



**TEMA 27.- 1. ESTUDIOS DE INGENIERÍA MARÍTIMA Y COSTERA: TOMA DE DATOS EN LA NATURALEZA, 2. MODELOS NUMÉRICOS Y MODELOS FÍSICOS A ESCALA REDUCIDA.**

**1. ESTUDIOS DE INGENIERÍA MARÍTIMA Y COSTERA: TOMA DE DATOS EN LA NATURALEZA.**

Los estudios relacionados con la ingeniería marítima son la base para el conocimiento y modelización del medio marino así como de las variables que determinan su funcionamiento. Todo ello fundamental para el adecuado dimensionamiento de las estructuras marítimas (puertos, diques, muelles, etc.) así como de otras actuaciones en el entorno costero como la regeneración de playas y otro tipo de actuaciones ambientales.

Las variables o campos objeto de estudio son principalmente las variables relacionadas con el clima marítima, y en especial el oleaje, y las relacionadas con el conocimiento del fondo marino (batimetrías, cartografías submarinas etc.).

El estudio y la toma de datos en el medio marino no es una tarea fácil, y no ha sido hasta hace pocas décadas cuando, gracias a instrumentación más sofisticada que utiliza tecnologías de última generación, cuando se ha podido abordar el estudio del medio marino con mayor precisión y obteniendo datos de mayor calidad.

**TOMA DE DATOS EN LA NATURALEZA**

La Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico lleva cabo los estudios necesarios tanto para lograr alcanzar un mayor conocimiento del medio marino y del marítimo terrestre, destinados en este caso a obtener la información más general para realizar actuaciones sobre la costa (excluyendo la concreta redacción de proyectos), como los estudios de investigación para el conocimiento e innovación de la gestión de la costa.

**Estudios ecocartográficos**

Las ecocartografías del litoral español comprenden una serie de estudios de ingeniería marítima y ecología del medio marino, con sus resultados perfectamente estructurados en un Sistema de Información Geográfica (GIS) y bases de datos asociadas.

Entre otras cosas incluyen:

- Una batimetría de detalle realizada con sonda Multihaz de la plataforma costera sumergida, a escalas 1:1.000 y 1:5.000.
- Información y cartografiado de las comunidades bentónicas y la biocenosis y se ha elaborado una base de datos de todas las especies, analizado diferentes parámetros, entre los cuales cabe citar la abundancia, la riqueza específica y la diversidad.
- Elaboración de una serie de mapas temáticos indicando, entre otras variables, los usos y clasificación del suelo, geología, espacios naturales protegidos y recursos pesqueros. También se han elaborado una serie de fichas temáticas relativas a los puntos en los que se han tomado muestras y en las que se recoge toda la información obtenida.
- Información detallada de la franja costera, en relación con sus condicionantes ambientales y patrimoniales más significativos, información estructurada en un Sistema de Información Geográfica (GIS) para poder realizar un estudio rápido y eficaz de la misma, además de facilitar la actualización y ampliación de la misma en función de las necesidades existentes en cada momento.

El objetivo de estos estudios es la obtención de un soporte cartográfico detallado de un área de costa determinado, junto con una descripción de la misma, que contenga datos relativos a las comunidades naturales, paisaje y elementos patrimoniales, todo ello tanto terrestre como marino.

**Métodos de prospección submarina.**

**La Geofísica:** ciencia que estudia los fenómenos físicos de la Tierra. La prospección geofísica es la ciencia y técnica que a través de fenómenos físicos naturales o inducidos deduce la distribución del terreno. Las técnicas geofísicas de alta resolución permiten disponer, mediante inversiones económicas relativamente reducidas, de una información inestimable y normalmente inevitable para conocer las condiciones generales del lugar y para colaborar en la identificación de las singularidades y de los rasgos topográficos, geomorfológicos y geológicos más significativos. Posibilita una reducción del número de sondeos mecánicos a realizar.

-La identificación de posibles yacimientos de arena para regeneración de playas también se hace mediante técnicas de prospección geofísica (aunque éstas tienen otras muchas aplicaciones). Se basan en el empleo de ondas sonoras y sistemas de posicionamiento de alta precisión, determinando las características estratigráficas y litológicas de sedimentos superficiales y subsuperficiales.

**Principales equipos.** Se utilizan aparatos acústicos montados sobre barcos que funcionan emitiendo ondas sonoras en el agua, las cuales se propagan a través de los distintos medios existentes (agua, roca, sedimento), son reflejadas por ellos y acaban regresando al punto de emisión. Midiendo la diferencia temporal entre el inicio de la emisión y la llegada de las señales reflejadas y conociendo la velocidad de transmisión del sonido en los distintos medios atravesados, se obtiene la distancia existente entre el emisor y el elemento reflejante.

1) **Ecosondas.** Se emplean para realizar campañas batimétricas, midiendo la profundidad de agua existente en cada punto. Pueden ser de haz simple o multihaz. Éstas se emplean también para definir el perfil real de un dique en talud.

Las de *alta frecuencia* tienen gran precisión porque no penetran en el sedimento, proporcionando con exactitud la distancia hasta el fondo marino. Sin embargo, deben ser empleadas en profundidades reducidas ya que sufren cierta dispersión. Las de *baja frecuencia* tienen menor precisión ya que penetran en la arena del fondo, proporcionando la posición de la capa más compacta que existe por debajo de aquélla. La ventaja es que se pueden emplear en grandes profundidades.

2) **Sonar de barrido lateral.** Se emplea para determinar la topografía del fondo marino. Se emiten señales acústicas cubriendo un rango de 80° a ambos lados de la trayectoria seguida por el barco (a diferencia de los otros dos aparatos que emiten señal sólo en la vertical). La imagen que se obtiene del fondo se parece a una fotografía aérea continua, con lo que se pueden distinguir distribución espacial de los sedimentos del fondo, afloramientos rocosos, bancos de arena, etc. Puede ayudar a determinar la dirección del movimiento de los sedimentos. Es sensible al movimiento del barco, por lo que se debe emplear en situaciones de calma.

3) **Perfilador sísmico de fondos.** Se emplea para determinar la estratigrafía de elementos situados por debajo del fondo marino a poca profundidad. Funciona de manera análoga a las sondas, con la diferencia de que emite ondas sísmicas, de menor frecuencia y mayor potencia que las sonoras. Se obtiene una sección transversal geológica del material subsuperficial, que siempre debe ser contrastada con la información obtenida directamente de muestras de sedimentos con vibrocóres. Estos sistemas de sísmica de reflexión consisten en interpretar los sucesivos frentes de ondas, que son reflejadas en las discontinuidades o contactos de diferentes capas en profundidad.

Los métodos de prospección geofísica normalmente se deben completar con datos adicionales de otros métodos geofísicos y sobre todo con *toma directa de muestras de sedimentos*, bien superficiales con cucharas toma muestras, bien en profundidad mediante vibrocóres.



#### Otros métodos de prospección submarina

- A) **Gravimetría.** Se deposita en el fondo marino un aparato (sparkle) que realiza una pequeña explosión (y por tanto produce un microsismo). En una serie de puntos situados alrededor del emisor se mide el valor de la aceleración de la gravedad. Así se puede definir la existencia de fallas o de cavidades
- B) **Técnicas de sondeo y muestreo.** Para la toma de muestras superficiales puede acudirse al uso de submarinistas cuando las profundidades de calado son muy reducidas. En calados intermedios y desde plataformas de apoyo de las mencionadas pueden efectuarse sondeos mecánicos, a rotación o percusión. Para mayores profundidades básicamente son cuatro las técnicas a emplear:
- cucharas: consisten en un mecanismo bivalvo tal que descendiendo por gravedad merced a un cable, en su posición de apertura se cierra al tirar del mismo
  - toma-muestras por gravedad: actúan penetrando en el terreno por su propio peso
  - toma-muestras por vibración (vibrocores): consisten en una tubería metálica que se hince en el terreno por medio de vibraciones que se aplican en el cabezal. También puede ser que la excitación sea a vibropercusión
  - toma-muestras a rotación: equipos compactos que permiten prospecciones en el interior del terreno, (hasta 10-20 m de profundidad), autónomos, controlados y arrastrados desde barcos.
- Para aguas muy profundas el primer y gran problema proviene de la necesidad de utilizar un barco de dimensiones considerables, especialmente para la ejecución de las perforaciones. Los equipos más empleados son: los toma-muestras a percusión, a presión y de pistón hidráulico.
- C) **Ensayos in situ.** La tendencia actual se decanta hacia el uso de técnicas de ensayo directos, in situ, dadas las dificultades de extracción de muestras de calidad, suficientemente inalteradas como para considerarlas realmente como tales. Las técnicas empleadas exigen un elemento transmisor-accionador que posibilite el acceso a la cota del terreno más superficial. Básicamente son dos las posibilidades:
- Por medio de una tubería guía vertical, que conecte mediante cables flexibles el propio equipamiento prospector con el barco-plataforma de apoyo;
  - Desarrollando equipos autónomos, dirigidos y operados mediante control remoto, que se apoyan en superficie y suministran suficiente reacción como para hincarse en el terreno.

A parte de la prospección por medio de penetrómetros dinámicos se emplean el ensayo del molinete, el piezocono, y el presiómetro. Para analizar la capacidad portante de los fondos a la hora de instalar un emisario submarino, se emplean lanzaderas de agua manejadas por buzos especializados.

#### Fuentes de datos de oleaje

El estudio del oleaje y las mareas y, en general, del clima marítimo, como se ha comentado, es fundamental para el dimensionamiento de obras y actuaciones en el entorno costero.

El estudio del clima marítimo se puede realizar en base a cuatro fuentes de datos de oleaje:

- A) **Base de Datos Visuales del Cedex:** Adquiridas al National Climatic Data Center de Asheville (Carolina del Norte). Se incluyen observaciones visuales desde barcos en ruta por el litoral español desde 1945. Es fiable en condiciones moderadas, no en extremas, por la tendencia del observador a la exageración. La Información que se obtiene principalmente es: H, T y Dirección. Divididas: Oleaje Sea (Mar de Viento), Swell (Mar de Fondo): abandona el área de generación y se propaga a través de la superficie marítima sin estar sometido al viento. La principal ventaja de este método es la extensión de datos Espacio y Tiempo, y su inconveniente la Heterogeneidad en la Toma de datos y su procesado, ya que los datos se acumulan en rutas de navegación. También información del viento. También del CEDEX y adquiridas a USA. Desde 1850. Datos de dirección e intensidad.
- B) La **Red de Boyas en Aguas Profundas de Puertos de Estado** Puertos del Estado cuenta con una **Red Exterior de Boyas** (o boyas de aguas profundas) compuesta por 15 posiciones de medida, una **Red Costera de Boyas** con 12 posiciones de medida, y una **Red de 36 Mareógrafos** en toda la Costa Española. Toda la información se recibe en tiempo real en Puertos del Estado, que es quien se encarga de su gestión. Los instrumentos están ubicados en puntos con profundidades entre 200 y 800 metros y miden parámetros oceanográficos y meteorológicos. Las boyas están situadas en: Bilbao, Cabo de Peñas, Estaca de Bares, Villano-Sisargas, Cabo Silleiro, Golfo de Cádiz, Mar de Alborán, Cabo de Gata, Cabo Begur, Mahón, Tenerife y Gran Canaria. Los datos son transmitidos cada hora vía satélite y se pueden consultar en la página web de Puertos del Estado. Con ellas se obtienen las 10 fachadas marítimas de la ROM 03-91.
- C) Datos procedentes de **modelado numérico de predicción y retroanálisis** (puntos WANA, WASA E HIPOCAS)
- El conjunto de *datos WASA* procede del proyecto financiado por la UE que lleva el mismo nombre. Dicha base de datos está formada por el retroanálisis de oleaje de 40 años (1955- 1994). Los datos se obtuvieron aplicando el modelo de generación de oleaje WAM en el Atlántico Norte.
  - El *proyecto WANA*, puesto en marcha por el Programa Marítimo de Puertos del Estado, utiliza el modelo WAN de generación del oleaje en una red próxima a las costas españolas con datos desde 1995 cada 3-5 horas y con una resolución espacial de 0,125°-0,25°.
  - En el *proyecto europeo HIPOCAS*, se ha generado una base de datos homogénea de 44 años (1958-2001). La resolución horizontal oscila entre 0,25° y 0,125° y las resoluciones temporales varían entre 1 y 3 horas. Estos datos de oleaje se obtienen a partir del retroanálisis de 44 años de datos atmosféricos obtenidos del modelo REMO que son utilizados como forzamiento para el modelo numérico WAM de oleaje.
  - El objetivo general del *proyecto europeo STOWASUS-2100* ha sido estudiar eventos extremos de temporales, mareas meteorológicas y oleaje partiendo de las condiciones climáticas actuales, así como de un escenario con una concentración de CO2 doble de la existente en la actualidad, para el 2100. Este proyecto se ha basado en el modelado numérico atmosférico/oceanográfico conjunto en las regiones del Atlántico Norte Europeo y del Mar Mediterráneo, especialmente en el Adriático. Las series de datos incluyen 30 años de información, en cada escenario.
  - PRUDENCE* constituye la base de datos atmosféricos más detallada en la actualidad. Al igual que STOWASUS-2100 se han realizado simulaciones para el escenario actual y de doble de CO2 en la atmósfera, para caracterizar cambios en variables extremas de precipitación y viento. Hay que indicar que los datos procedentes de modelado numérico tienen que ser calibrados con datos reales obtenidos en boyas.



D) **Datos de mareas.** P.E. tiene una red de mareógrafos (39 mareógrafos), REDMAR se constituyó en 1992. El Instituto Español de Oceanografía (IEO) tiene series de datos desde 1944. Existen varios tipos de mareógrafos, aunque en REDMAR utiliza tecnología de barrido de frecuencias, que permite la monitorización del nivel del mar en todo el rango de frecuencias, incluido el oleaje o agitación. Otros tipos de mareógrafos son:

- De flotador
- De presión
- De presión por burbujeo
- De presiones múltiples
- Sensores rádar

## 2. MODELOS NUMÉRICOS Y MODELOS FÍSICOS A ESCALA REDUCIDA.

### MODELOS NUMÉRICOS

El modelado numérico (a veces llamado modelización numérica) es una técnica basada en el cálculo numérico, utilizada en muchos campos de estudio (ingeniería, ciencia, etc.) desde los años 60 para validar o refutar modelos conceptuales propuestos a partir de observaciones o derivados de teorías anteriores.

Si el cálculo de las ecuaciones que representan el modelo propuesto es capaz de ajustar las observaciones, entonces se habla de un modelo consistente con las mismas, y se dice también que el modelo numérico que confirma las hipótesis (el modelo); si el cálculo no permite en ningún caso reproducir las observaciones, se habla de un modelo inconsistente con los datos y que refuta el modelo conceptual. A menudo, este término se utiliza como sinónimo de simulación numérica.

Los modelos científicos de la realidad se crean mediante modelado matemático. Un modelo matemático determina el conjunto de ecuaciones que gobiernan el sistema que se estudia y del cual se tienen observaciones metódicas. Tradicionalmente se intentaban encontrar soluciones analíticas a esas ecuaciones para validarlas (reproducir las observaciones) y para posibilitar su uso (p.e., predicción del comportamiento del sistema partiendo de un conjunto de parámetros y condiciones iniciales). Los modelos numéricos resultaron de utilizar los ordenadores con el mismo propósito: resolver las ecuaciones de un modelo matemático no de forma analítica sino numérica.

Un modelo conceptual o científico se forma al atribuir un conjunto de observaciones con una serie de hipótesis y aproximaciones. La validación se produce cuando el modelo numérico basado en esas hipótesis y aproximaciones es capaz de reproducir el conjunto de observaciones considerado.

### MODELOS FÍSICOS

El Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC) es uno de los órganos en los que se estructura el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

Este centro tiene una serie de modelos físicos que permiten estudiar los procesos marinos.

Algunos de los equipos más destacados que tiene el CEPYC son los siguientes:

#### **Tanques de oleaje 35 y 45 x 6,50 m**

Se dispone de 2 Tanques de ensayo de 6,50 m de anchura con longitudes de 35 y 45 m, y profundidades de 1,50 y 1,80 m respectivamente. Son instalaciones muy versátiles para ensayos de estructura marítima en modelos físicos de dos y tres dimensiones.

Se han utilizado en estudios de verificación del diseño de obras de abrigo, analizando el comportamiento de sus puntos singulares (morros, cambios de alineación...). Destacan los estudios realizados en estas instalaciones para los puertos de Bilbao (Ciérvana), Valencia, ampliación de Las Palmas, Castellón, ampliación de Sagunto, Alicante, Candás y Luanco, y el nuevo puerto deportivo de San Andrés en Málaga.

Se han utilizado también en ensayos sistemáticos del bloque "Accropode", en estudios de estabilidad de espigones y ensayos para el análisis de la mitigación del oleaje por efecto de las praderas de Posidonia, así como en diversos proyectos de los programas MAST II y MAST III de la U.E., además de otros ensayos de elementos singulares (depósito flexible de agua dulce en el mar, plataformas para energía eólica marina).

#### **Laboratorio de Experimentación Marítima**

El Laboratorio de Experimentación Marítima alberga las grandes instalaciones de ensayo mediante modelos físicos a escala reducida del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, incluyendo instalaciones singulares de primer nivel como el Tanque de Oleaje Multidireccional y el Canal de Oleaje y Viento de Gran Escala.

Fue fundado por el profesor Ramón Iribarren en 1951 como Laboratorio de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, integrándose posteriormente (1957) en el CEDEX, como Centro de Estudios de Puertos y Costas.

El Laboratorio está albergado en una sala de 8.000 m<sup>2</sup> cuadrados sin pilares intermedios, lo que permite disponer de un espacio diáfano para la construcción de modelos físicos, contando además con talleres de apoyo (mecánica, carpintería, fabricación de piezas para construcción de modelos a escala) así como de electrónica e instrumentación.

Dispone de instalaciones fijas de ensayos (tanques y canales de oleaje) y un espacio libre disponible para construcción de modelos 3D desmontables. Dichas instalaciones cuentan con dos depósitos de agua de unos 1.000 metros cúbicos cada uno, así como redes de energía y datos. Asimismo, dispone de puentes grúa de 1.500 kg para transporte de materiales y equipos. Una red de pasarelas elevadas permite la observación cenital de los modelos y la captación de imágenes desde puntos elevados.

#### **Canal de Oleaje y Viento de Gran Escala**

Instalación de carácter singular para ensayos a gran escala (1:8 - 1:30) de estructuras marítimas sometidas a la acción del oleaje y del viento. La reproducción de los fenómenos de interacción oleaje-estructura a gran escala permite aumentar la fiabilidad de los resultados, lo que favorece el diseño de estructuras marítimas, en lo relativo a su seguridad estructural y funcionalidad.

Como trabajos destacados realizados en esta instalación cabe citar el dique del Este del Puerto de Barcelona, el dique del Puerto Exterior de Ferrol, el dique de Punta Langosteira en La Coruña, el dique de Isla Verde (Algeciras), así como varios trabajos de I+D+i sobre tipologías innovadoras de diques y muelles. EL Túnel de Viento de ha utilizado en la medida de esfuerzos sobre aerogeneradores marinos y en estudios experimentales para el análisis del efecto del rebase.

Dispone de una galería lateral acristalada para visualización de ensayos y de un fondo ajustable para reproducir las pendientes de los fondos marinos.



#### Tanque de oleaje multidireccional

El tanque de oleaje multidireccional del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX permite que la reproducción de los fenómenos relacionados con la propagación del oleaje y la interacción de éste con las estructuras marítimas resulten más representativos de la realidad. Con esta instalación y el sistema de generación de oleaje multidireccional es posible la generación de oleajes cruzados, de crestas cortas o con cualquier reparto direccional de energía, lo que lo distingue de la mayor parte de las instalaciones existentes, sólo capaces de generar oleaje de una dirección. El generador de oleaje está constituido por múltiples módulos y paletas cuyos movimientos independientes se controlan mediante un sistema de control en red. La combinación de los movimientos de las paletas produce la estructura deseada de oleaje generado.

Las grandes dimensiones del tanque permiten la realización de estudios experimentales en modelo físico de tres dimensiones, a escalas suficientemente grandes (1:20 – 1:40) para el análisis del comportamiento de estructuras marítimas y tramos de costa. La singularidad de la instalación hace que sea de gran utilidad para el desarrollo de investigación básica sobre el oleaje en zonas costeras y para el contraste de modelos numéricos.

En el año 2020 se ha procedido a su renovación, mejorándose sus capacidades.

