

**ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS
Comisión Interamericana de Puertos**

(CIDI/CIP/doc. 127/03)

**LOS MODELOS FÍSICOS A ESCALA REDUCIDA Y LA SIMULACIÓN DE
MANIOBRAS DE BUQUES. HERRAMIENTAS PARA EL DISEÑO PORTUARIO**

Ramón M^a Gutiérrez Serret¹; José Lozano Pedroche² y Raúl Atienza³

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX. C/. Antonio López 81, 28026 Madrid. España. e-mail: Ramón.M.Gutierrez@cedex.es

¹Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director; ²Ingeniero de Caminos, C. y P.; ³Ingeniero Naval.

RESUMEN

Con la presente ponencia se pretende dar una visión general y eminentemente práctica de la utilidad de los modelos físicos a escala reducida y de la simulación de maniobra de buques en el diseño de obras portuarias. Para ello, en primer lugar, se incluyen unas ideas sucintas sobre el fundamento teórico de estas técnicas, sobre sus principales aplicaciones y los equipos y las instalaciones que existen en los laboratorios de ingeniería marítima, se comenta el presente y el futuro de estas herramientas y finalmente se presentan algunos ejemplos del sistema portuario español, ilustrativos de lo anteriormente expuesto.

ABSTRACT

The aim of this report is to present a practical overview about the use of physical modelling and ship manoeuvring simulation in harbour projects. For this, in first place, it is included a brief commentary in relation with the fundamentals of this techniques, after it is presented the main applications of this tools, the installations and equipment of a maritime engineering laboratory and is analysed the present and future of both: physical modelling and ship manoeuvring simulation techniques. Finally is presented some examples taken from the Spanish harbour system.

ÍNDICE	Página
1. INTRODUCCIÓN.	1
2. MODELOS FÍSICOS.	
2.1. Fundamento	2
2.2. Tipos de modelos y de ensayos portuarios.	3
2.3. El laboratorio de ingeniería marítima. Instalaciones y equipos.	
2.3.1. Instalaciones.	6
2.3.2. Equipos.	7
3. SIMULACIÓN DE MANIOBRA DE BUQUES.	
3.1. Fundamento.	7
3.2. Tipos de modelos de simulación.	8
3.3. Planteamiento de la simulación y resultados.	9
4. PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS Y DE LA SIMULACIÓN DE MANIOBRA DE BUQUES DURANTE EL PROYECTO.	10
5. PRESENTE Y FUTURO DE LOS MODELOS FÍSICOS Y DE LA SIMULACIÓN DE MANIOBRA DE BUQUES	11
6. EJEMPLO 1: MODELOS FÍSICOS Y SIMULACIÓN DE MANIOBRAS PARA EL PROYECTO DEL NUEVO PUERTO EXTERIOR DE FERROL.	
6.1. Preliminar.	12
6.2. Ubicación y características del nuevo puerto	12
6.3. Modelos físicos.	
6.3.1. Ensayos realizados	13
6.3.2. Ensayos de agitación y barcos atracados	14
6.3.3. Ensayos del dique de abrigo	16
6.4. Simulación de maniobra de buques	
6.4.1. Objetivo	21
6.4.2. Condiciones de clima marítimo	21
6.4.3. Buques estudiados	21
6.4.4. Estrategia de las maniobras	22
6.4.5. Simulaciones y resultados	22
7. EJEMPLO 2: SIMULACIÓN DE MANIOBRAS PARA EL PROYECTO DE UN PUENTE BASCULANTE EN EL PUERTO DE TARRAGONA.	
7.1. Preliminar	23
7.2. Condiciones de clima marítimo	23
7.3. Buques estudiados	24
7.4. Simulaciones y resultados	24
ANEXO:	
INSTALACIONES DE ENSAYO DEL CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS DEL CEDEX.	26 - 30

1.- INTRODUCCIÓN.

Los modelos físicos junto con los numéricos, la simulación de maniobras de buques, las medidas en la naturaleza y la experimentación “in situ”, constituyen el conjunto de herramientas a disposición del ingeniero para el diseño de las obras marítimas en general y de las portuarias en particular. Todas estas utilidades, lejos de ser excluyentes, constituyen un conjunto de medios complementarios, cuya aplicación ordenada permite optimizar sus capacidades y utilizar sus sinergias en aras a alcanzar la mejor solución para el problema en estudio.

En el ámbito portuario el modelo físico es la reproducción a escala reducida de las magnitudes más representativas del sistema o elemento -dársena, dique, muelle, etc- a ensayar, el cual, con las simplificaciones introducidas según las necesidades de cada caso, constituye el prototipo. El modelo numérico es la representación del sistema utilizando desarrollos matemáticos.

La simulación de maniobra de buques, en sus dos versiones: “modelo numérico de simulación con autopiloto en tiempo acelerado” y “simuladores en tiempo real”, constituye el medio, actualmente de uso generalizado, para el análisis del movimiento del buque en el entorno portuario, aportando una fiabilidad mucho mayor a la que anteriormente se tenía utilizando reglas empíricas de diseño (círculo de maniobra, distancia de parada, etc.)

Los modelos numéricos son instrumentos flexibles y de bajo coste, que facilitan el análisis rápido de diversas alternativas en planta del puerto en estudio. Los modelos físicos y los simuladores de maniobra de buques en tiempo real, implican plazos y costes mayores que los estudios en modelo numérico, costes que, en todo caso, son irrelevantes respecto del de la futura obra. Las medidas en la naturaleza y la experimentación “in situ” son los recursos que más dificultades, tiempo y coste entrañan, pero son fundamentales para que los modelos -físicos y numéricos- y la simulación de maniobra de buques sean representativos de lo que ocurre en la realidad.

Los modelos físicos y los simuladores de maniobras en tiempo real son útiles con los que se comprueba y optimiza lo previamente diseñado. Para este diseño preliminar se utilizan reglas de buena práctica, sancionadas por la experiencia, formulaciones empíricas y modelos numéricos, entre los que cabe destacar los de propagación de oleaje, los de agitación y resonancia (ondas largas) en dársenas, los de simulación de maniobra de buques con autopiloto en tiempo acelerado o los de transporte sólido litoral.

La necesidad de los modelos físicos y la simulación de maniobra de buques viene determinada por la imposibilidad de dar respuesta a los múltiples problemas de la ingeniería portuaria exclusivamente con modelos numéricos o con formulaciones empíricas. En efecto, la complejidad de muchos de estos problemas, en los que está presente el océano y la atmósfera cuyos comportamientos no son todavía comprendidos por completo, determina el desconocimiento de cómo plantear o resolver las ecuaciones que rigen el fenómeno físico en estudio o del funcionamiento del propio fenómeno.

En cualquier caso, los modelos -físicos y numéricos- y la simulación de maniobra de buques, entrañan inevitables simplificaciones de la realidad y un análisis centrado sólo en el aspecto/s más importante/s en cada caso. No obstante, en algunas situaciones, estas simplificaciones permiten analizar procesos de difícil apreciación en la realidad, enmascarados por su propia complejidad.

2.- MODELOS FÍSICOS.

2.1.- Fundamento.

La teoría de los modelos físicos se basa en que a partir de las magnitudes fundamentales -longitud (L), tiempo (t) y masa (M)-, las restantes que intervienen en la mecánica de fluidos quedan predeterminadas (magnitudes derivadas) y en que en este sistema (L-t-M) las ecuaciones hidrodinámicas del fluido son adimensionales y por lo tanto se mantienen invariantes frente a una transformación del tipo:

$$L_p = \lambda L_m ; \quad t_p = \lambda_t t_m ; \quad M_p = \lambda_M M_m ; \quad [m: \text{modelo}, p: \text{prototipo}]$$

De esta manera, si se conoce el comportamiento en el modelo (sistema L_m - t_m - M_m) de un determinado fenómeno, teóricamente es posible deducir el de dicho fenómeno en el prototipo (sistema L_p - t_p - M_p), sin más que utilizar para cada magnitud el cambio de escala según los valores de los parámetros λ , λ_t y λ_M adoptados en la transformación anterior.

En dicha transformación cada ecuación representa lo que en la teoría de modelos físicos se conoce como “ semejanzas modelo-prototipo”. La primera de ellas es la “ semejanza geométrica”, la segunda la “ semejanza cinemática” y la tercera la “ dinámica”.

La “ semejanza geométrica” determina que la relación de dimensiones homólogas modelo-prototipo es constante, denominándose a dicha relación “escala geométrica” o simplemente “escala” (λ). En esta semejanza sólo influyen aspectos de forma, destacándose los detalles geométricos y la rugosidad superficial, los cuales representan una primera dificultad para que la semejanza modelo-prototipo sea completa.

La “ semejanza cinemática” implica la similitud de movimientos modelo-prototipo, lo que junto a la semejanza geométrica determina que las trayectorias de partículas homólogas modelo-prototipo sean semejantes. En este caso, la relación de semejanza (λ_t) se conoce como “escala de tiempos”.

La “ semejanza dinámica” entre dos sistemas geométrica y cinemáticamente semejantes supone la constancia de la relación de masas y, por lo tanto, de fuerzas en elementos homólogos. La relación entre masas es la “escala de masas (λ_M)”.

Como se ha indicado, las ecuaciones de la hidrodinámica permanecen invariantes en la transformación modelo-prototipo, pero no ocurre lo mismo con el fluido, que no se puede reproducir a escala. Sus características físicas (densidad, viscosidad, etc.), a efectos del modelo, cambian respecto a las que tiene en el prototipo de acuerdo con las escalas elegidas (λ , λ_t , λ_M).

Anteriormente, ya se indicó la imposibilidad de lograr una semejanza geométrica completa por la dificultad de reproducir plenamente forma y rugosidad. Con la semejanza dinámica este problema aumenta, pues la relación entre las fuerzas que actúan en el prototipo (gravedad, viscosidad, tensión superficial, elásticas y de presión) y en el modelo no se mantiene constante, ni su importancia en ambos sistemas es la misma.

Sin embargo, en la práctica, una “ semejanza dinámica parcial”, basada en las fuerzas predominantes en cada caso es suficiente para que el modelo facilite la solución del problema que con el ensayo se busca, surgen así los diversos criterios de “ semejanza dinámica parcial” o simplemente de “ semejanza parcial” existentes.

En esta semejanza parcial dos de sus escalas, tiempo y masa (λ_t , λ_M), quedan prefijadas al determinar la fuerza preponderante en el fenómeno y el fluido a utilizar, por lo que la única escala a elegir es la geométrica (λ). Ello se realiza de forma que el modelo tenga las dimensiones necesarias para que los ensayos sean representativos de la realidad, habida cuenta, entre otros factores, del tamaño del prototipo, del espacio disponible, de las prestaciones de los equipos.

Por lo tanto, una vez elegida la escala geométrica (λ) y la semejanza parcial, utilizando el análisis dimensional, pueden determinarse las otras dos escalas (λ_t , λ_M) así como con las magnitudes derivadas.

Las semejanzas parciales, según lo indicado, se establecen analizando cuál es la fuerza dominante en el fenómeno a estudiar, a fin de su reproducción fidedigna en el modelo. Ello determina en el resto de fuerzas desviaciones con el prototipo, aparecen así los “efectos escala”, que, en cada caso, han de ser analizados para asegurar la validez de los resultados del ensayo. Para ello conviene que la escala sea la mayor posible.

En la mayoría de los ensayos hidráulicos las fuerzas de tensión superficial o elásticas son pequeñas, por lo que pueden obviarse sin errores significativos. En cambio, predominan las de gravedad y viscosidad, en especial las primeras, por ello la semejanza que adopta esta fuerza como principal -“semejanza de Froude”- es la de mayor aplicación en hidráulica, mostrándose en la tabla 1 las escalas de tiempo y de masa (λ_t , λ_M) y de las magnitudes derivadas en función de la escala geométrica.

MAGNITUD DERIVADA	DIMENSIÓN	CRITERIO DE SEMEJANZA FROUDE
TIEMPO (λ_t)	T	$\lambda^{1/2}$
MASA (λ_M)	M	λ^3
VELOCIDAD	$L T^{-1}$	$\lambda^{1/2}$
VELOC. ANGULAR	T^{-1}	$\lambda^{-1/2}$
ACELERACIÓN	$L T^{-2}$	1
CAUDAL	$L^3 T^{-1}$	$\lambda^{5/2}$
FUERZA	$M L T^{-2}$	λ^3
PRESIÓN	$M L^{-1} T^{-2}$	λ

Tabla.1. Magnitudes derivadas. Dimensiones y escalas. Criterio de semejanza de Froude.

2.2.- Tipos de modelos y de ensayos portuarios.

Según que en el modelo su fondo se construya de forma que permanezca inalterado por el oleaje o las corrientes generadas o que, por el contrario, sea alterado por estas acciones, se tienen los modelos de “fondo fijo” y de “fondo móvil”.

En los estudios portuarios la mayoría de los modelos son de “fondo fijo”, siendo los ensayos más frecuentes los de agitación y ondas largas, los de comportamiento de buques atracados y los de estabilidad, funcionalidad (rebases) y esfuerzos en diques. No obstante, con menos profusión, también se realizan otros ensayos (movimientos verticales de buques en zonas con calados reducidos o comportamiento de estructuras flotantes o singulares). Por el contrario, en el ámbito costero son los modelos de “fondo móvil” los que tienen mayor interés, a fin de analizar los fenómenos del transporte sólido litoral.

El objeto de los ensayos de agitación (figura 1) es conocer el oleaje que se produce en el puerto o en sus zonas de influencia con un temporal medio, para evaluar su diseño en planta a efectos su operatividad general y de la navegabilidad en sus accesos y, en su caso, proponer cambios en la planta o en las estructuras proyectadas.



Figura 1.- Ensayo de agitación. Ampliación del puerto de Barcelona.

Con los ensayos de resonancia de dársenas (figura 2) se busca el periodo/s asociado a las ondas largas coincidente/s con alguno de los modos de oscilación de la dársena, a fin de arbitrar medidas que eviten o mitiguen esta situación (modificación de la planta o disposición de playas amortiguadoras y aperturas en contornos). Se destaca la dificultad de estos ensayos consecuencia de lo complejo del fenómeno, de la escasez de medidas en la naturaleza y del amplio rango de periodos de estas ondas, por ello las soluciones que se adopten conviene sean contrastadas con los registros disponibles o al menos con observaciones in situ.

Barco escorado por efecto onda larga



Modelo del puerto



Figura 2.- Ensayos de resonancia (ondas largas). Puerto Vega (Asturias).

La finalidad de los ensayos de comportamiento del buque atracado (figura 3) es el conocimiento detallado de la operatividad de un determinado atraque y en general de un muelle, en función de los barcos que deba recibir. Para ello, con oleaje medio se miden los movimientos del buque atracado y las fuerzas en sus amarras y en las defensas, comparando con los valores admisibles para el tipo de buque en estudio.



Figura 3. - Ensayo de comportamiento de barcos atracados.

Los ensayos de diques -verticales, en talud y otros- (figura 4), tienen por finalidad estudiar, en condiciones extremas de oleaje, su estabilidad, medir esfuerzos, evaluar posibles averías, cuantificar los rebases producidos por el oleaje o conocer la transmisión del oleaje en el caso de obras permeables o rebasables.



Dique en talud. Ensayo 3D en Canal ancho.

Dique vertical. Ensayo en tanque de oleaje multidireccional. Medida de presiones

Figura 4. - Ensayo de diques. En talud y vertical.

En los ensayos de fondo móvil (figura 5) se estudia: erosión, estabilidad, defensa, transporte sólido litoral y regeneración de playas. Su dificultad es mayor que en los de fondo fijo y su resultado menos preciso.



Figura 5. - Modelo puerto deportivo de Mompás (San Sebastián).

2.3.- El laboratorio de ingeniería marítima. Instalaciones y equipos.

2.3.1.- Instalaciones¹.

Las instalaciones para ensayos en modelo físico pueden clasificarse en “permanentes” -canales y tanques de oleaje-, en los que se realizan ensayos bi (2D) y tridimensionales (3D) de diques y de otras estructuras; o “temporales” -tanques de oleaje tridimensionales (3D) construidos “ad hoc” para cada modelo-, en los que se acometen ensayos de agitación, resonancia y comportamiento de buques atracados. Además, como instalaciones permanentes se encuentran los simuladores de maniobra de buques.

Las dimensiones de las instalaciones “permanentes” son muy variables, existiendo canales estrechos (1-3 m) junto a tanques con anchos de hasta 8 m. En ambos casos las longitudes oscilan de una a varias decenas de metros y los calados de menos del metro a 2-3 m. Los ensayos que, principalmente, se acometen estas instalaciones son los relativos a diques de abrigo y suelen realizarse a escalas entre 1:30 y 1:60.

En las Instalaciones “permanentes” sobresalen como singulares los “tanques de oleaje multidireccional” y los “canales de grandes dimensiones”. En los tanques se pueden generar oleajes cruzados de crestas cortas con diferentes repartos de energía. Son rectangulares de unos 20 a 40 m y los tipos de ensayos y las escalas son similares a las de los canales.

Los canales de grandes dimensiones, con longitudes de decenas a centenares de metros y anchos y calados de 3–7 m, minimizan los efectos de escala y permiten optimizar el diseño estructural, estudiar el transporte sólido longitudinal y realizar actividades singulares de investigación, al igual que en los tanques multidireccionales,. Las escalas de ensayo varían de 1:10 a 1:20.

¹ De las instalaciones que se exponen en este apartado, en el Anexo a esta ponencia se incluyen las características de las existentes en el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.

Las instalaciones “temporales” (tanques 3D contruidos ad hoc para cada ensayo) ocupan superficies mayores que las “permanentes” (centenares a miles de m²). Están destinadas a ensayos 3D de agitación, ondas largas y barcos atracados y estos se realizan a escalas entre 1:80 a 1:200, siendo las más frecuentes entre 1:100 y 1:150.

En cualquier, caso la nave de ensayos está dotada de otras instalaciones y servicios auxiliares como son: depósitos de agua, instalaciones eléctricas y neumáticas, puentes grúa, almacenes y talleres mecánicos, eléctricos, de carpintería y de elaboración de bloques y piezas para los diques.

2.3.2.- Equipos.

En ambas instalaciones -permanentes y temporales- los equipos para los ensayos se componen de generadores de oleaje, sondas y sensores para registro de datos, convertidores de señal analógica-digital, medios informáticos, de fotografía y vídeo.

El oleaje se genera con paletas movidas por actuadores –mecánicos, hidráulicos, o eléctricos-, con movimientos de: traslación, rotación o traslación/rotación y puede ser regular, de escasa aplicación actualmente, irregular, es el mas utilizado y multidireccional, es el mas realista y su uso se está generalizando.

Para medir las variaciones del agua (oleaje y ondas largas) se utilizan sondas eléctricas -resistivas o capacitivas-, en las que la tensión varía en función de su parte seca. Las corrientes se miden con micromolinetes o mediante sistemas de ultrasonidos, electromagnéticos u ópticos (PIV: medidor de velocidades mediante imagen de partículas)

En los diques verticales y espaldones de los diques en talud para medir las sollicitaciones del oleaje se utilizan dinamómetros y sensores de presión, estos últimos determinan la secuencia temporal de presiones instantáneas producida por el oleaje. Para los rebases se utilizan recipientes con los que se cubica el volumen de agua que supera el dique y además se realiza el conteo de las olas que lo rebasan. Para evaluar las modificaciones de forma en el perfil de un dique se usan medidores de perfil mecánicos, ultrasónicos y ópticos (láser) ó medios topográficos.

Los desplazamientos en los ensayos de buques -atraques o movimientos verticales- se miden con sistemas ópticos, sondas de nivel unidas al buque, potenciómetros, acelerómetros o inclinómetros y las fuerzas en las amarras con extensómetros.

Todo este instrumental produce una señal eléctrica, que acondicionada y ampliada es recogida por un conversor analógico-digital para su registro y tratamiento informático.

3.- SIMULACIÓN DE MANIOBRA DE BUQUES.

3.1.- Fundamento.

La simulación de maniobra de buques facilita el diseño y la explotación de las instalaciones portuarias, siendo también de aplicación en la formación de pilotos, en estudios de tráfico portuario y del propio buque. En ella, se reproduce el comportamiento del buque durante las maniobras de acceso/salida al puerto, sometido a las acciones climáticas y auxiliado, en su caso, por remolcadores, obteniéndose así orientaciones sobre cómo realizar las maniobras, márgenes de seguridad, la necesidad de medios de remolque, etc.

El fundamento de la simulación de maniobras, independientemente del tipo de simulación y del instrumental de que disponga el equipo, reside en el modelo matemático que gobierna el comportamiento del buque.

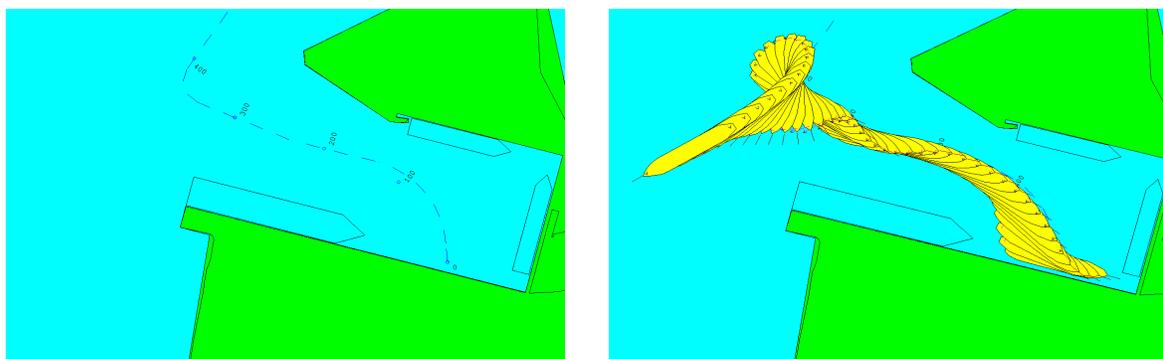
Este modelo, de acuerdo con la 2ª ley de la dinámica ($F = \text{masa} \times \text{aceleración}$) calcula la trayectoria del centro de gravedad del buque y el rumbo a lo largo del tiempo, sometido a las siguientes fuerzas: sustentación y fricción del casco, propulsión y gobierno (timón) del buque, acciones climáticas -oleaje, viento, corrientes- y operación de remolcadores, todo ello teniendo en cuenta los efectos de aguas poco profundas, batimetría variable y de la succión y repulsión de las orillas.

3.2.- Tipos de modelos de simulación.

Dependiendo del instrumental con que esté dotado el equipo e simulación se puede hablar de grandes categorías de simulación: la simulación con autopiloto en tiempo acelerado y los simuladores en tiempo real, existiendo entre ambas otras categorías intermedias que se conocen como micro y minisimuladores.

La simulación con autopiloto en tiempo acelerado se basa en la modelización tanto del comportamiento del buque (modelo matemático) como de la actuación del piloto, el cual es sustituido por un algoritmo que, actuando sobre la propulsión del buque y sobre su timón y partiendo de una trayectoria de referencia prefijada por el técnico responsable de la simulación, trata de seguir bajo las condiciones climáticas establecidas (figura 6).

La simulación de la maniobra se realiza en un tiempo muy corto (segundos), dependiendo de la capacidad de cálculo del ordenador y en las versiones actuales es posible la actuación simplificada de remolcadores.



Trayectoria de Referencia

Trayectoria del buque (salida ciando)

Figura 6. Simulación de maniobras con autopiloto en tiempo acelerado

Los micros simuladores introducen la interacción piloto-sistema. Las maniobras simuladas son en tiempo real, de forma que el piloto debe tomar decisiones durante la maniobra: órdenes a la máquina, timón y remolcadores.

El equipo de simulación consta de un ordenador y periféricos, figurando en su pantalla además de la trayectoria del buque, su rumbo, la velocidad, el ángulo del timón y las revoluciones del motor, no existiendo reproducción del instrumental del buque.

Los minisimuladores, que constituyen un 3º escalón en esta técnica, incorporan una reproducción simplificada del puente de un buque, visión de radar e imagen exterior de la maniobra, tal como se apreciaría desde el puente. (figura 7).

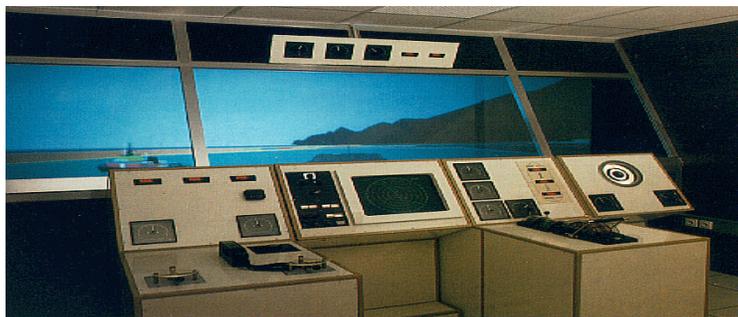


Figura 7. Minisimulador. (Antigua instalación CEDEX. En ejecución un simulador completo).

Finalmente los simuladores completos, constituyen el estado más avanzado de la técnica. Incorporan una reproducción completa del puente del buque, una representación de alta calidad de la imagen exterior proyectada sobre una pantalla circular de grandes dimensiones que puede llegar a los 360°, en la que es posible visualizar la maniobra en diferentes condiciones meteorológicas (día, noche, crepúsculo, niebla, lluvia, etc).

Además disponen de sistemas de sonido (ruido de la máquina, bocinas, sirenas, viento, etc.) e incluso, en algunos casos, el puente es móvil mediante actuadores hidráulicos o eléctricos, de forma que se pueden reproducir los movimientos provocados por el oleaje en el buque, lo que es de interés en el caso de maniobras con fast ferries.

3.3.- Planteamiento de la simulación y resultados.

La ejecución de un estudio de simulación requiere su planificación, creando, en primer lugar, el “escenario de la maniobra”: características del buque/s (propulsión , gobierno, etc.), disposición del puerto (planta y batimetría) y condiciones climáticas (oleaje, viento, corrientes, etc.). Después, ha de plantearse la estrategia de las maniobras, para lo que es de gran utilidad la interlocución con los prácticos del puerto en estudio.

Finalmente los resultados de la simulación se plasman en lo que se conoce como “valoración experta”, en la que en ase a los datos obtenidos de velocidad, distancias a los bordes del canal de navegación o a los muelles, uso de los medios de remolque, etc. El personal encargado de la simulación evalúa las dificultades y riesgos de las maniobras.

Además, cuando existe interacción piloto-máquina, es posible realizar un análisis de riesgo. Para ello, se repite una misma maniobra un número suficiente de veces (> 8), al fin de tener una muestra representativa y asignando una ley de distribución a las posiciones de los extremos de babor, estribor y centro geométrico del buque, se obtiene el área ocupada y la probabilidad de colisión o invasión de zonas no navegables (figura 8).

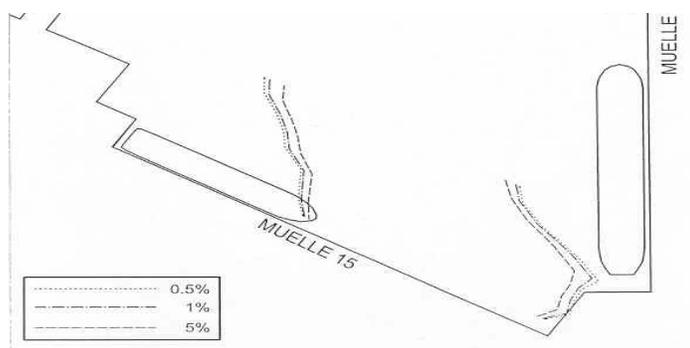


Figura 8. Envoltentes de trayectorias. Análisis de riesgo. Puerto de Alicante

4.- PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS Y DE LA SIMULACIÓN DE MANIOBRA DE BUQUES DURANTE EL PROYECTO.

Los ensayos físicos y la simulación de maniobra de buques, especialmente el caso de la simulación en tiempo real, deben enmarcarse en el desarrollo del proyecto como cualquier otra etapa del mismo. Dichas etapas, en las que se comprueban y optimizan los diseños previos, deben planificarse desde el inicio del proyecto a fin de que en su cronograma estén contabilizados los plazos que estas actividades requieren, ya que, en caso contrario, provocarían innecesarios retrasos en su finalización.

De acuerdo con esta idea, para las obras portuarias más frecuentes, se expone la secuencia de ensayos y trabajos de simulación que, en general, se considera conveniente seguir durante el proyecto, así como una orientación sobre los plazos que cada uno requieren. Ello se plantea sobre la base de un proyecto portuario de cierta importancia.

Para el diseño portuario en planta, tras los estudios previos en modelo numérico -propagación del oleaje, agitación, ondas largas y simulación de maniobras con autopiloto en tiempo acelerado- con los que habrá definido una planta inicial y a la vista de los demás condicionantes del proyecto, debe acometerse un ensayo de agitación y de comportamiento de buques atracados, no siendo habituales los de ondas largas.

El primer ensayo, para un temporal medio, facilita la agitación en el puerto así como el orden de magnitud de su operatividad por zonas. Con el ensayo de barcos atracados se determinan los esfuerzos en amarras y defensas y los movimientos del buque en el atraque en estudio, deduciendo, con mayor precisión que en el ensayo de agitación, la operatividad del tipo de barco ensayado y del atraque considerado. Con todo ello se puede decidir sobre la bondad de la planta o, en su caso, modificarla en lo necesario, repitiendo de nuevo los ensayos total o parcialmente según cada situación.

En el caso de los diques de abrigo, particularmente de los "en talud", tras el diseño preliminar mediante las formulaciones habituales, la secuencia de ensayos suele comenzar con un modelo 2D de la sección tipo, en el que se estudia la estabilidad del manto o coraza de protección, los rebases y se miden esfuerzos en el espaldón, si existe este elemento, comprobando si el funcionamiento es correcto y caso de no serlo se realizan modificaciones -bloques o escolleras mayores, bermas más profundas, coronación más alta, etc.-; o bien, si al contrario, el diseño ensayado resulta demasiado conservador pueden proponerse cambios en sentido contrario repitiendo los ensayos.

En caso de diques verticales, igualmente, tras su diseño preliminar, su sección tipo se suele someter a un ensayo 2D en canal, en el que se miden las presiones y/o las fuerzas sobre sus paramentos, base (subpresiones) y espaldón y se comprueba la estabilidad de su berma de apoyo, si existe, y de los bloques de guarda.

De esta manera, en ambas tipologías, se verifica y se optimiza la sección tipo y, si la envergadura del dique lo aconseja, se acomete un ensayo 3D, habitualmente en un tanque de oleaje multidireccional, en el que se analiza el funcionamiento conjunto del dique -sección tipo, secciones singulares y morro-. Asimismo en el caso de obras de gran magnitud es habitual ensayar su proceso constructivo, comprobando el funcionamiento de sus diferentes etapas de obra (protecciones temporales, morros de invernada, etc.).

En el caso de estas estructuras es de gran magnitud o cuando presentan algún aspecto novedoso o singular puede acudir a ensayar su sección tipo (2D) en canal de grandes dimensiones.

Los ensayos de fondo móvil, poco frecuentes en el caso portuario, vienen precedidos por estudios de transporte sólido en modelo numérico, siendo la secuencia de estos ensayos de difícil planificación general, dada las particularidades de estos modelos.

Finalmente, a título orientativo y a riesgo de desviaciones, se facilitan algunos datos sobre tiempos medios para la realización de los ensayos convencionales antes indicados. En los ensayos 3D de agitación y comportamiento de buques atracados se suelen emplear de 4 a 6 meses. Los 2D y 3D de diques en canal requieren plazos de 2 a 3 meses, aumentando 1 ó 2 meses más en el caso de tanque multidireccional en función del tamaño del modelo. Para los ensayos en canal de grandes dimensiones se pueden indicar plazos de 3-5 meses. Todos estos plazos son en el supuesto de que las modificaciones que puedan resultar necesarias en los diseños preliminares sean de escasa entidad.

Por lo que atañe a la simulación de maniobra de buques, ya se ha indicado que la simulación con autopiloto en tiempo acelerado debe estar incluida en la etapa de estudios en modelo numérico, debiendo iniciarse una vez que se disponga de los datos de clima marítimo y de agitación, con una previsión de unos 3 meses de trabajo.

La simulación en tiempo real, es una de las actividades que se acomete con el proyecto avanzado y permite validar el diseño en planta y, en su caso, en alzado (calados en el canal de acceso y en las dársenas), así como orientar sobre la forma de llevar a cabo las maniobras, todo ello en condiciones más realistas que las de los modelos con autopiloto. Su plazo puede estimarse en unos 3 a 4 meses, dependiendo de la complejidad del estudio.

5.- PRESENTE Y FUTURO DE LOS MODELOS FÍSICOS Y LA SIMULACIÓN DE MANIOBRA DE BUQUES.

El presente de los modelos físicos tiene uno de sus antecedentes en las observaciones de Leonardo da Vinci (1452-1519). A partir de él se desarrolla un largo proceso en el que intervienen científicos como Newton (primera exposición de un criterio de semejanza, 1642-1727), Smeaton (primer modelo a escala, 1753), Froude (ensaya con barcos, 1870) y Reynolds (construye un modelo fluvial de fondo móvil, 1885), apareciendo hacia finales del siglo XIX los primeros laboratorios de hidráulica en el mundo, habiéndose desarrollado los grandes avances en esta materia en los últimos 70 años.

De esta forma se alcanza la situación actual, en la que los modelos físicos son una técnica consolidada, con la que se han desarrollado y validado muchos conocimientos de la hidrodinámica y de la ingeniería hidráulica, especialmente de portuaria, habiéndose facilitado así el diseño y la construcción de los grandes puertos hoy existentes.

Esta situación de los modelos físicos no puede concebirse sin la presencia de los modelos numéricos, instrumentos ambos que, como se ha indicado, son de uso complementario, de forma que frente a campos en los que los desarrollos matemáticos y la informática han desterrado los modelos físicos, como es, p. ej., el caso de los estudios de corrientes en estuarios, existen otros de pleno dominio de los modelos físicos.

En efecto, la complejidad de determinados fenómenos marítimos hace que todavía sean mal conocidos, siendo en estas situaciones los modelos físicos el recurso al que hay que acudir para su solución, tal ocurre con la estabilidad y rebases en los diques de abrigo o en los estudios del comportamiento de barcos atracados, aunque en este caso ya existen modelos numéricos comercializables.

En cualquier caso, en el futuro los modelos físicos cederán campo a los numéricos como ya lo han hecho, pero ambos coexistirán complementándose, de manera que, p. ej. los resultados obtenidos con un modelo físico podrán servir para fijar las condiciones de contorno en uno numérico o para validar nuevos desarrollos numéricos.

Adicionalmente a los modelos físicos y numéricos, se mencionan los “modelos híbridos o compuestos” en los que el modelo físico y el numérico funcionan de forma conjunta, de modo que la parte del fenómeno en estudio cuya solución numérica se desconoce, es reproducida en un modelo físico, mientras que aquella otra cuya solución matemática sí es conocida, pasa a ser gobernada por el modelo numérico actuando ambos en sincronía, de forma que, según el caso, uno de los modelos puede funcionar como entrada de datos para el otro o retroalimentarse mutuamente.

Por lo que respecta a la simulación de maniobra de buques, tanto en el caso de los modelos con autopiloto como en el de los simuladores en tiempo real, constituyen una técnica cuyo gran desarrollo se ha llevado a cabo en los últimos 15-20 años, que actualmente está consolidada y es de uso generalizado. No obstante, todavía son de prever mejoras significativas en este campo de la simulación, p. ej., implementando en los modelos numéricos el uso de sistemas de fondeo para maniobras de emergencia y otras mejoras o creando imágenes más realistas en la simulación en tiempo real.

6.- EJEMPLO 1:EL PROYECTO DEL NUEVO PUERTO EXTERIOR DE FERROL.

6.1.- Preliminar.

Se ha elegido esta actuación como ejemplo nº 1, tanto por la relevancia y magnitud del nuevo puerto como por el interés de los ensayos y la simulación de maniobra de buques realizados, los cuales son representativos de lo que la modelación física y la simulación pueden aportar al diseño portuario

6.2.- Ubicación y características del nuevo puerto.

El actual puerto de Ferrol se sitúa en el NW de la Península Ibérica, en el interior de la ría a la que da nombre, conectado al océano Atlántico mediante un canal de 4 Km., 200 m de ancho en su parte mas angosta y 12 m de calado (figura 9). Su actividad es comercial, con un tráfico compuesto por graneles sólidos, líquidos y mercancía general.



Figura 9. Puerto de Ferrol. Emplazamiento actual.

Las expectativas de crecimiento del tráfico, con horizonte en el 2025, determinaron que la Autoridad Portuaria planteara la necesidad de nuevas instalaciones que pudieran atender un tráfico compuesto por buques de mayor tamaño y requerimientos mas estrictos en su maniobra y en el servicio que ha de prestárseles.

Ante estas circunstancias, a principios de los años 90 se comenzaron los estudios para la ampliación del puerto, finalizando en el año 2000 con la redacción del proyecto de construcción, habiendo quedando emplazado en la bocana de la ría en la zona del cabo Prioriño (figura 10), en la cual oleajes del 4º cuadrante -NW- son los de mayor incidencia.



Figura 10. Nuevo Puerto de Ferrol. Simulación fotográfica (cortesía A.P. Ferrol).

El nuevo puerto consta de: un dique de 1.120 m, que arranca del cabo Prioriño a unos 350 m del acceso a la ría y tiene adosado un atraque para graneles líquidos, un muelle de 1.515 m para graneles sólidos y mercancía general con calado de 20 m y posibilidad de atraque para 4 buques de 300 m de eslora² y una gran explanada. Su presupuesto es de 150 M€, habiéndose iniciado en el 2001 la 1ª fase -el dique, 857 m de muelle y 90 ha de explanada-, con importe de 116 M€ y plazo 44 meses.

Durante la fase de proyecto y a solicitud de la Autoridad Portuaria, el CEDEX, en el marco del convenio establecido con el Ente Público Puertos del Estado, ha colaborado en el desarrollo del mismo, además de con los ensayos en modelo físico y la simulación de maniobra de buques, objeto de este apartado, en otras actuaciones, que van desde estudios de clima marítimo, al fondeo de una boya de medición del oleaje en la zona de la obra para contraste de datos con los de otras situadas en aguas profundas o a la asistencia técnica en materias ambientales.

6.3.- Modelos físicos.

6.3.1.- Ensayos realizados.

Los ensayos realizados han sido: “agitación y barcos atracados” y “estabilidad y funcionalidad (rebases) del dique de abrigo”. Estos últimos han consistido en: “ensayo bidimensional (2D) de la sección tipo”, “ensayo tridimensional (3D) del tronco y morro” y “ensayo 2D en canal de grandes dimensiones de la sección tipo”.

² Buques de diseño. Graneleros: líquidos 300.000 TPM, sólidos 150.000 TPM y portacontenedor 6.000 TEUs.

6.3.2.- Ensayos de agitación y barcos atracados.

6.3.2.1- Consideraciones generales.



Estos ensayos se realizaron a escala 1:150 (figura 11) con el tamaño necesario para reproducir: la obra, la zona costera con influencia en la agitación del puerto, la ría³, la batimetría desde - 40 m, con atención a las proximidades del arranque del dique donde la presencia de un bajo condiciona la evolución del oleaje y, por supuesto, con el espacio requerido por las paletas generadoras de oleaje, para que este llegue desarrollado al puerto.

Los oleajes de ensayo, obtenidos de estudios de clima marítimo y propagación de oleaje (CEDEX, 1996, 1997 y 1998), caracterizados mediante un espectro JONSWAP, son (tabla 2):

Figura 11. Panorámica del modelo

Dirección á (aguas prof.)	Dirección á (prof. 40 m)	T_p (s)	F_r (%)	K_{rs}	H_s (m)	\bar{a}
N, NNW	N-40°W	14	14,9	0,6	3,0	3,3
NW,WNW	W-10°N	14	18,5	0,5	3,0	3,3
N	W-12S	14	17,1	0,4	3,0	3,3

Tabla 2. Oleajes de ensayo. Características.

La generación de estos oleajes se realizó con varias unidades de paletas en las direcciones W-50°N y W-10°N y en la W-12S. El nivel de agua fue PMVE, existiendo en paletas una lámina de 37,5 cm (56,7 m en prototipo).

6.3.2.1- Ensayo de agitación.

Su objeto es medir la agitación en el puerto, obteniendo los coeficientes de agitación $(K_i)^4$ y determinado las curvas de isoagitación (figura 12) y el coeficiente de agitación medio en zonas del puerto (figura 13), para conocer así su funcionamiento hidrodinámico y la posición/es peores en los muelles para el posterior estudio de buques atracados.

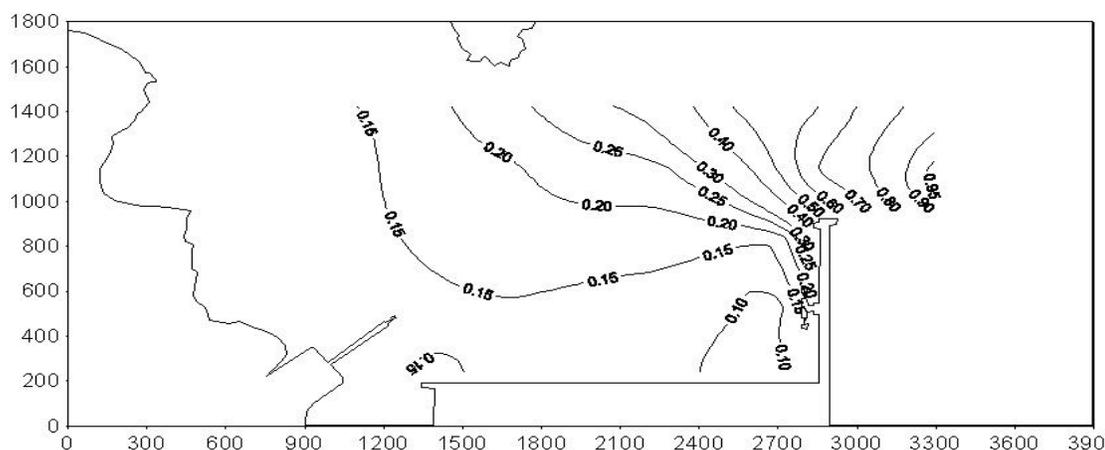


Figura 12. Curvas de isoagitación.

³ La ría, por condicionantes de espacio, se ha representados mediante una rampa amortiguadora.

⁴ $K_i = H_{si}/H_{s0}$; H_{si} = altura ola significante en los puntos de control y H_{s0} = altura significante en el punto de referencia.

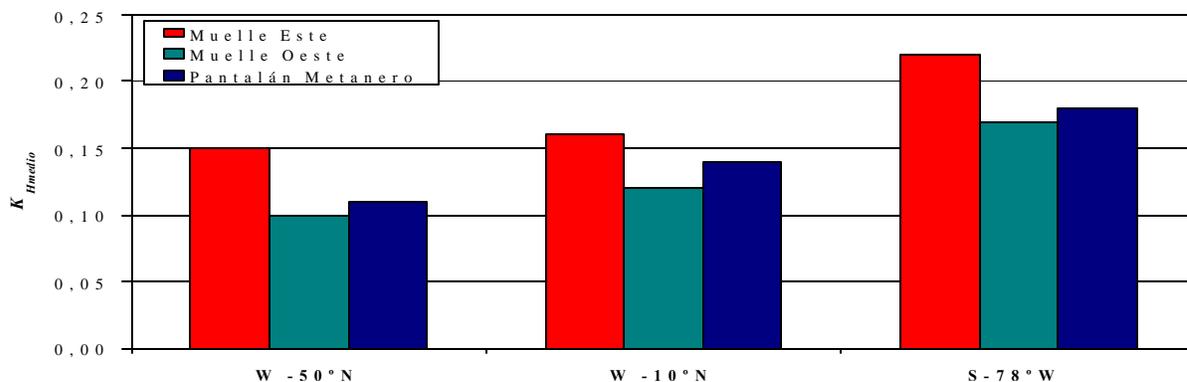


Figura 13. Coeficientes de agitación por zonas.

Para la medición del oleaje en el modelo se utilizaron sondas resistivas colocadas en 37 puntos: 36 de control en la dársena separados 2 m y uno de referencia en la zona de generación del oleaje (profundidades intermedias)

Además, estos ensayos permiten estimar de modo previo y orientativo la operatividad del puerto mediante la obtención de un índice de excedencia puntual: horas o días/año que es superada una altura de ola límite para la operación del buque debida a una dirección de oleaje y a la de todas las que inciden en el puerto. No obstante, como se ha indicado, son los ensayos de barcos atracados los que determinan, con mayor exactitud, la operatividad de los atraques

Para ello, de acuerdo con el correspondiente proceso estadístico de aplicación, se combinan las medidas de agitación registradas con las frecuencias de presentación del oleaje obtenidas de los estudios de clima marítimo, teniendo en cuenta los límites de operación de los buques y adoptando las siguientes hipótesis: relación (K_{sv}) entre la altura de ola significativa (H_s) y la visual (H_v): 0,625 (Rom 03-91) y distribución de Weibull para el ajuste del régimen direccional medio del oleaje. De acuerdo con este procedimiento las excedencias obtenidas en horas/año son las indicadas en la tabla 3.

H_s límite / Atraques	$H_{slím} = 0,30$ m	$H_{slím} = 0,75$ m	$H_{slím} = 0,50$ m
Muelle zona W	18 h/año	1 h/año	
Muelle zona E	120-140 h/año	1 h/año	
Pantalán dique			16-48 h/año

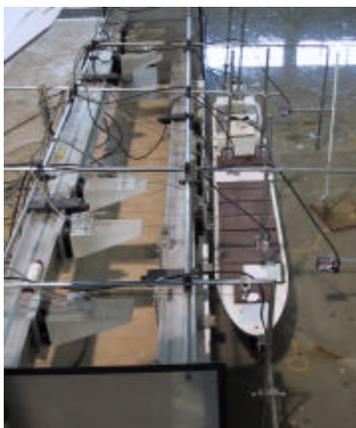
Tabla 3. Ensayo de agitación. Excedencias.

6.3.2.2- Ensayo de barcos atracados.

El objeto de estos ensayos es conocer la operatividad y/o la seguridad de los buques en sus atraques. Para ello se seleccionan los buques tipo representativos de los que van a operar en el puerto, los cuales, reproducidos a escala, ubicados en los correspondientes atraques y sometidos al mismo oleaje que en el ensayo de agitación, permiten medir los movimientos del buque y las fuerzas en sus amarras y en las defensas, de forma que la comparación de estos valores con los considerados como admisibles o límites permiten determinar su operatividad y seguridad.

Los movimientos del buque se registraron con 8 sensores láser enfocando a dianas en cubierta y en el costado del buque. La medida de fuerzas en amarras y en defensas se realizó con extensómetros, reproduciendo las amarras con hilo inextensible y las defensas con pletinas de acero inoxidable y tetones de metacrilato.

En el caso de Ferrol los buques tipo ensayados han sido: un portacontenedor atracado en la zona Este del muelle y un metanero en el pantalán del dique, los cuales se encontraban entre los modelos disponibles en el CEDEX. Como movimientos admisibles se adoptaron los propuestos por PIANC (1995). Las amarras se dispusieron de forma similar a lo que es habitual en este tipo de buques y las defensas conforme a lo indicado en el Proyecto. En la figura 14 se muestra el portacontenedor en la situación del ensayo.



Los resultados -movimientos y esfuerzos en amarras y defensas- que se obtienen, tras un primer análisis de las mediciones, son sus valores significantes y máximos durante el ensayo, los máximos extrapolados a 1000 movimientos y los periodos medios. Después, a partir de los valores máximos, mediante ajuste logarítmico⁵, se calculan los máximos movimientos y fuerzas en 8 h (carga-descarga) y, finalmente, estos valores se relacionan con la Hs medida en el punto de referencia en paletas, obteniendo así la correspondencia de valores admisibles o límites de movimientos y fuerzas y la Hs en el exterior del puerto.

Figura14. Portacontenedor. Disposición de ensayo

Además, según el proceso indicado en 2.2, este ensayo permite obtener la operatividad del buque atracado: horas o días/año que se supera un movimiento o fuerza admisible en cada dirección de oleaje ensayada y en todas en conjunto, determinando así la operatividad global de cada atraque. La tabla 4 muestra para el portacontenedor las excedencias de la variable -movimiento o fuerza- que para cada dirección es crítica, resultando aceptables según las recomendaciones españolas (ROM 3.1-99).

MUELLE	DIR. OLEAJE	Hs límite (m)	Variable crítica	Excedencia (h/año)
PORTACONTENEDOR	W-050-N	3.16	Alteada	3.0
	S-078-W	1.6	Alteada	38.3
	W-010-N	3.56	Deriva	0.4

Tabla 4. Portacontenedor. Operatividad del atraque.

6.3.3- Ensayos del dique de abrigo.

6.3.3.1.- Consideraciones generales.

Se trata de un dique en talud, cuya sección tipo se muestra en la figura 15, que tiene una única alineación con 1.120 m de longitud y cuyo morro está constituido por cajones.

Los ensayos realizados en el dique para verificar su comportamiento estructural: estabilidad del manto y de la berma de apoyo, medición de esfuerzos en el espaldón y funcional: determinación de rebases, han sido los siguientes: “ensayo bidimensional (2D)”, “ensayo tridimensional (3D)” y “ensayo 2D en canal de grandes dimensiones”.

⁵ $[\log M_{8h} \text{ ó } F_{8h} = A \cdot (M_{\max} \text{ ó } F_{\max})^2 + B]$; A y B parámetros del ajuste.

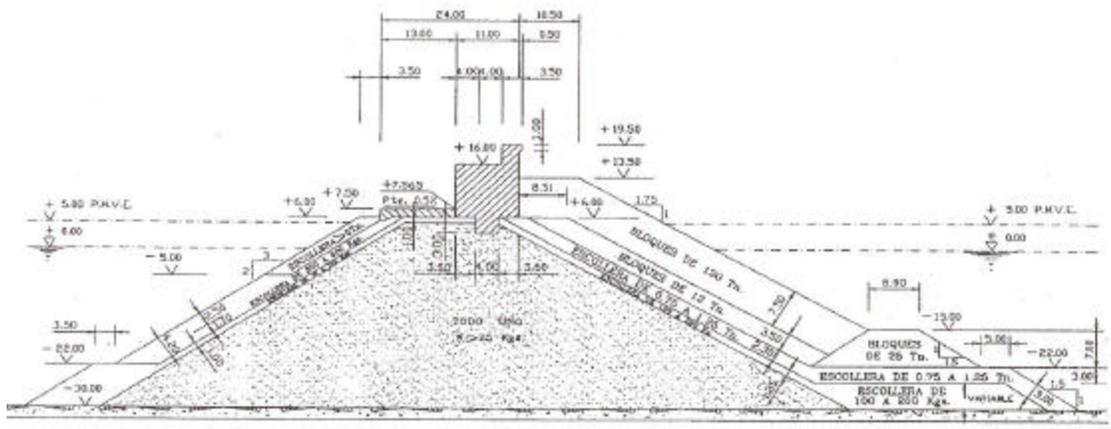


Figura 15. Dique de abrigo. Sección tipo proyectada.

El oleaje de cálculo es: $H_s = 7.6$ m y $T_p = 14$ s, que para 100 años de vida útil y un nivel de riesgo de 0.3 (ROM 0.2-90) resulta un periodo de retorno de 281 años con nivel de confianza del 90%. Los ensayos se efectuaron además con $T_p = 18$ s. En ambos casos caracterizados con un espectro JONSWAP.

6.3.3.1. - Ensayo 2D del dique.

Su objeto fue la verificación de la sección tipo proyectada en lo que se refiere al fallo del manto y de la berma, a la estabilidad del espaldón y a la determinación de los rebases. El ensayo se realizó a escala 1:43 en un tanque de 6,5 m de ancho, 46,3 m de longitud y 3 m de profundidad, dotado de absorción activa de reflexiones. El modelo se situó entre dos encauzamientos separados 2 m paralelo a la paleta generadora del oleaje para que este incidiera normal sobre la sección. En el tanque se colocaron dos sondas de medida de oleaje, una frente a la paleta y otra alineada con el espaldón en la zona no encauzada, para medir la altura de ola en el dique.

Los ensayos del manto y berma comenzaron con $H_s = 6$ m, incrementándose en escalones de 1 ó 2 m hasta $H_s = 12$ m. En cada escalón se generaron 3.000 olas, 1.000 en el nivel superior de marea (+4,50 m), 1.000 en el inferior (+1.00 m) y el resto en la transición. Finalizado cada escalón, se determinó el nº de bloques de manto y berma desplazados al menos una longitud mayor que el lado del cubo equivalente, con ello al fin del temporal se tuvo el daño acumulado. El proceso, reconstruyendo el dique, se repitió en cada ensayo.

Inicialmente se ensayó la sección de proyecto -bloques: 120 t espaldón; 25 t berma-. La ausencia de averías en el espaldón permitió bajar a bloques de 90 t, los cuales fueron admisibles, pues con ellos y para la H_s de cálculo (7,6 m) las averías no llegaron al 1 %. El comportamiento de la berma fue satisfactorio, sólo cayeron 11 bloques (figura 16).

La determinación de fuerzas en el espaldón se realizó con sensores de presión en su base y paramento y con dinamómetro, obteniendo para el oleaje de cálculo valores que proporcionan coeficientes de seguridad al deslizamiento y al vuelco aceptables ($T_p = 14$ s: $C_d = 2,69-2,11$; $C_v = 3,98-1,11$ y $T_p = 18$ s: $C_d = 1,52-2,09$; $C_v = 1,56-1,22$)⁶.

⁶ Los dos valores de los coeficientes corresponden a medidas con sensores o con dinamómetro.

En los ensayos de rebases, realizados con PMVE (+4,50 m) para 14 y 18 s, se midió el volumen de agua rebasada, con un sistema bandeja-recipiente adosado al espaldón, no produciéndose rebases para oleajes medios ($H_{s1año}= 3,5$; $H_{s5años}=5,5$ m según T_p), por lo que la cota +18 m de coronación del es paldón del proyecto resultó válida. Las tasas de rebase ($l/s \cdot m$) registradas se indican en la figura 17.

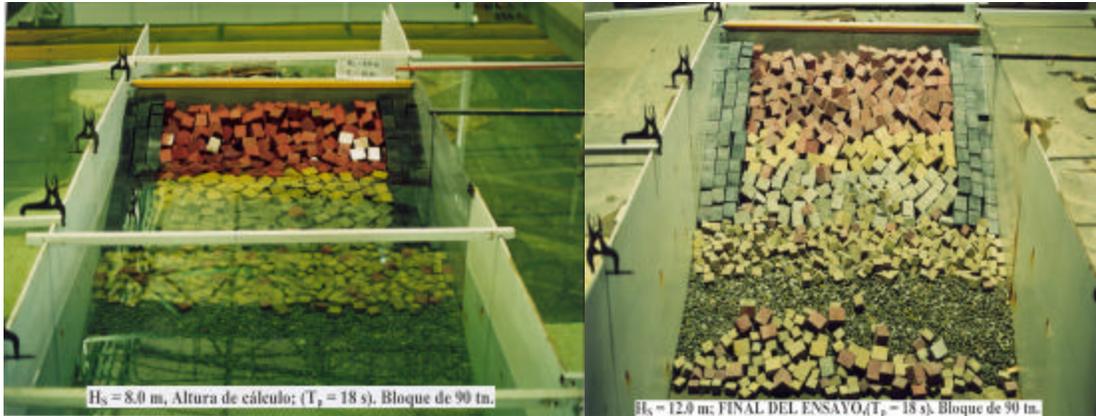


Figura 16. Ensayo 2D del dique. Situación de la sección para $H_s= 8$ y 12 m.

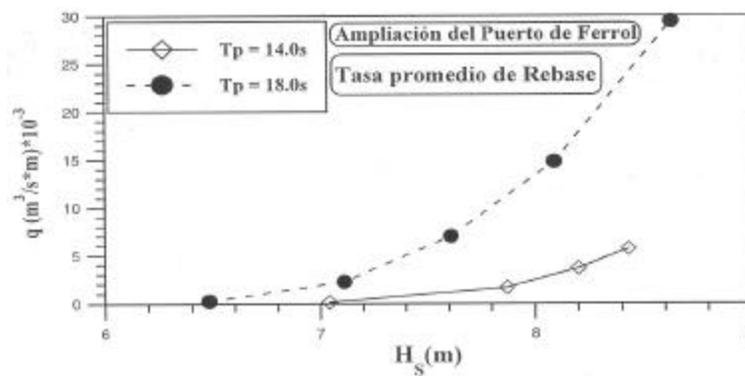


Figura 17, Ensayo 2D del dique. Tasas de rebase

6.3.3.2. - Ensayo 3D del dique.

Su objeto fue conocer el comportamiento del dique; tronco y morro, con oleajes oblicuos. Para ello se usó el tanque de oleaje multidireccional del CEDEX, reproduciendo, a escala 1:38,5, un tramo de 10 m de tronco y el morro formado por 4 cajones (figura 18).

Los oleajes de ensayo, con incidencia normal y oblicua 40° respecto al eje del dique, fueron los del modelo 2D, y el proceso para del ensayo similar. El estudio de la estabilidad del morro se realizó, construyendo el cajón exterior -el más solicitado- a escala en peso e instrumentándose con sensores de presión en sus 3 caras expuestas al mar, así además de medir las fuerzas del oleaje se comprobó si se movía. Los resultados en el manto, no mostraron ningún daño hasta $H_s= 9$ m y en la berma sólo cayeron algunos bloques (figura19).

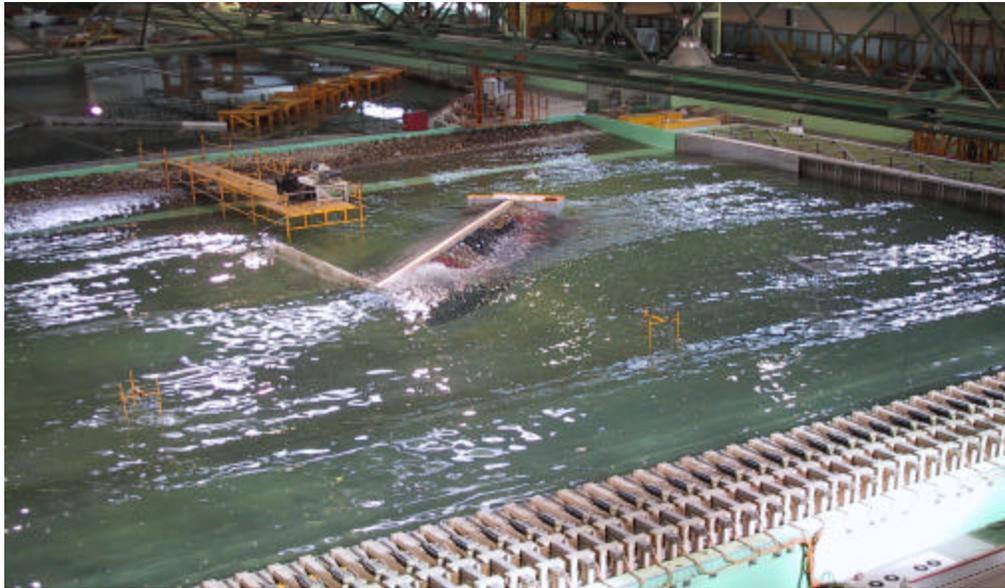


Figura 18. Ensayo 3D del dique. Tanque de oleaje multidireccional.

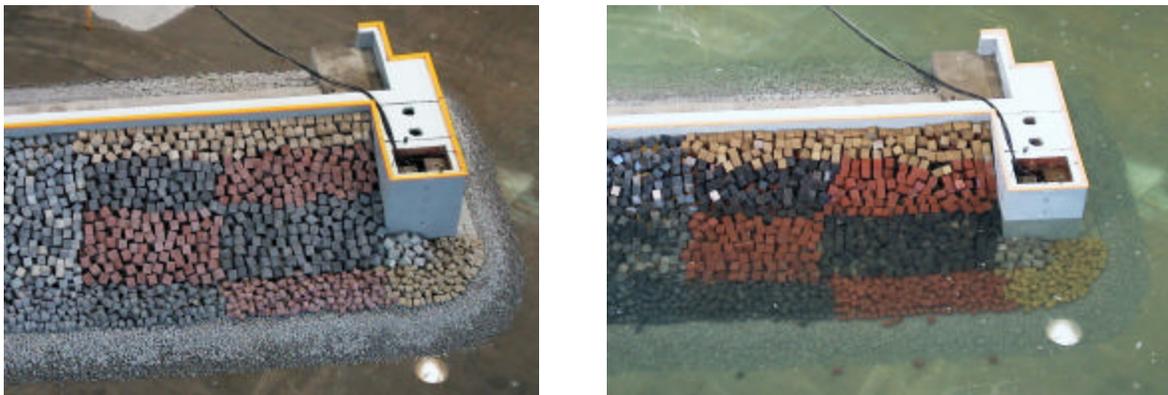


Figura 19. Ensayo 3D del dique. Estado inicial y final del modelo.

En cuanto al cajón del morro, no sufrió ningún movimiento ni para el oleaje de cálculo, ni para el máximo ensayado ($H_b = 9$ m; $T_p = 18$ s). No obstante, a partir de las fuerzas obtenidas por integración de las presiones instantáneas medidas, se calculó su estabilidad -deslizamiento y vuelco- según el eje del dique (dirección de mayores sollicitaciones), resultando coeficientes de seguridad de 3,55 y 2,67 respectivamente.

6.3.3.3. - Ensayo 2D del dique en canal de grandes dimensiones.

A fin de verificar con mayor fiabilidad los resultados del ensayo 2D en el tanque, reduciendo los efectos escala, se acometió un nuevo ensayo en el canal de grandes dimensiones disponible en el CEDEX (figura 20). Esta instalación con 90 m de longitud, 3,6 m de ancho y calado de 6 m, puede generar olas máximas de 1,6 m que, a la escala 1:15,85 adoptada en el ensayo, representa olas de 25,36 m. en prototipo. Asimismo el ensayo permitió establecer una comparación con los resultados obtenidos en el 2D.



El oleaje generado fue análogo al del ensayo 2D, aunque la distribución de las altura de ola extremales no fue la misma, lo que determinó algunas de las diferencias entre ambos ensayos y requirió un análisis comparativo, que más adelante se comenta.

La metodología del ensayo: escalones y nº de olas, nivel de marea, fallo del manto y berma, medida de fuerzas en espaldón y rebases, fue la misma que en el ensayo 2D, salvo las fuerzas que sólo se midieron con sensores de presión y los rebases con un sistema de pesada automático que da el de cada ola y el acumulado.

Figura 20. Canal de grandes dimensiones. Panorámica y detalle del ensayo.

Los resultados se caracterizaron por la ausencia de daños en el manto para la H_s de cálculo y la caída de 2 bloques para 8 m. De la berma se cayeron 8 bloques para la H_s de cálculo y 14 para 8 m. Las fuerzas en el espaldón para la H_s de cálculo determinaron los siguientes coeficientes de seguridad: $C_d=1,95/1,1$ y $C_v=2,89/1,49$ para $T_p=14/18$ s.

Los rebases, que no existen hasta $H_s > 6$ m, figuran en la tabla 5 y aunque altos para la ola de cálculo se estiman aceptables. Su efecto sobre el talud posterior produjo la caída de algunas piedras, al igual que en ensayo 2D, proponiendo para su protección que la losa coronación del cuerpo del dique volara sobre el manto posterior.

T_p	H_s (a pie dique)	Volumen (L)	Tasa (L/ms)
14	7,58	6.437	0,89
	8,29	26.625	3,71
18	6,60	21.750	3,03
	7,59	120.750	16,85
	8,39	237.812	33,18

Tabla 5. Ensayo 2D en canal de grandes dimensiones. Rebases. Volumen y tasa.

La comparación de resultados con los del ensayo 2D en tanque, en lo relativo a la estabilidad de manto y berma fueron similares. No fue así en el espaldón, los coeficientes de seguridad para igual H_s difirieron: en el deslizamiento fueron mayores en el tanque que en el canal y en el vuelco menores, con más diferencias para $T_p= 18$ s que para 14 s.

Estos resultados, como antes se ha esbozado, se debieron a la diferente distribución de las alturas de ola extremales en el tanque y en el canal: a igual H_s la H_{max} resultaba menor en el tanque que en el canal, con relaciones H_{max} / H_s : 1,63 a 1,72 en el tanque y 1,82 a 1,92 en el canal. Este hecho justifica las mayores fuerzas medidas sobre el espaldón en el canal, modificándose además su punto de actuación. Si la comparación entre fuerzas o coeficientes de seguridad se hace con H_{max} en vez de con H_s las diferencias son menores y, en este caso, achacables más a efectos de escala que a las diferencias del oleaje.

En relación con los rebases expresados en tasa promedio ($m^3/m \cdot s$), resultaron similares en ambas instalaciones para $T_p=14$ s, siendo mayores en el canal para $T_p=18$ s.

6.4.- Simulación de maniobra de buques.

6.4.1.- Objetivo.

El estudio tiene como objetivo determinar las condiciones meteorológicas límites compatibles con el acceso seguro al nuevo puerto por parte de los buques de diseño más exigentes en cuanto a dimensiones, desplazamiento y condiciones de maniobrabilidad y orientar sobre las necesidades remolcadores (número, potencia y tiro).

6.4.2.- Condiciones de clima marítimo.

En la tabla 6 se resumen las condiciones de clima consideradas en el estudio. Las mismas han sido seleccionadas de acuerdo con los siguientes criterios:

- Oleaje: los que más afectan en condiciones climáticas medias son sector N al SW.
- Viento: importante en el exterior de la ría. Los de mayor frecuencia son NE y SW.
- Corrientes: menor importancia. Están asociadas a la marea (4,4 m en la zona) .

CONDICIÓN	BF.	OLEAJE		VIENTO		CORRIENTE					
		DIREC.	Hs	DIREC.	Vw	EXTERIOR		BOCANA		CANAL	
						DIREC.	Vc	DIREC.	Vc	DIREC.	Vc
Calma total	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Calma	-	W10N	1.5	-	-	WNW a SE	0.19	WSW a ENE	0.39	W a E	0.78
NE	4	N30W	2.5	NE	15	SSE a NNW	1.17	WSW a ENE	0.39	W a E	0.97
NE	5	N30W	3.0	NE	20	SSE a NNW	1.26	WSW a ENE	0.49	W a E	1.07
NE	6	N30W	4.0	NE	25	SSE a NNW	1.36	WSW a ENE	0.54	W a E	1.11
NE	7	N30W	6.0	NE	30	SSE a NNW	1.46	WSW a ENE	0.58	W a E	1.17
SW	3	W12S	2.0	SW	10	WNW a SE	0.87	WSW a ENE	0.45	W a E	0.97
SW	4	W12S	2.5	SW	15	WNW a SE	1.07	WSW a ENE	0.49	W a E	1.17
SW	5	W12S	3.0	SW	20	WNW a SE	1.26	WSW a ENE	0.58	W a E	1.17
SW	6	W12S	4.0	SW	25	WNW a SE	1.46	WSW a ENE	0.68	W a E	1.17

Tabla 6. Resumen de las condiciones meteorológicas.

6.4.3.- Buques estudiados.

En la tabla 7 se resumen las características de los cinco buques analizados (3 bulkcarriers, un gasero y un portacontenedores). Se trata de buques que presentan dificultad de maniobra por su tamaño, inercia, calado y superficie expuesta. Todos son muy sensibles al viento, al oleaje y a la corriente y requieren una extensa cancha de parada, especialmente los de gran desplazamiento.

TIPO:		BULK CARRIER	BULK CARRIER	BULK CARRIER	GASERO	PORTACON.
ESLORA TOTAL:	m	283.0	312.0	245.3	280.0	335.0
ESLORA PERP.:	m	269.0	299.4	236.6	266.0	315.0
MANGA:	m	41.6	50.0	32.2	41.6	42.5
PUNTA:	m	22.7	24.3	19.0	25.0	26.5
CALADO MAESTRA:	m	14.1	18.0	13.0	11.0	14.0
CALADO POPA:	m	14.1	18.0	13.0	11.0	14.0
CALADO PROA:	m	14.1	18.0	13.0	11.0	14.0
DESPLAZAMIENTO:	t	134000	221000	80000	94671	128572
CAPACIDAD CARGA:	(*)	110000	190000	65000	130000	6000
POTENCIA:	kW	15000	18000	12300	33120	68000
REVOLUCIONES:	rpm	84	75	88	90	95
VELOCIDAD SERVICIO:	nudos	15.0	14.0	15.6	20.0	24.5
ÁREA FRONTAL VIENTO	m ²	1289	1525	740	1180	1525
ÁREA LATERAL VIENTO:	m ²	3192	3488	2389	5040	8401

(*) Para los bulkcarrier: toneladas; para el gasero: m³; y para el portacontenedores: TEUS.

Tabla 7. Dimensiones y características principales de los buques analizados.

6.4.4.- Estrategia de las maniobras.

Los criterios que han regido las maniobras realizadas han sido los siguientes:

- Parada de los buques en condiciones de máxima seguridad.
- Control de la arrancada lo largo de la derrota de entrada y, en especial, en la zona del morro del dique.
- Máquina:
 - o Empleo a regímenes los más bajos posibles
 - o Evitar cambios de régimen frecuentes
 - o Reducir arrancada utilizando máquina atrás en los regímenes más bajos
 - o Minimizar el número actuaciones de máquina atrás y su duración

Adicionalmente a las maniobras anteriores, calificables como normales, se han estudiado maniobras de emergencia, en las cuales se ha simulado el fallo de la máquina una vez los buques han realizado la aproximación y se disponen a quitar arrancada, estando ya orientados a dirigirse hacia sus respectivos atraques.

Los únicos medios disponibles para ayuda en estas maniobras han sido los remolcadores. No se ha tenido en cuenta la actuación del equipo de fondeo, puesto que no puede simularse con el modelo numérico disponible; pero sí se ha analizado la arrancada de los buques a lo largo de su trayectoria a fin de comprobar si está en consonancia con una posible actuación de esos equipos para permitir la parada segura de los buques sin interferencia con las estructuras portuarias.

6.4.5.- Simulaciones y resultados.

En la figura 21, para el bulkcarrier de 190.000 TPM, se muestra la Trayectoria de Referencia planteada y la seguida por el buque, y en la 22 se expone un resumen orientativo de las condiciones límites para cada uno de los buques estudiados en el acceso al puerto.

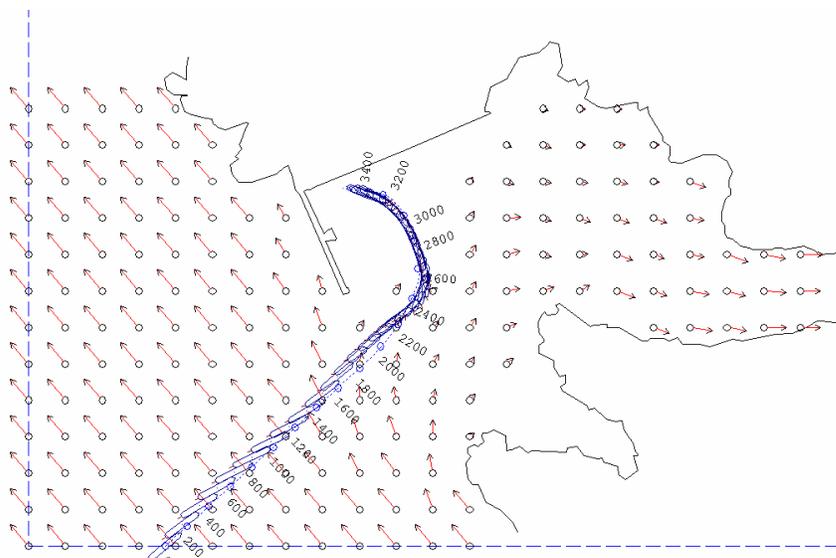


Figura 21. Bulkcarrier 190.000 TPM. Trayectoria de Referencia y seguida por el buque.

EDES un estudio de maniobra en tiempo real, el cual se llevó a cabo en su simulador SHIMARE.

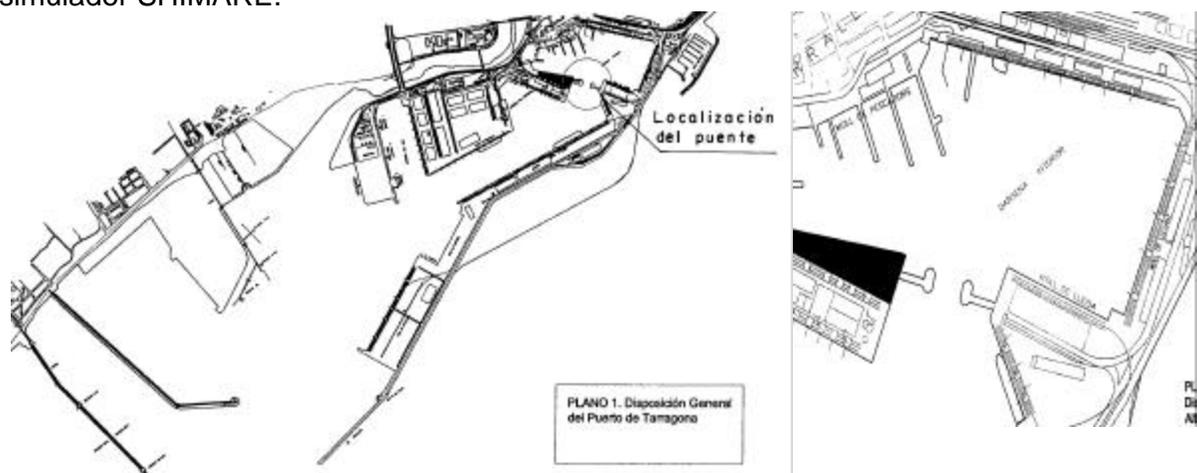


Figura 23. Disposición general del puerto de Tarragona y detalle del puente.

7.2.- Condiciones de clima marítimo.

El viento es el factor meteorológico predominante en las maniobras de la zona interior del Puerto. Dos son los vientos predominantes: levante (entre E y NE) y mistral (entre W y NW). Se analizaron velocidades entre fuerza 3 y 6.

7.3.- Buques estudiados.

En la tabla 8 se resumen las características de los dos buques analizados: roll on-roll off de 130 m de eslora (buque de diseño del puente) y 100 m, (de gran frecuencia de arribada).

CARACTERÍSTICAS	RO-RO 5100 TPM	RO-RO 2600 TPM
Eslora Total	130.0 m	100.0 m
Eslora entre Perpendiculares	118.0 m	91.0 m
Manga	21.0 m	17.0 m
Calado a Plena Carga	6.2 m	5.0 m
Calado de maniobra	5.0 m	4.2 m
Desplazamiento a Plena Carga	10.800 t	5.500 t
Desplazamiento de maniobra	8.725 t	4.600 t
Peso Muerto	5100 TPM	2600 TPM
Potencia en el Eje	9000 kW	4200 kW
Revoluciones Máximas	140 rpm	140 rpm
Velocidad en Servicio	15.8 n	14.0 n
Área Frontal Expuesta	475 m ²	400 m ²
Área Lateral Expuesta	2000 m ²	2000 m ²
Hélice de proa	750 HP	350 HP

Tabla 8. Características de los buques analizados.

7.4.- Simulaciones y resultados.

Se estudiaron 24 escenarios de maniobra, combinando accesos y salidas de los dos buques ro-ro en dos muelles (Lleida Norte y Levante) bajo diferentes condiciones meteorológicas (vientos de Levante y Mistral). Cada maniobra se repitió de 8 a 10 veces, para obtener una muestra estadísticamente aceptable. En total se han realizado 236 simulaciones, resumidos en la tabla 9 (120 h de simulación).

Como medios de remolque las maniobras se estudiaron con uno (tractor de 45 t) y con dos remolcadores. En el caso de uno actuaba por popa con cabo corto, incorporando un segundo (convencional de 32 t) por proa para intensidades de viento elevadas.

MUELLE	MANIOBRA	BUQUE	CONDICIÓN METEOROLÓGICA					
			LEVANTE			MISTRAL		
Lleida Norte	Entrada y Salida	Ro-Ro 130 m		Bf 4	Bf 6		Bf 4	Bf 6
		Ro-Ro 100 m	Bf 3	Bf 4		Bf 3	Bf 4	
Levante	Entrada y Salida	Ro-Ro 130 m		Bf 4	Bf 6		Bf 4	Bf 6

Tabla 9. Casos Analizados

De acuerdo con el procedimiento comentado en el apartado 3.2, se realizó un análisis de riesgo de las maniobras, considerando la probabilidad de colisión con las pilas del puente así como otras interferencias. Como consecuencia de los resultados que se iban obteniendo se plantearon algunas mejoras en la disposición en planta del puente y se aumentó su luz a 70 m. De todo ello en las tablas 10 y 11 se incluyen sus resultados.

Maniobra	Buque	Condición meteorológica					
		Levante			Mistral		
		Bf 3	Bf 4	Bf 6	Bf 3	Bf 4	Bf 6
Entrada	130 m	-----	0.17%	19.47%	-----	8.78%	6.71%
	100 m	0.17%	2.65%	-----	0.10%	5.03%	-----
Salida	130 m	-----	2.59%	10.15%	-----	1.02%	14.89%
	100 m	0.41%	6.17%	-----	0.11%	13.03%	-----

Tabla 10. Probabilidades de colisión (Puente de 60 m)

Maniobra	Buque	Condición meteorológica					
		Levante			Mistral		
		Bf 3	Bf 4	Bf 6	Bf 3	Bf 4	Bf 6
Entrada	130 m	-----	0.10%	11.21%	-----	3.71%	1.95%
	100 m	0.11%	1.78%	-----	0.10%	2.11%	-----
Salida	130 m	-----	0.35%	3.41%	-----	0.16%	13.01%
	100 m	0.51%	2.51%	-----	0.10%	10.15%	-----

Tabla 11. Probabilidades de colisión (Puente de 70 m)

• **REFERENCIAS.**

- (1) Grassa, J.M.; Martín Soldevilla, M.J. y Gutiérrez Serret, R. (2000). "El proyecto de infraestructuras portuarias. Modelos físicos". 1^{er} Encuentro Iberoamericano sobre Intercambio Tecnológico Portuario". Fundación Portuaria de España. Cancún. Méjico.
- (2) HYDRALAB (1999). "Possibilities and limitations of physical modelling and synergy effects with numerical modelling". Workshop. Hanover. Germany.
- (3) Master en Ingeniería de Puertos y Costas (2003). Sección IV, Módulo III.4. Modelos Físicos. Centro de Estudios y Experimentación (CEDEX). Madrid. España.
- (4) Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM). Ente Público Puertos del Estado. España.
- (5) CEDEX, 1996. "Estudio de propagación de oleaje y corrientes en la ría y puerto de Ferrol".
- (6) CEDEX, 1997. "Estudio de clima marítimo en el área de Ferrol-Coruña".
- (7) CEDEX, 1998. "Estudio de Clima marítimo y agitación en el puerto de Ferrol".
- (8) CEDEX, 2000. "Ensayo en modelo físico 2-D del dique de abrigo para la ampliación del puerto de Ferrol en cabo Prioriño".
- (9) CEDEX, 2000. "Estudio en modelo matemático de la maniobrabilidad de buques en la ampliación del puerto de Ferrol en cabo Prioriño".
- (10) CEDEX, 2001. "Ensayo en modelo físico 3-D del dique de abrigo para la ampliación del puerto de Ferrol en cabo Prioriño".
- (11) CEDEX, 2001. "Ensayos de agitación y buques atracados en el Nuevo Puerto de Ferrol".
- (12) CEDEX, 2001. "Ensayos en modelo físico 2D del dique de abrigo exterior del puerto de Ferrol realizados a gran escala".
- (13) CEDEX, 2000. "Estudio en modelo matemático de la maniobrabilidad de buques en la Ampliación del puerto de Ferrol en cabo Prioriño".
- (14) CEDEX, 2003. "Conexión Norte-Sur del puerto de Tarragona".

ANEXO:

DESCRIPCIÓN DE ALGUNAS INSTALACIONES DE ENSAYO DEL CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS DEL CEDEX.

**Laboratorio de
Experimentación
Marítima**



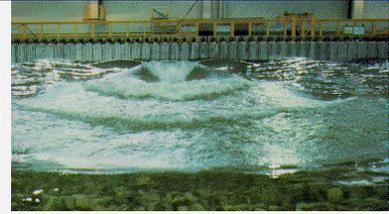
Descripción

La sala tiene una superficie próxima a los 9.000 m², apoyando su cubierta sobre los muros laterales sin necesidad de pilares intermedios que limitarían su aprovechamiento. Las instalaciones fijas de ensayo (tanques y canales de oleaje) se sitúan en el perímetro lateral, dejando la zona central para modelos tridimensionales específicos, cuyas dimensiones pueden ser de miles de metros cuadrados. El funcionamiento de las instalaciones de ensayo puede ser controlado de forma remota desde una cabina central a través de una red de señal que cubre la nave. Como equipamiento complementario la nave está cubierta por puentes grúa de 1.500 kg de carga y una red fija perimetral de suministro de energía eléctrica y agua.

**Características
Técnicas**

- Dimensiones: 115 x 76 m en planta, 8 m de altura libre bajo la estructura.
- Tipología: estructura de hormigón con cubierta metálica. Solera de hormigón pulido. Redes de servicios: red perimetral de energía eléctrica y suministro de agua. Red general de señal de 175 canales. Dos depósitos de agua de 1,000 m³ c.u.
- Instalaciones de ensayo fijas, todas ellas con oleaje irregular: Canal de 100 m; 2 Tanques de 35 y 45 m x 6,50 de anchura; Canal de 36 x 3 m; Canal de 20 x 1,20 m; Tanque de oleaje multidireccional 34 x 26 x 1,60 m, Canal de oleaje de gran escala (80 x 3,60).
- Otros equipos: generadores modulares móviles de oleaje irregular.
- Desarrollos previstos: Tanque permanente de experimentación de atraques, Modelización de viento sobre estructuras.
- Talleres de carpintería, fabricación de piezas especiales e instrumentación.

Tanque de Oleaje Multidireccional I



Descripción

El tanque de oleaje multidireccional (1,992) del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX tiene por objeto la experimentación en modelo físico de actuaciones de ingeniería marítima con el mayor nivel de realismo al permitir la generación de oleajes cruzados, de crestas cortas o con cualquier reparto direccional de energía, lo que le distingue de la mayor parte de las instalaciones, solo capaces de generar oleaje de una dirección. Para ello, el generador de oleaje está formado por múltiples segmentos cuyos movimientos independientes están controlados por un sistema de ordenadores trabajando en red. La combinación de los movimientos de las paletas produce la estructura deseada de oleaje de ensayo.

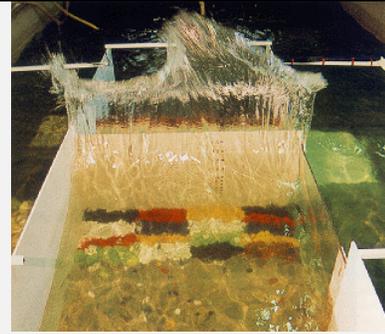
Las grandes dimensiones del tanque permiten la consideración en tres dimensiones de las estructuras y zonas de costa a ensayar, a la vez que la singularidad de la instalación la hace muy útil para el desarrollo de investigación básica sobre el oleaje en zonas costeras y para el contraste de modelos numéricos.

Características Técnicas

- Dimensiones: 34 x 26 x 1.60 metros (calado máximo 1.15 m)
 - Generador de oleaje: 72 paletas pistón independientes de 1.60 m de altura y 0.40 m de anchura (frente total 28.80 m)
 - Actuadores: eléctricos con recorrido 0.60 m
 - Altura de ola máxima: 0.58 m para frente plano normal
 - Sistema de control: Control digital de actuadores en red local
 - Atenuación lateral: múltiples cortinas de chapa perforada
 - Generación de corrientes: caudal variable, hasta 200 lt/s
 - Estructuras offshore: foso de ensayos de 3 x 3 x 1 mt
 - Análisis y síntesis de oleaje: Aplicación GEDAP, NRC
- Aplicaciones**
- Diseño de obras marítimas: Ensayos de estabilidad y funcionalidad frente a la acción de oleaje oblicuo y multidireccional
 - Estudios de costas: Ensayos de regeneración y evolución de playas
 - Diseño portuario en planta: Agitación bajo oleaje multidireccional
 - Estudio de amarres en mar abierto y estructuras offshore

<p>Canal de Gran Escala</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Vista de la pala de generación de oleaje</i></p>
<p>Descripción</p>	<p>El canal de oleaje de gran escala tiene por objeto el ensayo de estructuras marítimas sometidas a la acción del oleaje minimizando las distorsiones que se producen a menores escalas. Ello permite optimizar las costosas estructuras marítimas en lo que atañe a su seguridad y funcionalidad. La instalación ha sido puesta en servicio recientemente y empleada para el ensayo, a escala 1:12 de una sección para el nuevo dique de abrigo del Puerto de Barcelona. Actualmente se investiga una nueva tipología de dique vertical bajo encargo de una empresa privada.</p> <p>Entre las características singulares de la instalación se destaca la disposición de una galería lateral acristalada para la visualización de ensayos e incorporación de técnicas ópticas de medida, así como el fondo del canal ajustable en altura para reproducir el perfil de los fondos.</p>
<p>Características técnicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 90 m de longitud y 3,60 m de anchura. • Profundidad variable entre 6 y 4,50 m (zona de ensayo) • Fondo regulable en altura mediante placas independientes • Pala generadora rotacional con la cara interior seca • Sistema de generación oleohidráulico de 300 Kw • Generación de oleaje irregular de hasta 1,60 m de altura • Absorción activa de reflexiones • Puente grúa de 10 toneladas • Depósito de 1,000 m³
<p>Aplicaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo a gran escala de diques verticales y en talud • Flujo en medios porosos: bloques artificiales, escolleras, filtros, subpresiones en diques verticales,... • Hidrodinámica y transporte de sedimentos en playas. • Actuaciones de defensa de costas

**Tanques de 35
y 45 x 6,50
metros**



Sección de dique vertical



Rebases en ensayo 3D

Generador con doble actuación

Descripción

El Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX dispone de dos tanques de ensayo de 35 y 45 m x 6.50 m de anchura con profundidad variable (profundidad frente al generador de oleaje 1,50 y 0.80 m). Esta anchura permite abordar el análisis de puntos singulares de las obras de abrigo (morros, cambios de alineación) así como el estudio bajo oleaje oblicuo de secciones de dique. El tanque de mayor calado posee una paleta con dos actuadores para los movimientos de traslación y rotación lo que permite ajustar de forma óptima sus movimientos a la cinemática del oleaje, reduciendo la generación de ondas evanescentes y permitiendo la obtención de oleajes muy peraltados sin rotura en la paleta. Algunos estudios realizados en estos tanques son los del nuevo dique del Puerto de Bilbao (área de Ciervana), nuevo dique del Puerto de Valencia, prolongación del dique de Las Palmas, nuevo dique del Puerto de Castellón. Estas instalaciones han sido empleadas también para la investigación sistemática del bloque Accropode, estudios de estabilidad de espigones frente a oleaje muy oblicuo y en diversos proyectos de los programas MAST II y MAST III de la Unión Europea.

**Características
Técnicas**

- Dimensiones: 45 y 35 x 6,50 m con profundidad variable (altura máxima 2,0 m en el tanque 1 y 1,30 en el tanque 2).
- Sistema de generación: paleta tipo pistón - flap con recorrido 0,80 + 0,40 m en tanque 1; pistón de recorrido 0,80 m en tanque 2.
- Sistema de control: unidades de control analógicas MTS con entrada de cinta magnética o ordenador.
- Equipos complementarios: pasarelas móviles para instrumentación. Pórtico de medida de fuerzas. Cabina de control sobre los tanques.
- Otras características: depósito de 500 metros cúbicos.
- Desarrollos previstos: sistema de absorción activa de reflexiones