemos mencionar aquí, y en este sentido, el hecho de que España fue el primer país del mundo que planteó la instalación de una “red exterior de medida del oleaje” ya en el año 1968, con un planteamiento hoy plenamente vigente y no suficientemente comprendido por colectivos diversos. Pedro Suárez Bores y Luis Tejedor Martínez se adelantaron a su tiempo planteando esta red de medida de la que es variable principal de los procesos litorales y, por tanto, de conocimiento esencial para el adecuado planteamiento de cualquier política de gestión integrada del litoral con una mínima base científica.

En el aspecto ambiental, además del oleaje, variable principal, existen otras variables y parámetros indispensables, según el caso, que con la información adecuada ofrecen respuestas adecuadas sobre el problema en estudio en relación a sus causas, su situación y sus tendencias. El modelo principal propuesto corresponde al tipo de sistema-presión y en la actualidad se han introducido los sistemas de indicadores ambientales con un significado más amplio, aun cuando no se disponga de los recursos necesarios para poder abordar globalmente el problema en toda su complejidad.

Por otra parte, se puede observar cómo la Recomendación ya citada sobre la GIZC ofrece una oportunidad de potenciar la interacción mar / tierra desde la perspectiva del desarrollo sostenible del mismo modo que lo hace la política marítima de la UE.

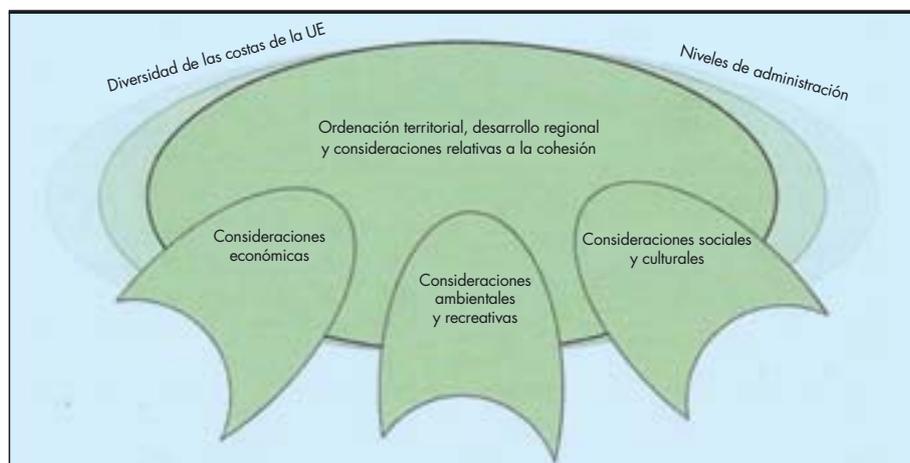


FIGURA 7. Esquema de la gestión integrada.

La estrategia temática para la protección del medioambiente marino se ocupa de la interacción tierra/mar, dando prioridad a la buena calidad ambiental de las regiones marinas valiéndose de la noción de ecosistema. Es reconocido que el 80% de la contaminación oceánica es el resultado de actividades humanas desarrolladas en tierra. En realidad, puede afirmarse que nos enfrentamos al reto de hallar un equilibrio entre el crecimiento económico y la explotación de los mares, por un lado, y la protección del medioambiente oceánico, por otro. La reciente publicación de la Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de protección del medio marino trata de dar respuesta a estos aspectos.

En otro aspecto, es necesario destacar la importancia de la implantación de la Evaluación Ambiental Estratégica (SEA) como una metodología que controla e implanta el concepto de desarrollo sostenible desde el origen o nacimiento de las ideas, con el respeto al medioambiente en los procesos de establecimiento de políticas, planes y programas. En este sentido, la Unión Europea ha promulgado la Directiva 2001/42/CE para la implantación de la SEA a los más altos niveles estratégicos de toma de decisiones.

En el ya mencionado programa "Eurosion" de la UE se investiga la situación de la erosión en el litoral y se estudia la implicación y la coordinación de la metodología del SEA con los proyectos de defensa en el litoral.

Puede considerarse al SEA como un instrumento de planeamiento basado en el desarrollo sostenible y la ordenación del territorio. Se puede utilizar en la gestión integrada para la toma de decisiones, ya que permite a los gestores considerar las cuestiones ambientales en los aspectos litorales al mismo nivel que los otros aspectos de la planificación tradicional del desarrollo, que hoy no debiera entenderse si no es sostenible.

Por otra parte, el SEA aparece como una forma de remediar y superar las limitaciones del EIA tradicional, teniendo en cuenta temas tan fundamentales como el estudio de alternativas, los impactos acumulativos y sinérgicos y determinados aspectos de la localización estratégica. Identifica amenazas y oportunidades para la biodiversidad en las etapas iniciales del proceso de toma de decisiones. Asimismo, permite tener en consideración los aspectos ambientales al mismo nivel que los económicos y sociales desde el principio de la planificación. Si el EIA se desarrolla como un procedimiento analítico limitado en el tiempo, el SEA debe ser entendido como un proceso integrado y continuo. Esta integración ambiental se realiza mediante una interacción positiva y creativa entre la planificación y la evaluación.

Insistimos aquí en la importancia que, a nuestro entender, tiene la evaluación de las actuaciones que, como reiteradamente hemos indicado, en los medios dinámicos supone una modalidad de actuación.

Otra técnica ampliamente utilizada en la actualidad en la gestión litoral es la asociada a la teoría del riesgo. Como su propio nombre sugiere, la evaluación del riesgo y del peligro se deduce de la evaluación de la probabilidad de que determinados acontecimientos tengan lugar y la evaluación del impacto potencial negativo sobre las personas, las propiedades y el medioambiente.

En la actualidad, el concepto de gestión del riesgo está muy difundido. Su desarrollo implica unas etapas similares a las utilizadas en la planificación estratégica del litoral: alcance e investigación, análisis, mitigación y control. El elemento clave es el papel central de la medida real o de la evaluación de la percepción del riesgo y de su comunicación o plasmación. El método intenta basarse en la evaluación de la eficiencia económica de las medidas de mitigación del riesgo mediante las técnicas de evaluación económicas adecuadas.

La valoración del riesgo considera al riesgo ambiental como el impacto potencial ambiental cuando a sus componen-

tes se añade la probabilidad de que realmente tenga lugar. En este punto, la utilización del SEA se convierte en un análisis del riesgo. De este modo, una técnica tan extendida como la ERA (Environmental Risk Assessment) utiliza un enfoque probabilístico para la cuantificación de efectos y requiere modelos de predicción adecuados de gran complejidad, dada la dificultad de manejar distribuciones de probabilidad conjuntas dependientes, a su vez, de variables definidas en términos probabilísticos.

En este sentido, el MSM (Método Sistemático Multivariado), que incluye la teoría del riesgo, del Prof. Pedro Suárez Bores, supone un enorme avance conceptual pendiente aún de alcanzar un uso generalizado y que, con las tesis doctorales de José Luis Almazán Gárate y Ricardo Arribas de Paz, ha probado su utilidad en la resolución de problemas económico-financieros, político-sociales y ambientales, además de en el ámbito portuario, donde se gestó inicialmente.

Como es lógico, el estudio de los riesgos incluye su evaluación, su comunicación y su gestión adecuada. El proceso de evaluación del riesgo se compone, por lo general, de 4 fases fundamentales:

1. Identificación del peligro y de su fuente.
2. Caracterización del tipo de riesgo, determinando la relación causa-efecto.
3. La exposición al peligro y su probabilidad.
4. Caracterización del efecto que corresponde al fallo correspondiente.

Se puede afirmar que el riesgo depende de su probabilidad de ocurrencia y valoración de sus consecuencias. Depende de la calidad o valor intrínseco del factor ambiental afectado y de su vulnerabilidad, que es una variable relacionada (correlada) con la fragilidad del factor que indica la facilidad y magnitud con que se puede agotar el mismo, que falta a la sostenibilidad.

#### **RIESGO = Probabilidad de fallos x Daños probables caso de fallo**

Un factor de ayuda importante es la confección de los planes de riesgo. Su confección se basa principalmente en una evaluación de daños fundamentada en predicciones de los parámetros significantes del cambio de las variables consideradas en el área litoral objeto de estudio, lo que incluye toma de datos en el tiempo.

Resulta obvio que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen una herramienta muy adecuada para el manejo de estos complejos sistemas de variables, en su mayor parte, georreferenciadas.

Se puede resumir el concepto de riesgo como otro aspecto fundamental que está en relación a las metodologías existentes en materia de evaluación económica asociada a los efectos derivados de los procesos litorales, sus posibles medidas de mitigación asociadas a su coste generalizado y sostenibilidad de las medidas. El método de evaluación económico más simple utilizado es el de coste-beneficio. El grupo de trabajo "Eurosion" de la UE ha redactado en 2004 dos informes al respecto en coordinación con la GIZC:

- Part 5.2. "Guidance document for quick Hazard assessment of coastal erosion and associated flooding".
- Part 5.3. "Guidelines for incorporating cost-benefit analysis into the implementation of shoreline management means".

Cabe señalar que los planes de gestión de riesgo de inundación en la UE deben situarse dentro del mismo marco temporal que los planes de gestión para los cursos de agua dulce. Estos se deben integrar en los planes de gestión de la cuenca

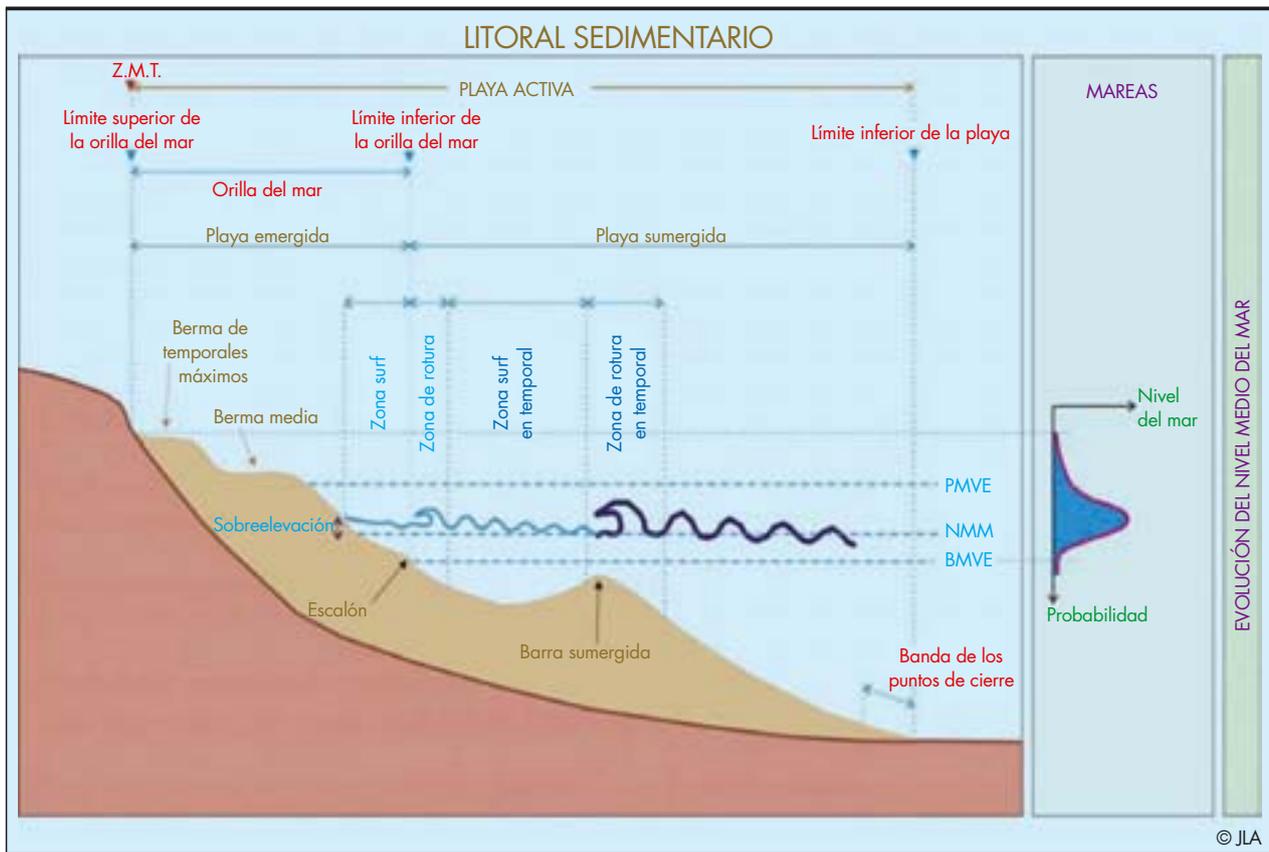


FIGURA 8. Elementos en sección de una forma costera de depósito.

hidrográfica y los programas de medidas establecidas con la Directiva Marco del Agua de la UE. Las inundaciones costeras y el cambio climático se tratan en los estudios de la UE (ESPON, 2005) por medio del análisis de mareas tormentosas (subida del nivel del mar debidas a vientos de mar y bajas presiones persistentes) y de los fuertes temporales extremos de invierno. En este aspecto conviene mencionar la Directiva 2007/60/CE de gestión de las inundaciones de la UE. En el mismo sentido también conviene mencionar otra publicación de la UE denominada "Climate change and water, coasts and marine issues. White paper. Adapting to climate change towards an European Framework for action" (Brussels, 1-4-2009).

En los documentos de la UE sobre la gestión litoral se hace una mención especial al diseño urbano sostenible y su relación con el cambio climático. En relación al indiscutible hecho del cambio climático, debemos aclarar el confusiónismo generalizado en la opinión pública mal informada, que lo trata erróneamente de relacionar con la subida del nivel del mar (como si esta variación fuese determinante en los procesos litorales), independientemente del tipo de costa considerado.

Bastan tres comentarios al respecto, cuanto menos hielo por calentamiento global, más vapor de agua en la atmósfera. En muchas "cuentas de la vieja" se suma el agua derretida del hielo flotante, como si un vaso de agua con hielo rebosase al derretirse el hielo, pero lo que es aún mucho peor cuando se está contemplando la gestión litoral, es que en el ámbito litoral lo que realmente interesa es la posición relativa tierra-mar y no el nivel absoluto del mar, ya que la tierra, tanto como consecuencia de los procesos erosivos, como por los mo-

vimientos sísmicos y los procesos de deriva continental, experimentan variaciones verticales significativas en uno u otro sentido que han de ser consideradas y que hacen irrelevantes las derivadas del cambio climático, caso que éste supusiese en verdad una subida generalizada del nivel del mar y no una bajada por exceso de evaporización.

En todo caso, está fuera de duda que el proceso de calentamiento global que nos toca vivir en el periodo actual conlleva mayores periodos de sequía y más numerosas y fuertes tormentas, lo que probablemente debiera haber conducido a una más activa política de obras de regulación hídrica y, desde luego, de medidas de prevención de la erosión litoral, no por la subida (o bajada del nivel del mar), sino por la mayor intensidad que en el futuro cabe esperar de las tormentas.

La UE insta a los estados miembros a asegurar que sus sistemas de ordenación territorial se basen en modelos urbanísticos sostenibles que tengan en cuenta los riesgos ambientales. En este sentido, se han de mencionar los trabajos del grupo Conscience en la UE, en especial su informe M. Marchand "Setback lines for the Mediterranean and Europe: an integrated approach" (2009), en el que se introduce el concepto de las setback lines para la gestión urbanística sostenible en el litoral basado en conceptos técnicos y ambientales y no en criterios urbanísticos como en la Ley 22/1988, de Costas. Asimismo, también el trabajo redactado por (8) Graaf, J. van de "Developing a building policy for the erosion zone. Solutions to some key questions" (2008). En este sentido se hace mención al trabajo de estos autores: Almazán Gárate, José Luis; Foradada Rodríguez, Carlos: "Perspectiva actual de una gestión integrada del urbanismo en el litoral" (2009).

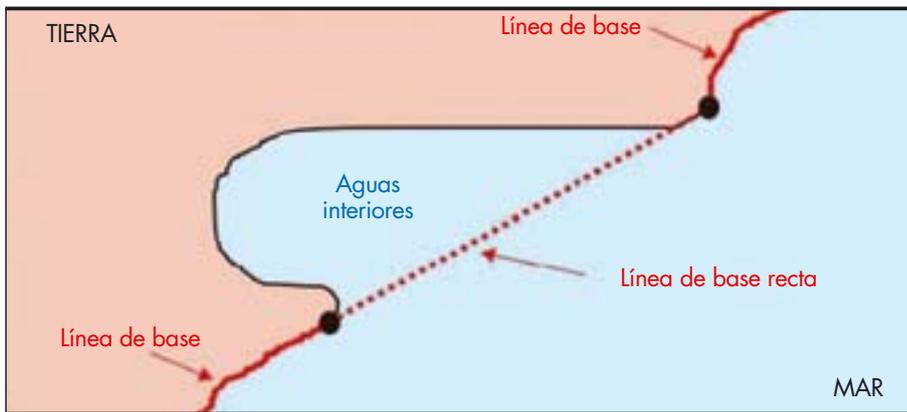


FIGURA 9. Aguas interiores y líneas de base rectas.

#### 4. COORDINACIÓN E INTEGRACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PLANIFICACIÓN LITORAL

Es obvio intuir las grandes posibilidades de gestión litoral que ofrece la integración (parcial o conjunta) de las diferentes metodologías de aplicación sugeridas en el conjunto de las Recomendaciones y Directivas de la UE.

Tal puede ser el caso de la coordinación entre la GIZC y la Directiva Marco del Agua (aguas costeras y de transición) y las Directivas sobre hábitats. Esta conjunción de los sistemas de agua dulce y marinos pretende reducir las cargas de contaminantes y una mejora de las condiciones en los estuarios. Pero la complejidad del sistema marino determina la

necesidad de iniciativas de gestión integrada a una escala aún mayor para la gestión efectiva de los sistemas costeros, terrestres y marinos a medio y largo plazo.

Para ello es necesaria una coordinación con la estrategia marina europea que se ha plasmado en la promulgación por la UE de la Directiva 2008/56/CE Marco de la Estrategia Marina. Esta Directiva se ha reflejado recientemente en España en la Ley 41/2010, de 29 de Diciembre.

Por otra parte, conviene destacar que la gestión integrada del litoral se considera como el proceso más adecuado para hacer frente a los retos actuales y futuros que se plantean en las costas pertenecientes a países en los que, por su situación geográfica (latitudes medias) y situación de estabilidad político-

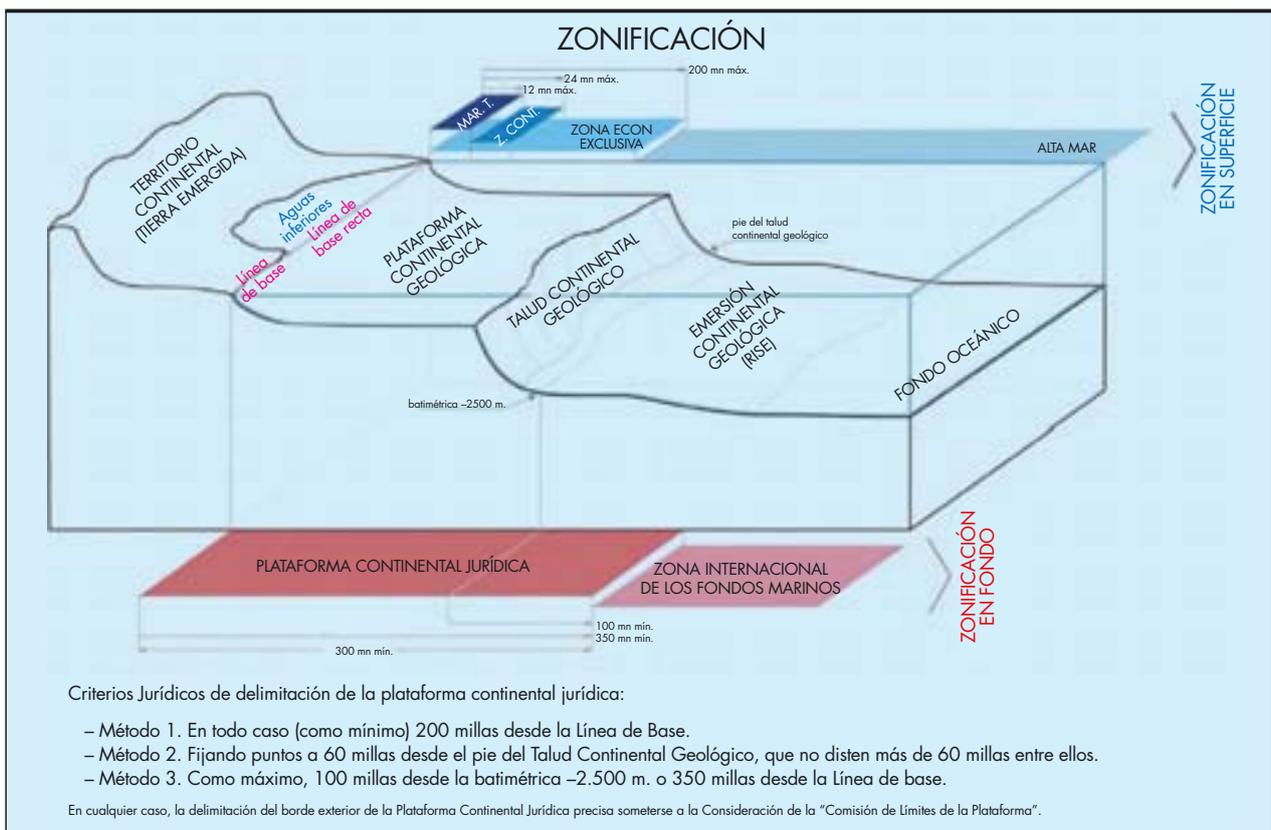


FIGURA 10. Zonificación de los espacios marinos

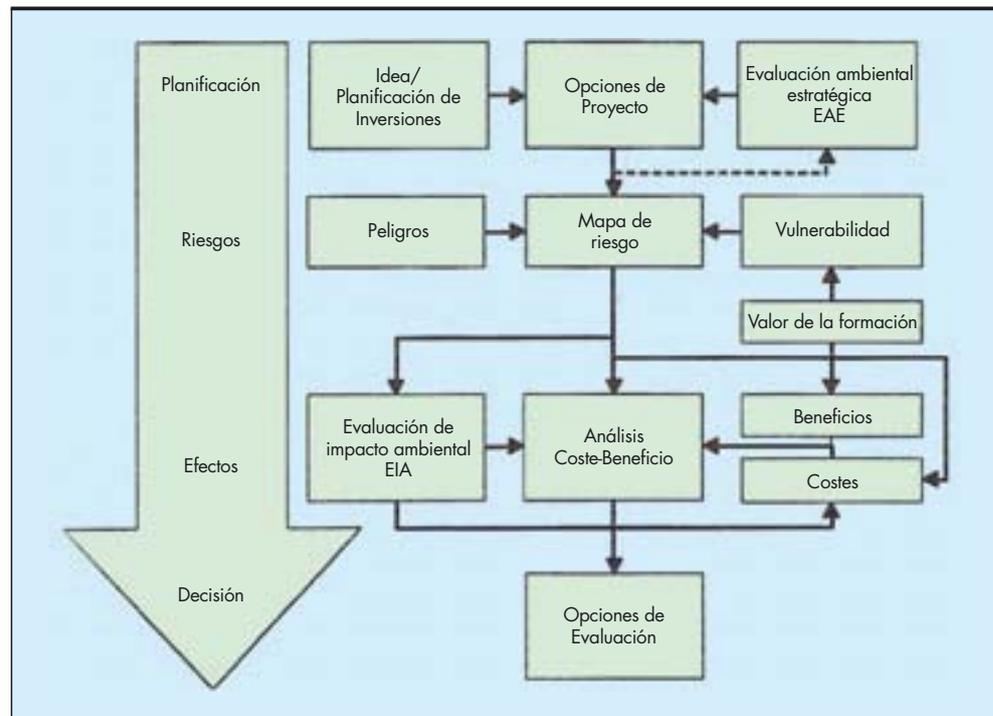


FIGURA 11. Integración de la SEA, teoría del riesgo y CBA.

social (seguridad física y jurídica), han conseguido que entre en valor la Costa, es decir, lugar que fue peligroso e inhabitable, pasando a transformarse en un recurso económico de primera magnitud y motor del desarrollo económico y generación de empleo, momento en el que surgen los conflictos de intereses y se hace precisa una adecuada gestión de la Administración para conciliar y preservar los distintos intereses en juego, haciéndolo de forma acorde con las normas generales de obligado cumplimiento para todos, con equidad y justicia.

Se trata de un proceso político activo dirigido a resolver los conflictos de intereses que existen entorno a estos espacios y los recursos costeros, de elevado valor en ciertas zonas, además de encontrar el necesario equilibrio entre los intereses económicos a corto plazo, los intereses ambientales a medio plazo y la sostenibilidad a largo plazo.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen una herramienta de enorme utilidad, si bien es cierto que cargar de datos esta herramienta, y mantenerlos actualizados, monitorizando las variables adecuadas para el correcto manejo de los modelos correspondientes, es un proceso costoso en tiempo y recursos humanos y materiales que requiere una coordinación y actuación conjunta entre las diferentes Administraciones implicadas. La evaluación ambiental estratégica (SEA) juega un importante papel en todo este proceso de integración necesario para la GIZC.

La GIZC interrelaciona los procesos litorales con la gestión del riesgo y debe velar por la integración estratégica y sostenibilidad de los proyectos de desarrollo y defensa litoral, prediciendo situaciones futuras y evaluando sus impactos previsibles (escenarios), junto a sus posibles peligros asociados (incertidumbre).

Finalmente, los criterios de evaluación económica generalizados (financiero-económico-social) deben integrarse en el proceso, dadas las necesarias limitaciones de recursos que se dan, incluido el sistema litoral como recurso escaso, que lo es, y, por tanto, bien económico y, por supuesto, las limitaciones de las Administraciones que, en definitiva, en el mundo occi-

dental en que se inscriben los países de la UE, como España, no tienen función generadora, sino redistributiva, con equidad, y propiciando las condiciones en el sistema económico para que éste se desarrolle por sí mismo.

En la actualidad, existen en la UE diferentes grupos de trabajo, entre los que es preciso destacar el grupo Conscience e Interreg-III, que pretenden coordinar e integrar la GIZC, la SEA y la teoría del riesgo. En este punto es necesario indicar el informe del grupo Interreg III-C- Messina. "Engineering the shoreline. Introducing environmentally engineering techniques through the World" (Julio de 2006). En este campo investigan actualmente estos autores con la metodología integradora de la GIZC. La tesis doctoral en preparación de Carlos Foradada Rodríguez dirigida por el Prof. José Luis Almazán Gárate, cubre estos aspectos en profundidad y detalle.

## 5. CONCLUSIONES

La gestión integrada del litoral es complicada, necesaria y comprometida, debido a que se desenvuelve en un medio dinámico, vulnerable y de difícil equilibrio.

Por otra parte los procesos de consolidación de la propiedad en terrenos de geometría variable, que suponen importantes presiones económicas, ni están suficientemente desarrollados ni han calado en el cuerpo legislativo. Todo ello hace que su gestión sea un problema difícil y complejo.

El método más aceptado para la gestión integrada del litoral, todavía en estudio de implantación, es el de la gestión integrada sostenible (GIZC) que, entendemos, debe coordinarse con el SEA y con la teoría del riesgo. Dentro de este método los SIG constituyen una herramienta imprescindible pero de elevado coste de implantación y, sobre todo, mantenimiento y actualización. Estos trabajos e investigaciones, inspirados en la ideología que emana de las recomendaciones de la UE, abren una perspectiva esperanzadora para la resolución de los complejos problemas del litoral. El reto es importante y la situación esperanzadora.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Almazán Gárate, J. L.; Lacleta Muñoz, J.M.; Estepa Montero, M. "El Régimen Jurídico de los Espacios Marinos en Derecho Español e Internacional". Madrid. 2009.

Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón M. C.; Márquez Caba, H. A. "Sistemas de información geográfica en la gestión integral del litoral". Edit. E.T.S. Ing. Caminos, C. y P. 2009.

Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón M. C.; García Montes, J. R. "Introducción al diseño de obras de defensa de formas costeras de depósito". Edit. E.T.S. Ing. Caminos, C. y P. 2000.

Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón, M. C. "Introducción a la Ingeniería Portuaria: Sistema Portuario Español. Obras Exteriores." Edit. E.T.S. Ing. Caminos, C. y P. Madrid. 2000.

Almazán Gárate, J. L.; Palomino Monzón, M. C. "Descripción, medida y análisis del oleaje". Edit. E.T.S. Ing. Caminos, C. y P. Madrid. 2000.

Almazán, José Luis; Foradada, Carlos "Perspectiva actual de una gestión integrada del urbanismo en el litoral" (2009).

Almazán Gárate, J. L. "Posicionamiento y navegación de precisión en 2D y 3D: batimetrías de alta precisión". Edit. E.T.S. Ing. Caminos, C. y P. 2002.

Almazán, José Luis; Foradada, Carlos "Perspectiva actual de una gestión integrada del urbanismo en el litoral", IV Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, Málaga, 2010.

Berkeley, R., Roberts, A.G. "Obras de defensa y protección del litoral". MOPU; Dirección General de Puertos y Costas, 1987.

Conscience. Marchand, M "Setback lines for the Mediterranean and Europe: an integrated approach"(2009).

Kay, R (1999) "Coastal planning and Management" Spon PressTaylor&London.

Interreg III-C. Messina "Engineering the shoreline. Introducing environmentally engineering techniques throught the world" (Julio de 2006).

King, C.A.M. "Beaches and Coasts". Edward Arnold Publishers. Londres. 1972.

Lechuga Álvaro, A., Almazán Gárate, J. L.; "Infraestructuras e integración ambiental", IV Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, Málaga, 2010.

Lechuga Álvaro, A., "Las playas y la integración ambiental: Una perspectiva global", IV Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, Málaga, 2010.

Lechuga Álvaro, A., De la Peña Olivas, J.M., Sánchez Palomar, F.J. "Propuesta de ordenación de la costa de Málaga", I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Madrid. 2002.

Lechuga, A.; De La Peña, J. M., y Sánchez F. J. (2000). Plan de Actuaciones en la Costa de Málaga. Evaluación Inicial del Estado Evolutivo de la Costa de Málaga, Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, informe técnico núm. 22-400-5-092 para la Dirección General de Costas.

Lechuga, A. (1999). «¿Hay que defender las playas? Una reflexión», Revista de Ingeniería Civil, núm. 113, pp. 131 a 136.

Program Eurosion "Part 5.2.Guidance document for quick hazard assessment of coastal erosion and associated flooding" (2004).

Programa Eurosion: "Part IV. A guide to coastal erosion management practices in Europe. Lessons learned. Final version" Mayo de 2004.

Programa Eurosion. "Part 5.3. Guidelines for incorporating cost-benefit analysis into the implementation of shoreline management means" (2004).

Silvester, R. Hsu, J.R.C. "Coastal Stabilization". PTR Prentice Hall, INC, Englewood Cliffs, NJ.

Van Rijn, L., "Principles of coastal Morphology". Aqua Publications. 1993.

Winckel, P.R.; Vrijling, J.K.; Graaf, J. van de (2008) "Developing a building policy for the erosion zone. Solutions to some key questions". Coastal Engineering 55 (2008) 79-92.

Su conexión ágil, rápida y segura con Europa, con el mundo

Barcelona  Europa

Servicios Portuarios - Avanzados en Barcelona.

El Port de Barcelona es un puerto preparado para el futuro. Porque tiene una plataforma de comercio electrónico innovadora, una herramienta de gestión en línea que nos permite eliminar el papel y acelerar procesos. Porque está creciendo día tras día, ampliando espacios, multiplicando recursos, generando más y más actividad. En pocas palabras, porque se ha convertido en un puerto con más capacidad, flexibilidad y sostenibilidad. Descubre una de las conexiones más avanzadas de Europa.

Una conexión nunca vista

- ◆ El primer puerto español en tráfico internacional
- ◆ El puerto referencia del Mediterráneo y sur de Europa
- ◆ El puerto de cruceros nº 1 de Europa y el cuarto del mundo
- ◆ El primer puerto en obtener la certificación de calidad ISO 9001

  
Port de Barcelona  
www.portdebarcelona.es



# Bienvenidos a un nuevo mundo

Un mundo más cercano, donde la distancia se mide en calidad de servicio. Donde el futuro se mide en tecnología y en cuidado del medio ambiente. Un nuevo mundo donde nuestros clientes son el eje de toda nuestra vocación de excelencia.

Bienvenidos a **Valenciaport**



valenciaport  
Autoridad Portuaria de Valencia  
[www.valenciaport.com](http://www.valenciaport.com)



# Ferrol

Puerto Logístico del Atlántico



**Puerto Exterior (Prioriño)**  
1500m de muelle con 20 m de calado  
89,3 Hec de explanadas portuarias




**UNIÓN EUROPEA**  
Los obras del Puerto Exterior de Ferrol y sus actuaciones complementarias, cofinanciadas mediante los Fondos FEDER y los Fondos de Cohesión de la Unión Europea, contribuyen a reducir las desigualdades sociales y económicas entre las comunidades de la unión.

Una manera de hacer Europa

# El problema del deslinde de la zona marítimo terrestre

J. JAVIER DíEZ (\*) y J. VÍCTOR MONNOT (\*\*)

**RESUMEN** Se aborda el origen y la realidad del demanio costero y de su deslinde respecto del resto de las tierras firmes; se reflexiona sobre la capacidad de la clasificación genética de Pedro Suarez Bores para ilustrarlo y determinarlo.

## 1. INTRODUCCIÓN. REFERENCIA HISTÓRICA Y ANTECEDENTES

Desde siempre, las *zonas costeras* han constituido un hábitat selectivamente primordial para la especie, alternativamente seleccionadas para el establecimiento de sus asentamientos sólo incomodados en algunas de ellas por agresores o por excesiva humedad; y en la época romana, al ser calificadas como *res communis omnium*, se reconocía ya su libre utilización e incluso apropiación por los particulares.

Posteriormente, razones de seguridad y soberanía desvelaron el extraordinario valor estratégico de estas interfases territoriales, decidiéndose en consecuencia que el mar territorial, las playas y luego otras unidades geomorfológicas se fueran progresivamente sustrayendo del comercio de los hombres para incorporarse al Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT). De este proceso de publicación, interesa destacar la progresiva tecnificación de la definición legal del demanio marítimo-terrestre. En efecto, en el Digesto romano<sup>1</sup> (Siglo VI d.C.), la extensión física asimilable quedaba subsumida en la imprecisa referencia a “*las costas del mar*”<sup>2</sup>, simplemente. Siglos después, Alfonso X concretó en sus Siete Partidas (año 1256) el límite lado tierra del “*mar y su ribera*”, que entonces se definieron como aquel lugar que “*se cubre por agua de [mar], cuanto más crece en todo el año, en cualquier tiempo, ya sea verano o invierno*”. Definiciones posteriores tomadas en las Ordenanzas de la Marina de Colbert (1681) anudan dicho alcance de las olas a mareas específicas en condiciones equinocciales. Ya en nuestros días, las leyes costeras con más carga ingenieril están comenzando a introducir elementos probabilísticos y otros conceptos de tasa anual de erosión.

1 El Digesto es una obra maestra del Derecho romano que alcanza con ella su máximo esplendor en el Imperio Bizantino con el Emperador Justiniano (527–565 d.C.). Pertenece a una compilación legal más amplia, el *Corpus Iuris*, del que es una de sus cuatro partes (Instituciones; Digesto; *Codex*; *Novellae*). A su vez, el Digesto es una compilación en 50 libros donde se recogen las obras de los juristas de la etapa clásica seleccionadas por materias.

2 **D.41.7.3.** “*Las costas del mar, en las que tiene imperio el pueblo romano, creo que son de éste; que todos los hombres tienen un derecho a usar en común el mar, como del aire*”.

La Ley de Aguas de 1866, reguló conjuntamente las aguas marítimas y las continentales<sup>3</sup>; el mismo trato se dio a las playas, justificando su inclusión en el demanio del Estado por la necesidad de proteger a la pesca y a la navegación<sup>4</sup>. Con la repentina revalorización de la costa como consecuencia, primero del basculamiento poblacional y de su actividad hacia las periferias costeras (Diez, 1981) y después de la explosión de la industria turística, se hace necesario revisar la embrionaria definición del DPMT esbozada en la Ley de Aguas de 1866. Esta evolución, tratan de encauzarla la Ley 28/1969, sobre Costas Marítimas, y luego el Constitución española (CE), que calificaría como “*bienes de dominio público estatal [...], en todo caso, la zona marítimo terrestre, las playas, el mar territorial, y los recursos naturales de la zona económica y la plataforma continental*” (Art. 132 CE). Finalmente, la Ley de Costas 22/1988 declara precisamente tener por objeto primordial la determinación, protección, utilización y policía del DPMT y especialmente de la ribera del mar (Art. 1.). En esta norma, sigue la tendencia expansiva de esta franja administrativa, pues se suman a ella, como se sabe, las siguientes pertenencias: la ribera del mar y de las rías, el mar territorial y las aguas interiores, los recursos naturales de la zona económica y la plataforma continental y finalmente los demás los bienes calificados como demaniales por la Ley. A su vez, declara que integran ahora “*la ribera del mar y de las rías*” las unidades geomorfológicas costeras, “*marismas, albuferas, marjales, esteros y, en general, los terrenos bajos que se inundan como consecuencia del flujo y reflujos de las mareas, de las olas o de la filtración del agua del mar*” (Art. 3.1.a) Ley 22/1988).

Sin duda, esta última ampliación del concepto de DPMT es fruto de la progresiva concienciación por parte de los ingenieros de la importancia de la morfodinámica para explicar la evolución de las costas. En efecto, en España, desde la inclusión específica de los estudios marítimos (portuarios en principio) en el currículo y nombre de carrera de la ICCP, la preocupación por la correcta determinación de las variables de diseño de las obras portuarias se vio acompañado por la de los cambios morfológicos que tales obras causaban (labor de los

3 Exposición de Motivos de la Ley de Aguas de 1866: “*la seguridad e independencia de [las Naciones] exige que se considere como parte del territorio la zona marítima contigua a sus playas*”.

4 Exposición de Motivos de la Ley de Aguas de 1866: “*al declarar también de dominio público de la Nación las playas se ha creído conveniente restablecer la disposición de nuestras antiguas leyes que, de acuerdo con las romanas, fijaban por límite aquél donde alcanzan las olas del mar en sus temporales ordinarios, espacio bastante para las necesidades de la navegación y de la pesca*”.

(\*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático en la UPM.

(\*\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

profesores Castro, Iribarren y s Bores), culminando este proceso en la propuesta de S Bores para clasificar las formas costeras (1975).

La comprensión de todo problema requiere en un primer lugar la identificación de las variables que lo rigen. En relación con el deslinde de costas, estas variables no son inmediatamente reconocibles, pues se entremezclan factores múltiples y de naturaleza distinta, física unos –dinámica y procesos litoral–, y administrativa otros –dominio público, por lo que resultan en principio dimensionalmente incongruentes. Sólo desde un estudio simultáneo –integrado– de ambas familias de factores se pueden identificar cuáles son los agentes presentes en ambas dimensiones del problema, que serán considerados como rectores del problema. Para abordar la dimensión física del problema, se recurrirá a la teoría de las formas costeras de Pedro Suárez Bores (PSB); respecto de la dimensión administrativa, consideraremos que se agota en el Digesto romano (siglo VI d.C.). Esta robustez temporal garantiza la objetividad del análisis en su dimensión administrativa.

## 2. EL SUSTRATO DEMANIAL COSTERO

El demanio costero es una franja geográfica cuyas dependencias extremas a ambos lados de la línea de costa son, respectivamente, las zonas marítimo-terrestre y marítimo-territorial. La observación del demanio costero a escala territorial arroja una franja de terreno monótona y lineal; un análisis más de detalle revelaría en su interior la existencia de una infinita sucesión de formas costeras singulares orgánicamente interconectadas y de cuya integración resulta el borde costero-litoral.

La génesis estricta de las costas responde evidentemente a la de unos continentes que ofrecen al avatar continuo de la fluidosfera sus bordes costeros como fachada. La formación de aquellos es tan remota y acumula ya tantos ciclos tectónicos que incorporarla al problema del deslinde de costas obligaría a considerar escalas de tiempo geológicas cuyas unidades no son homogéneas con las escalas temporales que rigen las sociedades humanas, quedando por tanto fuera de la problemática.

En efecto, los continentes están sometidos a transformaciones complejas –involucrando desde derivas tectónicas, acreciones litoferoclasticas, boyancia isostática, plegamientos sinclinales, acciones geodinámicas externas...– que modifican profundamente sus placas desde su interior hasta sus bordes costeros. Tipificar este conjunto de efectos con la evolución contemporánea de las costas es a todas las luces de gran complejidad; de ahí la pluralidad de clasificaciones de costas propuestas hasta el momento<sup>5</sup> y la escasa operatividad de cualquiera de ellas para un análisis suficientemente preciso y a la vez evolutivo de cada tramo de costa con el carácter requerido de “actualidad”. La originalidad del planteamiento de la Clasificación Genética de Formas Costeras Simples (CGFCS) de PSB consiste precisamente en la asunción de esta perspectiva contemporánea, resultando así de gran valor para reflexionar sobre la naturaleza intrínseca del deslinde de las costas.

Dando, pues, por permanente un periodo geológico dado, y siguiendo a PSB [1975], la génesis de las formas costeras puede ser estudiada con criterios basados en su análisis fisiográfico o morfodinámico desde la perspectiva de su estabilidad. PSB denominó “formas costeras” a todas las “*formaciones funcionales que constituyen el relieve del borde del mar y están influidas por alguno de sus agentes, aunque la acción de éstos, en algunos casos, no sea preponderante*”.

Por definición, un tramo de costa está en equilibrio cuando los caudales sólidos que ingresan en el tramo son iguales a los que salen de él. Cuando los aportes son superiores a las pérdidas, el tramo o playa será hiperestable, generándose formas de depósito, mientras que en caso contrario será inestable, prosperando las formas de erosión. Esta estabilidad suele presentar un carácter dinámico, ya que en general las partículas existentes en el tramo no son siempre las mismas, es decir, se renuevan. En otros casos, cuando ambos caudales, de aporte y pérdida, son nulos, la estabilidad, única alternativa posible, será estática, pues las partículas sólidas en el tramo son siempre las mismas. Caso particular de las costas de erosión son las costas estructurales con formas de erosión (cantiles o rasas) activas. Su morfología tiene una alta dependencia de la naturaleza de las rocas y de la disposición de sus estratos, en su caso. Pero siempre son costas en retroceso en las que su evolución conduce a “perdidas del demanio”, lo que genera un primer problema para la preservación de éste. El conocimiento de los procesos erosivos que les afectan puede basarse en la contemporaneidad de los agentes pero requiere del análisis geológico completo y de las clasificaciones de costas clásicas para entender las respuestas a los mismos de las estructuras rocosas, de sus microformas de erosión y de las macroformas resultantes.

El análisis de los mecanismos de transformación del sustrato ha sido el campo de la ingeniería de costas desde hace muchos años. Es así conocida la diferente respuesta a la meteorización y erosión de los distintos tipos de rocas, diferencia que se manifiesta tanto en la morfología de los acantilados sometidos a esta acción erosiva como en la naturaleza de los sedimentos generados y de su comportamiento cohesivo y también las diferentes acciones de los fenómenos derivados de la fluidodinámica planetaria, vinculada ésta fundamentalmente a factores de tipo astronómico –mareas (tides)– o climático –principalmente viento, oleaje, mareas (storm surge y set up) y, de otra forma, corrientes y afecciones a largo plazo del nivel del mar–.

Para el análisis de las formas de depósito, ya en los años 70, Pedro S. Bores formuló una versión primitiva de la hoy famosa ecuación de continuidad del transporte sedimentario, también conocida como “ecuación del balance sedimentario” (“*sand budget*” en la literatura anglosajona), aunque desde una perspectiva diferente a la acutal. En su formulación propia, tanto los aportes como las pérdidas de sedimentos en un tramo pueden ser de variada naturaleza. Además del transporte sólido litoral, originado por incidencia oblicua del oleaje ( $Q_a$ ) y/o por el gradiente de sobreelevación ( $Q_s$ ), que ingresan en el tramo por el extremo de barlovento ( $l_1$ ) y los que se van por el tramo de sotavento ( $l_2$ ), caben otros de naturaleza geomorfológica, biológica, química,... pudiéndose expresar la condición de estabilidad de un tramo de costa en la forma:

$$(Q_a + Q_s)_1 + q \cdot \Delta l = (Q_a + Q_s)_2$$

Donde ( $q$ ) es la resultante de todos los aportes y/o pérdidas por unidad de longitud excepto los correspondientes al transporte sólido litoral, y ( $\Delta l$ ) es la longitud del tramo.

En consecuencia, ambos caracteres –estabilidad y dinamismo– son consustanciales a la naturaleza de las formas de la costa y, recurriendo a la CGFCS, pueden ser correctamente analizadas desde el punto de vista de la contemporaneidad. Estos caracteres costeros de estabilidad y dinamismo trascienden al sustrato demanial, y parece que necesariamente deberán ser tenidos en cuenta a la hora de deslindarlo.

5 Cuchlaine A. M. King. Beaches and Coasts. Second Edition, 1972. Páginas 403 – 416.

### 3. MUTACIONES DEMANIALES

La anterior perspectiva, fisiográfica, permite destacar la importancia de los factores bio-químico-geomorfodinámicos en la generación y evolución de las formas costeras. Geomorfodinámica es la respuesta del *geo* (morfo) a las acciones (dinámicas) exteriores. Una característica esencial del *geo* es su resistencia o competencia. A lo largo del ciclo geológico, las rocas son meteorizadas y descompuestas por los agentes exógenos y producto de esta agresión es la generación de sedimentos. Estos detritos, fácilmente movilizados por la acción fluidodinámica<sup>6</sup> terminan alojándose donde cualquier singularidad reduzca su capacidad de transporte, a través del instituto civil de la acesión (deposición, decantación, sedimentación). El demanio costero no es extraño a tales procesos, y buena prueba de ello la encontramos en el Digesto y sus numerosas referencias al derecho de aluvión<sup>7</sup>.

#### 3.1. MUTACIONES DEMANIALES NATURALES

El aspecto fundamental identificable en el Digesto es el que afecta al nivel del mar en sus efectos sobre el demanio. Frente a las regresiones marinas que tienden a ampliar el sustrato costero descubriendo nuevos terrenos, las transgresiones, inversamente, hacen menguar dicho sustrato y, de su escasez resultante, surgen numerosos conflictos, a los que la perspectiva administrativa trata de dar solución a través de la inmemorial regla según la cual los terrenos definitivamente invadidos por el mar “abandonan” el comercio de los hombres<sup>8</sup>. De la misma manera se puede percibir en la perspectiva administrativa más allá del simple Digesto su progresiva tecnificación, ya apuntada antes, con la introducción a lo largo del tiempo de referencias a las mareas, a los oleajes y a otros agentes para la determinación de la extensión física de la zona marítimo-terrestre.

#### 3.2. MUTACIONES DEMANIALES ANTRÓPICAS

El desarrollo de las sociedades humanas, con la relevancia que en el tienen el incremento de la riqueza y de la población, ha conducido a la incorporación en el *geo* elementos estructurales y competentes que modifican el paisaje costero-litoral no sólo con su presencia sino con sus impactos en el resto de la costa. A modo de ejemplo, piénsese en la perturbación antropogénica de incidencia más directa que supone la estructura portuaria: ese apéndice artificial distorsiona la configuración geométrica original del litoral a la vez que pasa a ser parte en las relaciones orgánicas entre formas costeras interiores al demanio costero. Pero, si bien ciertamente se puede decir que las infraestructuras portuarias, devenidas absolutamente necesarias para el inexcusable progreso del transporte, son los primeros elementos modificadores –inmediata o mediatamente; directa o indirectamente– de la morfología costero-litoral, de ninguna manera pueden considerarse los únicos agentes antropogénicos que deban considerarse en este problema. Hoy es plenamente reconocida la capacidad del hombre para modificar las costas acomodándolas a sus necesidades, y hasta tal punto que numerosos autores lo consideran como una acción geomorfológica más, inducida por los aprovechamientos de los recursos costeros por parte de los hombres. Dichos usos o actividades basados en los recursos costeros se

clasificasen al menos en tres categorías<sup>9</sup>. Una primera categoría<sup>10</sup> que englobaría todas aquellas actividades de carácter primario, fundamentalmente pesca, agropecuaria, y extractiva mineral. Una segunda categoría que incluiría las actividades de carácter secundario o terciario, concretamente la industrial, la comercial y la de transporte<sup>11</sup>. Finalmente, en un tercer grupo podrían ubicarse aquellos usos destinados a la autosatisfacción individual o colectiva, incluida la del ocio: residenciales, deportivas y recreativas<sup>12</sup>.

Así, consecuencia de la evolución económica y social, aquél espacio físico deslindado como DPMT se ve obligado a asimilar nuevas variables concomitantes con las anteriores, pero que inciden sobre el mismo con una particular intensidad, agrediendo. La aparición de estas nuevas acciones terminan generando mutaciones demaniales que obligan, recurrente e inexorablemente a proceder a la actualización de los deslindes<sup>13</sup>.

### 4. CLASIFICACIÓN GENÉTICA Y DEMANIO COSTERO

Se ha hecho referencia antes a las dificultades, si no imposibilidad, de las clasificaciones de costas generales, todas de escala geológica, para explicar la evolución de las costas de depósito de manera operativa para la contemporaneidad requerida en la determinación del demanio; y ello por la ambigüedad actual del significado de los antecedentes geológicos que sirven para fundamentar tales clasificaciones. La clasificación genética de P Suarez Bores ilumina sin embargo la problemática demanial costera, pues permite caracterizar los deslindes costeros y predecir su evolución futura.

Pedro Suarez Bores, con el fin de advertir que su metodología no incorporaba las mareas, adjetivó como “simple” su clasificación genética de costas. Esta falta de consideración a las mareas y a los niveles del mar obliga a considerar cada producto de la clasificación como forma morfodinámica asociada a un nivel mareal potencial dado. (Ésta hipótesis simplificadora también fue asumida por los primeros deslindes clásicos<sup>14</sup>). Pero de ninguna manera significa ignorar el potencial configurador de la costa que se haya vinculado al nivel del mar y a sus cambios.

#### 4.1. ANÁLISIS EN ALZADO DE LA CGFCS: LA BARRA

Prescindir de la marea en la CGFCS significa fundamentalmente aceptar que la playa, origen de toda forma costera, es un producto natural<sup>15</sup> del oleaje. Asimismo, implica simplificar la determinación de la barra del perfil transversal de

6 (Esteban et al 2009, tesis doctoral).

7 **D.41.1.16.** “Consta que el derecho de acesión por aluvión no tiene lugar en los terrenos deslindados < a los que se ha asignado oficialmente unos límites>”.

8 **D.41.2.3.** (17) “Labeón y Nerva hijo respondían que yo dejo de poseer el lugar que haya inundado definitivamente el río o el mar”.

9 Javier Díez González. Memoria Anual del Curso 1980-1981. Universidad Politécnica de Valencia. Lección Inaugural del Curso. “La ordenación de las costas y la dinámica litoral. Referencias al País Valenciano”.

10 **D.8.4.13.**: “El vendedor del fundo Geroniano había establecido a favor del fundo Botriano, que retenía la prohibición de que frente a este último se practicara la pesca del atún [...]”.

11 **D.41.12.1.**: “Dice el pretor: <<Prohíbo que hagas o pongas en [el mar] o en su orilla algo que entorpezca o pueda entorpecer el estacionamiento o tránsito del navigio <o barca>[...]”.

12 **D.41.7.4.**: “Respondió Escévola que es lícito por derecho de gentes edificar en la costa, a no ser que se impida el uso público de la misma. (Scaev. 5 resp)”.

13 Como recientemente se ha llevado a cabo en España con el actual Plan de Deslindes, iniciado en 2004, y culminando en la actualidad.

14 **D.41.12.1.** (5) “La orilla se define propiamente como lo que contiene al [mar] deteniendo la natural expansión de su curso; mas si el [mar] ha crecido temporalmente por aumento de las lluvias o la marea [...], no cambia por ello de orilla, [...]”.

15 **D.41.1.14.** “las playas [...] son públicas en el sentido [...] de aquello que produce directamente la naturaleza”.

equilibrio, permitiendo una más completa reflexión sobre ella y su significado: es inevitable si existen sedimentos necesarios para modelarla y ha de coincidir con el momento de rotura de la ola. La ausencia de dicha barra delata pues la insuficiencia de sedimentos, lo que en costas sedimentarias desarrolladas indica una situación erosiva ya avanzada. Su “interpretación” se ve dificultada por los estados del mar de poca persistencia, pues su variabilidad deshace el perfil del equilibrio previo para alcanzar el equilibrio correspondiente a la energía del siguiente, en una pugna por llevar cada uno “la barra” a la posición y profundidad de su punto de rotura propio. De ahí que su doble concavidad sólo se insinúe, en el mejor de los casos, en una convexidad que se extiende a una relativamente extensa franja, delatora de tales variabilidades.

Esa loma real, en el que se traduce la aguda discontinuidad ideal correspondiente a una barra propia de una onda monocromática, es la forma que permite explicar la génesis de un cordón litoral como se detalla más adelante, al tomar en cuenta los cambios en el nivel medio del mar de los que se había prescindido en la CGFCS. En sus clases, mediante ejemplos, PSB tomaba en consideración los efectos inducidos por el nivel medio, producto de las mareas, de las condiciones climáticas y del oleaje. Aunque nunca lo llegaría a publicar, justificaba de esta manera, mejor que mediante cualquier otro argumento, la configuración de diversos casos de extensas costas vertebradas por la emersión de uno o varios sucesivos cordones litorales, sedimentarios, paralelos a los frentes de olas (como las barras que los engendran): costas de Huelva, frente a la desembocadura del Guadiana, o de los Países Bajos, frente a las desembocaduras híbridadas de Rin, Mosa y Escalda. Estas complejas surgencias sedimentarias no son ajenas a la problemática del deslinde costero: el legislador romano, sorprendido, no comprendió el origen de tal mutación demanial emanada de las aguas, y legitimó que se incorporara al comercio de los hombres: *la isla que nace en el mar*<sup>16</sup>.

16 D.41.1.7.(3). “*La isla que emerge en el mar –lo que sucede pocas veces– se hace de quién la ocupa [...]*”.

#### 4.2. LAS MAREAS Y EL PERFIL DE LA PLAYA

Un análisis sucesivo de lo que sucede bajo los dos niveles extremos de pleamar/bajamar (sólo 6 o 12 horas para la más breve de las componentes de la onda de marea o sólo unos pocos días para la marea meteorológica ciclónica) permite imaginar, con suficientes materiales, cómo se pueden dibujar los respectivos perfiles y éstos acordarse entre ellos. La playa sumergida del superior se desdibuja para generar una superficie de revolución microondulada (rippled), en la que cada cresta puede considerarse representativa de un nivel del mar y de una energía (altura) “suficientemente” estacionarios, hasta alcanzar la barra del inferior: esa es la superficie intermareal que nunca se puede asimilar al perfil de playa en sí. La playa es un producto del oleaje, la superficie mareal lo es de la marea (aunque con los ripples del oleaje): aún presentándose juntos ambos fenómenos en la naturaleza, en su análisis no deben confundirse. Desde una perspectiva macro, esta superficie mareal parece empatar muchas veces con la del pie del estrán superior e inducir al error de tal análisis confuso, pero una observación detallada permite percibir que tal superficie puede no ser de pendiente constante, como requeriría en sentido estricto tal empate, sino que presenta una curva de pendiente cóncava o convexa en razón de la función  $y(t)$  que describa la variación de los niveles con el tiempo desde la pleamar a la bajamar.

La variabilidad climática derivada de la estacionalidad (vinculada así por tanto a la mareal) hace que desde siempre se haya reconocido la existencia de dos diferentes tipos de perfiles extremos atribuidos a los regímenes de los oleajes de “verano” y de “invierno”. Las diferencias básicas de la barra de invierno se pueden establecer en a) mayor lejanía de su posición respecto de la línea de playa y, por tanto, profundidad, y b) mucha mayor entidad de la propia barra, cuya cota puede superar en términos absolutos la de verano.

#### 4.3. GÉNESIS DEL CORDÓN LITORAL: LA ISLA QUE NACE EN EL MAR

En muchas costas la variabilidad de los niveles del mar se acentúa (en cota y en duración) en ocasiones por convergencia



FIGURA 1. Islas que nacen en el mar... barreras, y en el lago (Venecia).

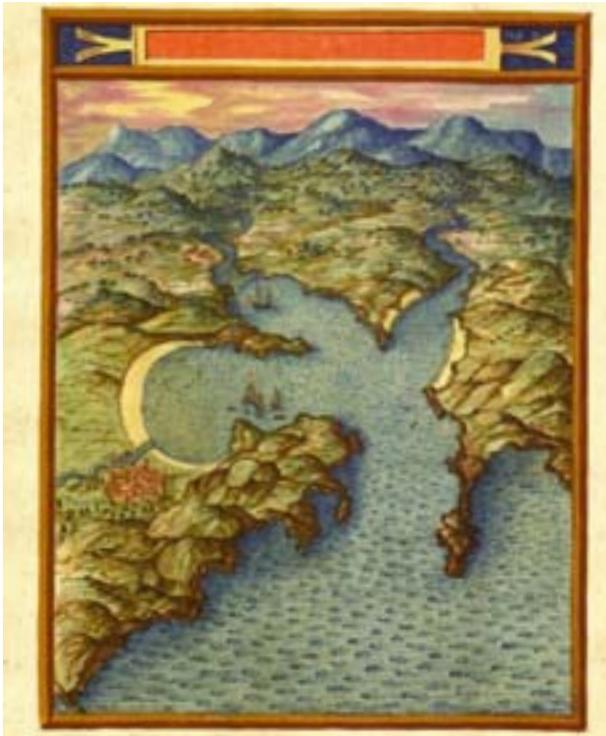


FIGURA 2. Cedeira (1634, según Texeira<sup>17</sup>).

de factores, y oleajes adecuados generan barras amplias y a gran cota; el descenso posterior de las aguas permite que la convexa barra emerja, y su colonización vegetal con o sin la formación de dunas le da estabilidad: se generó el cordón. No tiene que ser frecuente, pero es posible, y observable. Sin ningún género de dudas es la explicación más plausible para la formación, generalmente con otras concausas, de muchas islas barreras. Sólo precisa de sobreabundancia de sedimentos al alcance de las olas y de una dinámica transversal del oleaje significativa si no claramente dominante.

17 Texeira. "Descripción de España y de las costas y puertos de sus reynos". 1634.

La presencia de estos cordones de carácter insular, asociada a una singularidad másica fluvial, conduce a la colmatación progresiva de las franjas de aguas someras intermedias, en procesos semejantes a los que desarrollan otras llanuras litorales, estuarinas y deltaicas y que más adelante se detallan.

Pocas costas en la naturaleza pueden suponerse recibiendo oleajes tan marcadamente transversales, sin embargo, salvo en profundas bahías con boca de entrada estrecha, foco emisor de ondas de Huygens, en las que así puede asumirse con cualquier situación climática, el análisis longitudinal no puede obviarse: en tal caso esta dinámica induce la formación de flecha, en el sentido de su incidencia, precisamente a partir de la singularidad geométrica que el incipiente cordón (isla cordón al fin) conforma. Generalmente el predominio de uno de los sentidos de la oblicuidad de los oleajes es muy patente y la flecha se marca y progresa en un solo sentido (la del río Piedras, en Huelva, a un paso de Ayamonte), pero no será infrecuente ver flechas en ambos sentidos, sobre todo en el interior de amplias bahías (Cedeira, por ejemplo; en este y muchos casos debidas las dos a los mismos oleajes difractados en ambos sentidos).

#### 4.4. ANÁLISIS EN PLANTA. SINGULARIDADES

El análisis anterior pareciera así complicarse cuando la dinámica longitudinal del oleaje es dominante, pero no necesariamente. De hecho, hasta aquí sólo se ha recurrido al análisis transversal de la CGFCS. El análisis en planta permite explicitar la existencia del transporte longitudinal de sedimentos en el litoral, también generado por la rotura del oleaje y la progresiva deformación de las olas previamente a la rotura. Este análisis es el que incorpora las conocidas singularidades como concepto base para la tipificación de las formas de depósito, muy frecuentemente referidas en los documentos jurídicos de referencia.

Interesa pues ahora el recordatorio de las singularidades y de las formas que inducen. Las discontinuidades de alimentación –aporte y/o pérdidas localizadas– de configuración de la costa –por variación brusca y/o acusada de la alineación– y de la dinámica litoral –por variación de las condiciones de abrigo– constituyen las tres modalidades– respectivamente másica, geométrica, dinámica– de las singularidades costeras que pueden presentarse en el análisis de un tramo de costa.

#### 4.5. SINGULARIDADES MÁSCAS. EXTRACCIONES/CAÑONES – DESEMBOCADURAS

La singularidad másica es muy intuitiva y jurídicamente muy perceptible en su manifestación sub-aérea: las aportaciones



FIGURA 3. Cedeira (Hoy, Google maps).

fluviales y las extracciones antrópicas son fácilmente tipificables y la CGFCS las identifica con el respectivo carácter de positiva y negativa en esa categoría. Más difícil de percibir jurídicamente en sus principios es evidentemente la singularidad másica negativa que representan los cañones submarino y otras configuraciones morfodinámicamente equivalentes; sobre todo porque trascienden al establecimiento de los equilibrios naturales en la planta del sistema, pero no a cambios en los mismos, ya que no los permiten.

#### 4.6. SINGULARIDADES GEOMÉTRICAS. FLECHAS

La singularidad geométrica es inductora de la “flecha”; la génesis y progresión de las flechas sólo se pueden entender, a su vez, como el resultado de la evolución de la barra frente al extremo de la singularidad hasta la formación del correspondiente “microcordón” en forma de gancho, al que se denomina escama (DIEZ, 2000, 2001)<sup>18</sup>; son las sucesivas escamas y su progresiva acreción las que delimitan la flecha. Sabida es la explicación para la posible transformación de la flecha-barrera a la isla-barrera correspondiente: el crecimiento longitudinal de la flecha por su punta o extremo libre se nutre, antes o después, de sedimentos previamente constitutivos del cuerpo de la propia flecha, debilitando su potencia en su arranque cuando este arranque, singularidad, es el labio de barlomar de la desembocadura y no se ha conseguido reforzar suficientemente mediante procesos complementarios del oleaje como son el viento y la colonización vegetal. Ese es entonces un punto débil frente a la hidrodinámica de la desembocadura, tanto más cuanto más crece la flecha longitudinalmente.

Se puede así generalizar que el origen de una isla barrera es a la escala macro el cordón o la flecha (mixta, de desembocadura o canal de marea) litorales, aunque a la escala micro siempre se inicie por una barra emergida o microcordón. En todo caso esta génesis sólo es posible con sobreabundancia de sedimentos, cualquiera sea su procedencia. Ciertamente que la situación más intuitiva la generan los frentes deltaicos de origen fluvial, con (caso de Ayamonte) o sin la colaboración del transporte litoral en presencia, pero el caso de las islas barrera de la Costa Este Americana<sup>19</sup> demuestra que los sedimentos previos de origen glaciar pueden ser suficientes.

Se puede así entender el proceso ya mencionado de incorporación al continente (a la plana litoral) de muchas de estas originariamente conformadas como islas barreras mediante mecanismos conducentes a la colmatación de las áreas someras que las aislaban. Entre estos mecanismos los hay que trabajan con los propios sedimentos “playeros”, no cohesivos, y los que, con mayor acción físico-química y biológica, utilizan o generan materiales cohesivos hasta entonces eliminados del sistema por la turbulencia hidrodinámica. En cualquier caso los mecanismos de transporte por el viento, por el oleaje en su propagación en las áreas abrigadas, y por las corrientes de marea suelen estar presentes. Y aquí topamos con otra figura del digesto que engloba las “islas” originadas a partir de bajos mareales en el interior de estuarios o bahías. Se trata de materiales de origen litoral (no confundir con los fluviales que habrían desarrollado delta; de hecho pueden generarse en el estuario activo de un delta, en desarrollo o retroceso. *(Isla que nace en el río)*<sup>20</sup>.

18 Los puertos de las rías cantábricas. En *“Tribarren. Ingeniería y mar”*. Ministerio de Fomento. ISBN 847790-358-1 pp.41-49. Madrid 2000 *“Rías cantábricas con puerto y Puertos en rías”*. Rev. O. Públicas n. 3046. pp. 45-56. Enero 2001. Madrid.

19 WILLIAMS&BUILLDING, 1982. *“Barrier Island Shorelines: an assessment of their Genesis and Evolution”*. Restricted paper. Fort Belvoir.

20 D.41.1.7.(3). *“La isla que emerge en un río -lo que sucede con frecuencia- y está en el centro del río, se reparte entre aquellos que poseen predios ribereños a un lado y otro del río”*.

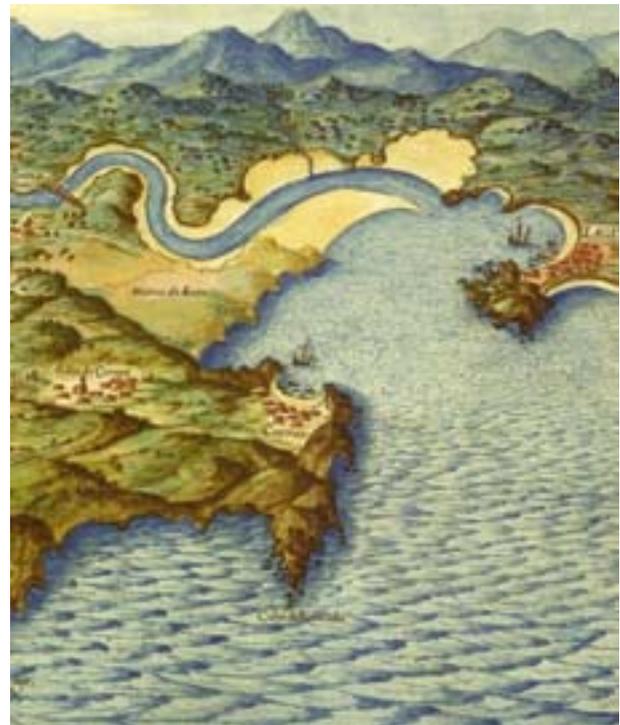


FIGURA 4. Flecha y Tómbolo (Corme y Lage) (1634, según Texeira<sup>21</sup>).

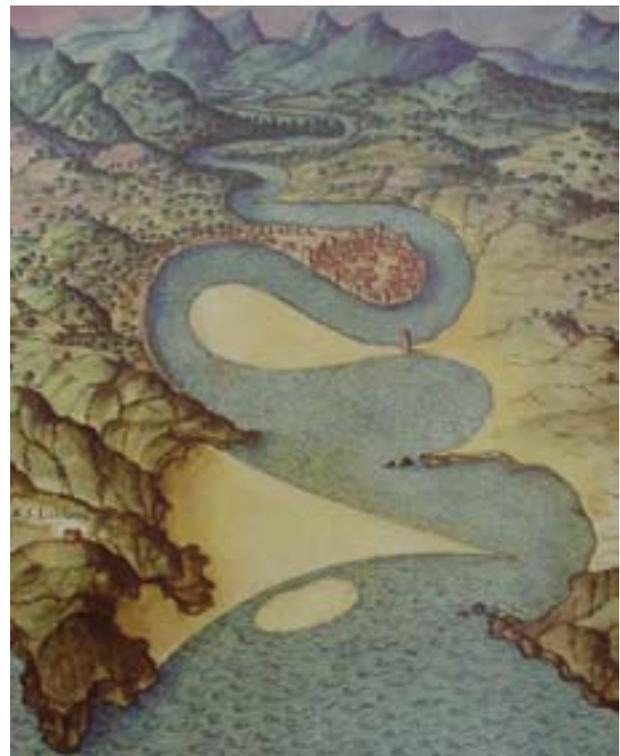


FIGURA 5. Isla que nace en el río (Luarca, 1634, según Texeira<sup>22</sup>).

21, 22 Texeira. *“Descripción de España y de las costas y puertos de sus reynos”*. 1634.

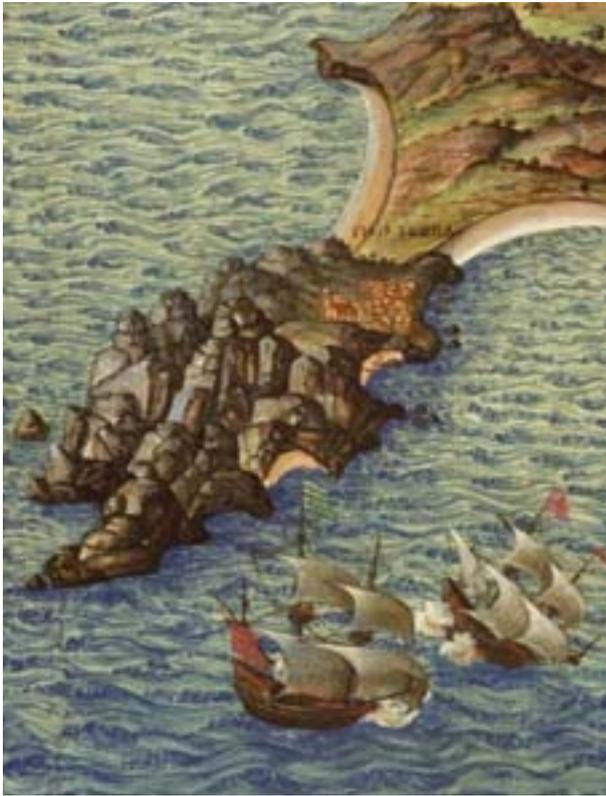


FIGURA 6. Cabo Finisterre (1634, según Texeira<sup>23</sup>).



FIGURA 7. Cabos de Cullera y San Antonio. Valencia.

#### 4.7. SINGULARIDADES DINÁMICAS. PLANAS LITORALES

Muchas de las planas litorales existentes han tenido en su conformación una singularidad geométrica positiva como inductora fundamental de su auténtico epítome. S. Bores ponía en evidencia este hecho mostrando todo el complejo papel de la “Isla” de Cullera en el ejemplo evolutivo de la costa valenciana frente a las cuencas del Turia y del Júcar, alguna vez conjuntas en su desembocadura. Y el papel final de la “isla” de Cullera, hoy casi completamente englobada en la plana y a semejanza del papel del cabo de San Antonio respecto de la plana en Denia, como elemento de apoyo para la formación de una playa acrecida por el transporte sólido litoral sigue siendo hoy evidente. Más complejo de ver es el análogo inicial papel jugado por la misma “isla” como singularidad dinámica, antes de su anexión a la plana, cuando estaba induciendo los depósitos devenidos en el tómbolo que finalmente la transformó en singularidad geométrica, entre las dos barreras iniciales (de barlomar y de sotamar) del tómbolo. Primero, y tras la barrera de la incipiente playa apoyada, después, existieron sucesivamente, lo mismo que hoy se observa en el Peñón de Ifach, la laguna litoral de progresiva colmatación que se identifica en el Digesto con el problema clásico del ciudadano romano Rutilia Pola<sup>24</sup>. Cu-

rioso es el caso de la “isla” de Finisterre. En el libro de Las costas (Diez, 1996) se propone ya una génesis del istmo congruente con el bloque geomorfológico de Teixeira (descubierto en Viena después del 2000) pero que hoy es mucho menos intuible de lo que lo pudo ser para Teixeira (1635), cuando la hipotética laguna litoral entre las playas (barreras) del istmo ya no era evidente. Ambas barreras están sometidas a una relativamente relevante dinámica longitudinal (muy inferior por muy difractada la interior u oriental) pero en la exterior el factor dominante es sin duda el transversal y debe considerarse, sobre todo, un cordón.

#### 5. PERTURBACIONES ANTROPOGÉNICAS EN EL DEMANIO COSTERO

Sin embargo el mayor potencial del análisis en planta de la CGFCS se descubre al analizar los impactos de las obras en el mar. Ya en el Digesto se plantea el problema de la titularidad de los terrenos ganados al mar por el vertido de “rocas al mar”, operación que en la Ingeniería de Costas/Transporte socorre de antiguo necesidades portuarias<sup>25</sup>.

Los problemas derivados de estas obras no sólo consisten en la mera invasión demanial causada por el mero aporte exterior de materiales, sino también por la perturbación que ge-

23 Texeira. “Descripción de España y de las costas y puertos de sus reynos”. 1634.

24 D.18.1.69. “Rutilia Pola compró el lago Angulario Sabateno y diez pies de tierra alrededor del mismo. El lago creció y los diez pies quedaron sumergidos. Se pregunta si tendrá derecho Rutilia Pola a los diez pies que quedan actualmente próximos al agua”.

25 D.41.1.30.(4): “Si yo hubiera echado al mar unas rocas y hubiera edificado sobre ellas, lo edificado se hace mío inmediatamente; así también, si hubiera construido una isla en el mar, se hace mía sin más, ya que aquello que no pertenece a nadie se hace de quién lo ocupa (Pomp. 34 Sab.)”.

neran en la dialéctica de los procesos litorales. Evidentemente, dicho vertido funcionará desde un principio como una singularidad geométrica negativa, que, por la vía de apoyo o del abrigo, inducirá esas acreciones pretendidas por cualquier proyecto de espigón<sup>26</sup>. Es más, el recurso sistemático a las bases de la CGFCS permite afirmar que el sotavento eficaz de una singularidad geométrica dada se halla generalmente en las costas a ambos lados del obstáculo, aunque el predominio de uno de los sentidos del transporte litoral pueda considerarse muy dominante. Y así se deben interpretar como erosiones debidas al puerto de Castellón tanto las evidentes desde el principio al sur del mismo como las más diferidas al norte de la playa apoyada en el mismo; por supuesto por el condicionante que significa el cabo de Oropesa (que siempre estuvo ahí). Estas últimas consideraciones permiten interpretar de forma más amplia el “interdicto” que otorga el Pretor a favor del que construye un dique en el mar<sup>27</sup>.

## 6. CONCLUSIONES

Ya era generalmente asumido que la sensibilidad de Pedro Suarez Bores en la interpretación de la dinámica litoral y costera fue fundamental en el salto cualitativo que se produjo en nuestro país en la percepción del territorio costero y de las acciones para su protección. En este documento se considera evidenciado el importante papel que su clasificación genética de formas costeras simples puede cumplir en la interpretación de documentos pasados y en el desarrollo de documentos jurídicos futuros.

Se han mostrado reiteradas analogías entre la perspectiva fisiográfica que apuntala esa clasificación y documentos jurídicos de objetividad incuestionable derivada de su robustez temporal. Lo mismo que el potencial que encierra con vistas a posibles vías del perfeccionamiento jurídico del demanio costero, siempre con vistas a la conservación de la costa en el mejor de sus significantes.

26 **D.41.1.16.** “Consta que el derecho de accesión por aluvión no tiene lugar en los terrenos deslindados < a los que se ha asignado oficialmente unos límites>”.

27 **D.41.7.2.:** (8) *Compete un interdicto útil contra el que construye un dique en el mar, a favor del que pueda resultar perjudicado, y si no hay nadie perjudicado, debe protegerse al que construye algo en la costa o un dique en el mar. (9) Si se impide que alguien pesque o navegue por el mar, no tendrá aquél el interdicto, como tampoco aquel otro a quien se impide jugar en un campo público o lavarse en un baño público o entrar en un teatro, sino que en todos estos casos debe ejercitarse la acción de injurias.*





**Port de Tarragona**

[www.porttarragona.cat](http://www.porttarragona.cat)



vehículos

más de 738.000 vehículos

+



alimentos

más de 2.400.000 toneladas de alimentos

+



maquinaria

más de 107.000 toneladas de aparatos



cruceristas

más de 582.835 cruceristas

+



pasajeros

más de 4.515.000 pasajeros

+



productos químicos

más de 215.256 toneladas de productos químicos



combustible

más de 8.185.465 toneladas de combustible

+



construcción

más de 993.000 toneladas de material de construcción

+



papel

más de 104.000 toneladas de papel

=

futuro y bienestar  
una puerta abierta al progreso



Puertos de Tenerife



Autoridad Portuaria de S/C de Tenerife

Nos puedes encontrar en:



[www.puertosdetenerife.org](http://www.puertosdetenerife.org)

# EDICIONES DEL CEDEX



Nº de páginas: 296  
Año de edición: 2011  
P.V.P.: 24,04€

Las cimentaciones especiales hormigonadas in situ, objeto de La presente publicación, están constituidas por pilotes de desplazamiento y extracción, muros pantalla y pantallas de pilotes. La designación de estas cimentaciones proviene de sus condiciones especiales de puesta en obra de hormigón, generalmente con perforaciones profundas, bajo agua o fluido estabilizado, y con cuantías de armadura importantes; que obligan a exigir al hormigón una serie de características específicas. Si bien estos elementos están incluidos en la normativa española de aplicación a las estructuras de hormigón (EHE, Código Técnico y PG-3), al tratarse éstos de tratados generales, no se cubren muchos de los aspectos particulares en cuanto a las características que debería tener el hormigón y las precauciones que deberían tomarse durante la ejecución de este tipo de estructuras. Por ello y de forma complementaria, se ha desarrollado normativa europea de aplicación a los hormigones de cimentaciones especiales: la UNE-EN 1536 (Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Pilotes perforados) y la UNE-EN 1538 (Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Muros pantalla), ambas publicadas por AENOR en el año 2000. En este trabajo se recoge el Estado del Arte sobre el hormigonado de cimentaciones especiales, incluyendo su puesta en obra. En el texto redactado se detallan los requisitos incluidos en la normativa de aplicación (tanto la española y europea antes mencionadas como otras normativas internacionales específicas consultadas), justificando y explicando su importancia y necesidad. También se incluyen otros aspectos que pueden contribuir a mejorar la calidad del hormigón de estas obras que, aunque no incluidos en la normativa, aparecen descritos en la bibliografía especializada o bien han sido extraídos de la experiencia práctica. El documento está dividido en diez capítulos, que cubren los materiales componentes del hormigón y su dosificación, puesta en obra, propiedades del hormigón fresco y endurecido, durabilidad, control de calidad y un último capítulo referente al hormigón autocompactante. El Estado del Arte redactado contiene un gran volumen de información, por lo que a efectos prácticos se ha puesto especial énfasis en el capítulo 10 resumen y conclusiones que de forma sintética recopila los aspectos fundamentales que deben tenerse en cuenta. Cualquier información incluida en este apartado puede ser ampliada y justificada en el capítulo correspondiente del Estado del Arte. Por último, el Anejo recoge los datos de mayor interés en relación con el hormigón utilizado en obras singulares de pantallas y pilotes "in situ" realizadas en España.



Año de edición: 2009  
P.V.P. 152,59€

El curso sobre Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras aborda de forma integral todos los aspectos fundamentales de los sistemas de depuración de las aguas residuales. Dividido en tres tomos, desarrolla características básicas de los vertidos de aguas residuales, los diferentes tratamientos empleados, las tendencias futuras, los sistemas de control y optimización del consumo energético de las EDAR, los tratamientos de fangos, su valorización energética, la reutilización de las aguas residuales, los vertidos al mar y todos los parámetros de diseño y dimensionamiento de las instalaciones construidas en tales efectos.



P.V.P.: 30€

La restauración fluvial constituye un proceso encaminado a la recuperación de la integridad ecológica del medio fluvial, en términos de biodiversidad y funciones y procesos ecológicos. Este Manual examina las técnicas más destacadas para la consecución de estos fines, diferenciando entre aquellas dirigidas a la restauración de los ecosistemas acuáticos y ribereños, y las que tienen por objeto la integración de las actividades humanas en la protección y mejora de los medios fluviales. Se presta especial atención a las técnicas de ampliación y mejora de las formaciones vegetales de ribera, bioingeniería e incremento de la biodiversidad florística y faunística. Finalmente, se dedica un capítulo específico a los procedimientos que deben guiar los programas y proyectos de restauración fluvial.



Nº de páginas: 118  
Año de edición: 2010  
P.V.P.: 10€

Esta publicación recoge el proyecto de recuperación del jardín histórico y la reordenación de su entorno, realizado por el arquitecto Gerhard Loch, y promovido por el CEDEX-CEHOPU con la colaboración de la Universidad Politécnica de Madrid. Las obras se iniciaron en 2008 y el jardín se abrió de nuevo al público en septiembre de 2009.



Nº de páginas: 128  
Año de edición: 2010  
P.V.P.: 15€

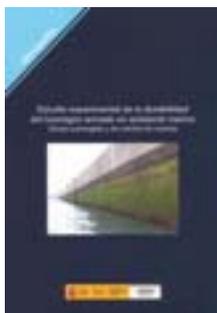
El correcto manejo y procesamiento de los fangos generados en las estaciones depuradoras de aguas residuales es un importante reto tanto económico como medioambiental. El marco legal que regula el destino final de los fangos exige que estos sean tratados para eliminar su naturaleza putrescible y eliminar efectos nocivos, tanto para el medio ambiente como para la salud humana. En definitiva se pretende que el fango presente un grado de estabilización que dependerá del destino final del mismo. El término "estabilidad" es uno de los más usados y divergentes, existiendo diferentes normas que establecen criterios dispares para considerar un fango estabilizado. Pero, ¿es realmente positivo estabilizar un fango si su destino es el aprovechamiento de sus nutrientes en la agricultura? ¿hasta donde hay que estabilizarlo? ¿qué límite de fracción volátil presenta una buena estabilización? Así mismo, se hace necesario garantizar las condiciones higiénico-sanitarias en la gestión de los fangos, bien habiéndolos sometido a un proceso de higienización o bien mediante una correcta gestión posterior de los mismos. En este trabajo se aborda el análisis de dos conceptos que se consideran relevantes para la correcta gestión de los fangos generados en una depuradora: estabilidad e higienización. Por otro lado, se pretende transmitir de manera sencilla y asequible la teoría de los procesos de digestión de fangos, a la vez que se acompaña de los resultados prácticos de un trabajo de experimentación. Se han seleccionado para este estudio los siguientes procesos biológicos: digestión anaerobia mesófila y termófila y digestión aerobia termófila. En estos procesos, además de conseguir una reducción de la putrescibilidad, generación de olores y contenido en patógenos, conllevan una eliminación significativa de la masa de fango producida.

## Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:  
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas  
c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid

Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: (+34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

# EDICIONES DEL CEDEX



**Nº de páginas: 267**  
**Año de edición: 2009**  
**P.V.P.: 18€**

En esta Monografía se describe el estudio experimental realizado sobre hormigones expuestos a un ambiente marino, situados bien en zona de carrera de mareas, bien en zona sumergida, y pertenecientes a Muelles españoles construidos con cajones flotantes. Tras analizar la documentación relativa a la ejecución de los cajones y revisar el estado actual del hormigón (tras un periodo de exposición variable entre 2 y 31 años), se ha realizado una serie de ensayos encaminados a caracterizar el hormigón y a determinar la penetración de cloruros. Correlacionando estos datos, se ha determinado qué ensayos físicos son los más adecuados para caracterizar la durabilidad del hormigón situados en estos ambientes marinos. A continuación, utilizando estos mismos datos y los recopilados de la revisión bibliográfica realizada, se ha desarrollado un modelo de penetración de cloruros en el hormigón, adaptado a cada uno de los dos ambientes, y se ha obtenido el coeficiente de eficacia de las adiciones minerales, en cuanto a impermeabilidad a los cloruros. Finalmente, se ha llevado a cabo un estudio sobre la influencia del curado con agua de mar sobre las propiedades de hormigones de diferentes calidades.



**Nº de páginas: 78**  
**Año de edición: 2009**  
**P.V.P.: 15€**

Para conocer de modo fiable el impacto energético y de emisiones de un determinado proyecto hidráulico es necesario aplicar metodologías capaces de analizar de una manera integrada los impactos energéticos de todas las tareas incluidas en el ciclo completo del agua. Estas metodologías, que son de uso común desde hace años en numerosos sectores industriales, son conocidas como "Análisis de Ciclo de Vida" (ACV). Su aplicación viene siendo objeto de normalización internacional (Normas ISO-14040 y derivadas) desde finales de la década de 1990.

Los análisis de ciclo de vida tratan de evaluar la totalidad de los efectos ambientales que genera un determinado producto o servicio en las sucesivas etapas de diseño, producción, distribución, utilización y eliminación. En cada etapa se consideran no sólo los efectos directos, sino también los indirectos, esto es, los que se generan a través de la utilización de materias primas, productos semielaborados, servicios auxiliares y, en general, cualquier actividad vinculada al ciclo de vida del producto.

En el presente trabajo se trata de obtener una primera aproximación al problema de los consumos de materiales y energía que se generan directa e indirectamente durante la construcción de infraestructuras hidráulicas, con una orientación especial hacia los sistemas dedicados al abastecimiento urbano. Por consiguiente, se tomarán en consideración las infraestructuras más habitualmente utilizadas para esta finalidad, dentro de los intervalos de escala que se suelen presentar en los sistemas urbanos, evitando entrar en la consideración de macroproyectos específica o mayoritariamente orientados al regadío. Las estaciones de tratamiento (desaladoras, desalobradoras, potabilizadoras y depuradoras) quedan fuera del ámbito del presente estudio.



**Nº de páginas: 430**  
**Año de edición: 2009**  
**P.V.P.: 30€**

El libro "La ciudad paseable" presenta una serie de recomendaciones para la consideración de los peatones en el planeamiento, el diseño urbano y la arquitectura. El objetivo de esta publicación es ofrecer al lector análisis, argumentos y recomendaciones para una mejor consideración de los peatones en el planeamiento urbanístico y en los proyectos arquitectónicos y se inscribe dentro del más general, de potenciar los desplazamientos urbanos a pie, como medio sostenible, saludable y económico de moverse en las ciudades.



**Nº de páginas: 189**  
**Año de edición: 2010**  
**P.V.P.: 15€**

La Guía Técnica sobre depósitos para abastecimiento de agua potable da continuidad a una serie de documentos normativos relacionados con obras hidráulicas promovidos desde la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. En concreto, los antecedentes directos de este documento son la Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión (2003) y la Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano (2007). La Guía se ha organizado en siete capítulos, incluyendo una introducción en el Capítulo 1. El contenido de la Guía Técnica comprende todo el proceso que atraviesa un depósito en su devenir: diseño (Capítulo 4), construcción (Capítulo 5), aseguramiento de la calidad (Capítulo 6) y explotación (Capítulo 7). Asimismo, se definen los distintos tipos de depósitos (Capítulo 2) y las características básicas que deben cumplir los componentes que constituyen un depósito (Capítulo 3).

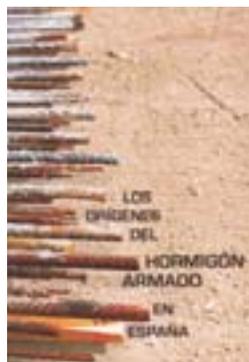


**Nº de páginas: 128**  
**Año de edición: 2010**  
**P.V.P.: 15€**

El correcto manejo y procesamiento de los fangos generados en las estaciones depuradoras de aguas residuales es un importante reto tanto económico como medioambiental. El marco legal que regula el destino final de los fangos exige que estos sean tratados para eliminar su naturaleza putrescible y eliminar efectos nocivos, tanto para el medio ambiente como para la salud humana. En definitiva se pretende que el fango presente un grado de estabilización que dependerá del destino final del mismo.

El término "estabilización" es uno de los más usados y divergentes, existiendo diferentes normas que establecen criterios dispares para considerar un fango estabilizado. Pero ¿es realmente positivo estabilizar un fango si su destino es el aprovechamiento de sus nutrientes en la agricultura? ¿hasta donde hay que estabilizarlo?

¿qué límite de fracción volátil presenta una buena estabilización?. Así mismo, se hace necesario garantizar las condiciones higiénico-sanitarias en la gestión de los fangos, bien habiéndolos sometido a un proceso de higienización o bien mediante una correcta gestión posterior de los mismos. En este trabajo se aborda el análisis de dos conceptos que se consideran relevantes para la correcta gestión de los fangos generados en una depuradora: estabilidad e higienización. Por otro lado, se pretende transmitir de manera sencilla y asequible la teoría de los procesos de digestión de fangos, a la vez que se acompaña de los resultados prácticos de un trabajo de experimentación. Se han seleccionado para este estudio los siguientes procesos biológicos: digestión anaerobia mesófila y termófila y digestión aerobia termófila. En estos procesos, además de conseguir una reducción de la putrescibilidad, generación de olores y contenido en patógenos, conllevan una eliminación significativa de la masa de fango producida.



**Nº de páginas: 522**  
**Año de edición: 2009**  
**P.V.P.: 20€**

Este libro es de sumo interés tanto para el lector especializado como para aquel que se quiera iniciar en el tema. Se compone de dos partes principales, aunque tenga cuatro capítulos; en la primera, con un lenguaje sencillo y asequible, relata cómo nació el sistema constructivo del hormigón armado y describe el proceso que siguieron las primeras patentes. Después se centra ya en su introducción en España y cómo, a través de sus más importantes representantes, se consolida como un sistema líder en la construcción en nuestro país hasta que fue superado, tiempo después, por el hormigón pretensado.

## Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:  
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas  
c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid

Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: (+34) 91 335 72 49 • E-mail: [publicaciones@cedex.es](mailto:publicaciones@cedex.es)

# EDICIONES DEL CEDEX



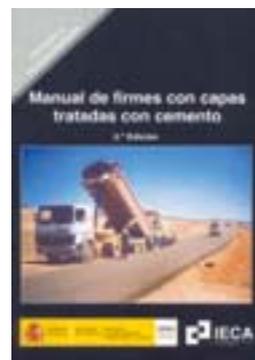
Nº de páginas: 636  
Año de edición: 2009  
P.V.P.: 48€

La Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano es un documento cuyo objetivo es ordenar el estado del arte en la materia y servir de guía al usuario de las redes de saneamiento y drenaje en la aplicación de la muy abundante e inconexa normativa al respecto. El ámbito de aplicación es de las redes de saneamiento y drenaje, independientemente de cual sea su funcionamiento hidráulico (en lámina libre, bajo presión o por vacío), o su concepción (unitarias o separativas). Quedan excluidos expresamente los emisarios submarinos y las estaciones depuradoras. Tampoco son objeto de la guía las instalaciones de recolección de las aguas residuales y pluviales en el interior de los edificios, ni las conducciones de drenaje de las obras lineales.



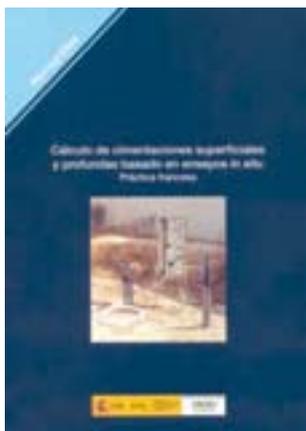
Nº de páginas: 438  
Año de edición: 2009  
P.V.P.: 40€

La "Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión" es el resultado de un trabajo realizado en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX por encargo de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas del Ministerio de Medio Ambiente. Tiene por objeto compilar la normativa y reglamentación vigente sobre la materia, así como establecer unos criterios generales en lo relativo al proyecto, instalación y mantenimiento de tuberías para el transporte de agua a presión, independientemente de cual sea su destino final (abastecimientos, regadíos, etc).



Nº de páginas: 265  
Año de edición: 2009  
P.V.P.: 20€

Este Manual pretende constituir una ayuda para todos aquellos que tienen que proyectar o construir firmes con capas tratadas con cemento, en especial para los técnicos que se enfrentan por primera vez a un firme de este tipo desde cualquier posición: empresas consultoras, constructoras, laboratorios a administraciones. El texto detalla los conceptos básicos a los materiales tratados con cemento, las propiedades de los distintos tipos de mezclas, su dosificación y caracterización, y describe las prácticas más adecuadas para el proyecto, construcción y control de calidad de los firmes con capas tratadas con cemento. El Manual es el resultado de la colaboración entre el Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones (IECA), y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), del Ministerio de Fomento.



Nº de páginas: 194  
Año de edición: 2009  
P.V.P.: 23€

Este libro es la traducción del texto francés "*Calcul des cimentations superficielles et profondes*" originalmente publicado en 1999 por el profesor Roger Frank. El objetivo ha sido facilitar la divulgación de la práctica de cimentación francesa basada fundamentalmente en métodos directos a partir de ensayos "in situ", y, en particular, el ensayo presiométrico, siguiendo la experiencia y tradición desarrolladas por Louis Ménard. Los métodos directos, menos habituales en los países de tradición anglosajona, como es el caso de España, pueden resultar una alternativa o complemento razonable a los métodos clásicos de tipo indirecto. En el libro se recogen aspectos fundamentales relacionados con los cálculos de capacidad portante de cimentaciones superficiales y profundas, tanto los basados en el método presiométrico como en otros ensayos in situ (CPT, SPT). Se desarrollan también otros aspectos como la evaluación de los esfuerzos parásitos sobre pilotes (rozamiento negativo, empujes laterales) o la interpretación de pruebas de carga en pilotes recogiendo metodologías específicas, poco conocidas fuera de Francia. Pero, conviene tener en cuenta para su empleo, que los ensayos "in situ" que involucran un avance previo de sondeo pueden estar afectados por el modo de ejecución del mismo.



Nº de páginas: 130  
Año de edición: 2009  
P.V.P.: 35€

Esta publicación, planteada con un horizonte meramente estético, muestra imágenes de obras construidas con hormigón armado en los primeros tiempos que permanecen en pie en la actualidad. Se trata de una publicación visual en la que el lector se puede deleitar con imágenes de alta calidad realizadas por reputados profesionales de la fotografía.

## Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:  
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas  
c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid

Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: (+34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

## **CURSO SOBRE DOSIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN, FABRICACIÓN Y CONTROL DE MEZCLAS BITUMINOSAS**

**FECHA:** Del 14 al 18 de noviembre de 2011

**DIRECTOR:** D. Baltasar Rubio Guzmán

**LUGAR:** Centro de Estudios del Transporte

## **CURSO SOBRE EVALUACIÓN, RESTAURACIÓN Y VIGILANCIA AMBIENTAL DE OBRAS CIVILES**

**FECHA:** Del 7 al 18 de noviembre de 2011

**DIRECTOR:** D. Fernando Magdaleno Mas

**LUGAR:** CETA - CEDEX

## **JORNADA TÉCNICA SEGUNDA FASE DE LOS MAPAS ESTRATÉGICOS DE RUIDO Y AGLOMERACIONES**

**FECHA:** 3 de noviembre de 2011

**DIRECTOR:** D. José Manuel Sanz Sa - MARM  
D. Fernando Segués Echazarreta - CEDEX

**LUGAR:** CETA - CEDEX

## **CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA DE REGADÍOS**

**FECHA:** Hasta el 15 de diciembre de 2011. Inscripción por módulos

**DIRECTOR:** D. Julián Martínez Beltrán

**LUGAR:** Centro de Estudios Hidrográficos (C.E.H.) - CEDEX

## **XXIX CURSO SOBRE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y EXPLOTACIÓN DE ESTACIONES DEPURADORAS**

**FECHA:** Del 14 al 25 de noviembre de 2011

**DIRECTOR:** D. Ignacio del Río Marrero  
D. Enrique Ortega de Miguel

**LUGAR:** CETA - CEDEX

**DIRECCIÓN**Director: **Mariano Navas Gutiérrez**Calle de Alfonso XII, 3  
28014 MADRID

- Telf.: 913 357 500
- Télex: 45022 CEDEX E
- Fax: 915 280 354

**SECRETARÍA**Secretario: **Manuel Echeverría Martínez****RELACIONES EXTERNAS Y ACTIVIDADES COMERCIALES**Jefe: **Miguel González Portal**

## — GABINETE DE FORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

Jefa de área:

Telf.: 913 357 200 • Fax: 913 357 249

**CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS**Director: **José María Grassa Garrido**Calle Antonio López, 81 • 28026 MADRID  
Telf.: 913 357 700 • Fax: 913 357 622**CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS**Director: **Juan Manuel Ruiz García**Paseo Bajo de la Virgen del Puerto, 3 • 28005 MADRID  
Telf.: 913 357 900 • Fax: 913 357 922**CENTRO DE ESTUDIOS DEL TRANSPORTE**Director: **Antonio Sánchez Trujillano**Autovía de Colmenar Viejo, km 18,2  
28049 El Goloso (MADRID)  
Telf.: 913 357 800 • Fax: 913 357 822**CENTRO DE ESTUDIOS DE TÉCNICAS APLICADAS**Director: **Alberto Compte Anguela**Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID  
Telf.: 913 357 200 • Fax: 913 357 249**LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS  
Y MATERIALES**Director: **Rafael Astudillo Pastor**Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID  
Telf.: 913 357 400 • Fax: 913 357 422**LABORATORIO DE GEOTECNIA**Director: **Fernando Pardo de Santayana Carrillo**Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID  
Telf.: 913 357 300 • Fax: 913 357 322**LABORATORIO DE INTEROPERABILIDAD  
FERROVIARIA**Director: **Jaime Tamarit Rodríguez**Calle Julián Camarillo, 30 • 28037 MADRID  
Telf.: 913 357 150 • Fax: 913 357 197**CENTRO DE ESTUDIOS HISTÓRICOS DE  
OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (CEHOPU)**Calle de Zurbano, 7 • 28010 MADRID  
Telf.: 913 489 800 • Fax: 913 489 816



# Ingeniería Civil

## Boletín de suscripción

Email: [ingcivil@cedex.es](mailto:ingcivil@cedex.es)

Teléfono: 91 335 72 69

España un año: **49 €**

Extranjero un año: **81,12 €**

Empresa N.I.F. ....  Particular N.I.F. ....

Nombre ..... Cargo .....

Dirección .....

..... Código Postal .....

Población ..... Provincia .....

Teléfono ..... Fax ..... E-mail .....

### Formas de Pago

(Elijase solamente una opción)

Domiciliación bancaria (Solamente para cuentas bancarias en España)

Muy Sres. míos:

Ruego que, con cargo a mi cuenta y hasta nuevo aviso, atiendan el pago de los recibos correspondientes a mi suscripción que les presentará al cobro la REVISTA INGENIERIA, editada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX.

Les saluda atentamente

Entidad bancaria .....

Domicilio entidad .....

C.P. .... Localidad ..... Provincia .....

Entidad	Oficina	D.C.	Núm. de cuenta

Transferencia a favor del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX

Cuenta del CEDEX (desde España):

**0182 - 2370 - 45 - 0200200574**

Cuenta del CEDEX (desde el extranjero):

**IBAN: ES6501822370450200200574**

**SWIFT: BBVAESMM**

Cheque nominativo a favor del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX

Fecha .....

Firma

El Titular, Fdo. ....

### Enviar a:

Revista **Ingeniería Civil** (PUBLICACIONES)

Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del  • c/ Alfonso XII, 3 • 28014 Madrid

desde nuestra página web

[www.cedex.es](http://www.cedex.es)



Puertos al  
servicio de todos

PALMA · ALCÚDIA · MAÓ · EIVISSA · LA SAVINA

Los puertos gestionados por la Autoridad Portuaria de Baleares ofrecen las mejores conexiones regulares con el continente y son la principal puerta de entrada para el abastecimiento de las islas.



**Ports de Balears**



[www.portsdebalears.com](http://www.portsdebalears.com)

Autoritat Portuària de Balears



# Hacemos GRANDES

hasta los SUEÑOS  
más pequeños...

... porque en Ferrovial Agromán,  
ponemos en tus manos  
a los profesionales más cualificados del sector,  
las más avanzadas tecnologías y más de 80 años  
de experiencia en servicio y atención al cliente,  
lo que nos ha dado reconocido prestigio  
como empresa líder a nivel nacional e internacional.

Nosotros creemos en cada uno de nuestros clientes,  
creemos en **ese sueño** y lo convertimos  
en el más importante, dándole el respaldo  
y la **seguridad** de hacerlo realidad.



Ampliación del Puerto de Ciudadela. Menorca.

**ferrovial**  
agroman