

Modelo físico de agitación y barcos atracados. Ampliación del Puerto de Castellón

LÁZARO REDONDO REDONDO (*), ANTONIO BAONZA GONZÁLEZ (**)
y RAMÓN GUTIÉRREZ SERRET (***)

RESUMEN El presente artículo recoge los estudios de agitación y barcos atracados en modelo físico 3D de la Fase 2 de la ampliación sur del Puerto de Castellón, en el que se exponen los trabajos realizados, el análisis de los resultados obtenidos y las conclusiones fundamentales derivadas del estudio.

PHYSICAL MODEL OF AGITATION AND MOORED SHIPS. EXPANSION OF THE CASTELLÓN HARBOUR

ABSTRACT *This article describes the studies of agitation and moored ships in a 3D physical model (Phase 2 of the southern extension of Castellón harbour). It explains the work, the analysis of results and fundamental Conclusions.*

Palabras clave: Ensayos en modelo físico, Agitación, Barcos atracados, Castellón, CEPYC.

Keywords: Physical model, Agitation, Moored ships, Castellón harbour.

1. INTRODUCCIÓN

Para adaptarse al notable incremento del tráfico de mercancías que se viene produciendo en los últimos años, la Autoridad Portuaria de Castellón (APC) está acometiendo una importante ampliación de sus instalaciones hacia el sur del puerto actual. Dicha ampliación se ha definido teniendo en cuenta tanto las necesidades actuales como la demanda prevista en un horizonte de medio-largo plazo. Dadas las considerables dimensiones de las obras, definidas en el Plan Director del Puerto de Castellón, se ha previsto llevarlas a cabo en diversas fases constructivas de manera que permitan el uso de determinados atraques una vez finalizadas las obras correspondientes a cada una de ellas.

Para estudiar esta ampliación se realizaron unos ensayos en modelo físico 3-D con el fin de analizar las condiciones de agitación y el comportamiento de los buques atracados en tres de las siete fases constructivas que contempla el plan director, denominadas fase 2, 4 y 7, correspondiendo esta última a la

configuración definitiva del futuro puerto. En la Figura 1 se muestra el modelo físico en la Fase 2.

Partiendo de la configuración correspondiente a la Fase 2 definida en el Plan Director de la Ampliación Sur del Puerto de Castellón, se han estudiado 3 alternativas del diseño en planta, diferenciadas por la longitud de prolongación del Dique Este para esta Fase 2.

En los ensayos de agitación, se han evaluado las condiciones de agitación de la dársena y de la zona de maniobra entrada-salida, en las configuraciones en planta mencionadas y en los ensayos de barcos atracados se ha analizado el comportamiento de un buque portacontenedores de 4.000 TEUS situado en dos atraques del Muelle de Ribera.

El estudio se llevó a cabo en un modelo físico a escala 1:100 en el que se representaron diversas alternativas de la dársena y su entorno costero próximo con influencia en la agitación interior. En el modelo se han aplicado cuatro oleajes correspondientes a tres direcciones en aguas profundas, Sector E+ENE con $T_p = 9$ y 11 s, sector SE con $T_p = 7$ s y sector S con $T_p = 5$ s, representantes de unas características medias y extremas (estas sólo en el caso del sector E+ENE con $T_p = 11$ s), que se consideran las más relevantes de cara a conseguir el objetivo del presente estudio. El modelo fue construido en las instalaciones que el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC) del CEDEX tiene para tal efecto en su Laboratorio de Experimentación Marítima. Se realizaron 3 ensayos de agitación de la configuración inicial y 12 de las tres alternativas de la Fase 2 (4 oleajes por 3 alternativas). En lo que se refiere a los ensayos de barcos atracados, se realizaron un total de 49 ensayos.

(*) Ingeniero Naval. Coordinador de programa técnico y científico del Laboratorio de Experimentación Marítima. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX. Email: lazaro.redondo@cedex.es

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador de programa técnico y científico del Laboratorio de Experimentación Marítima. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX. Email: antonio.baonza@cedex.es

(***) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Laboratorio de Experimentación Marítima. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX. Email: ramon.m.gutierrez@cedex.es

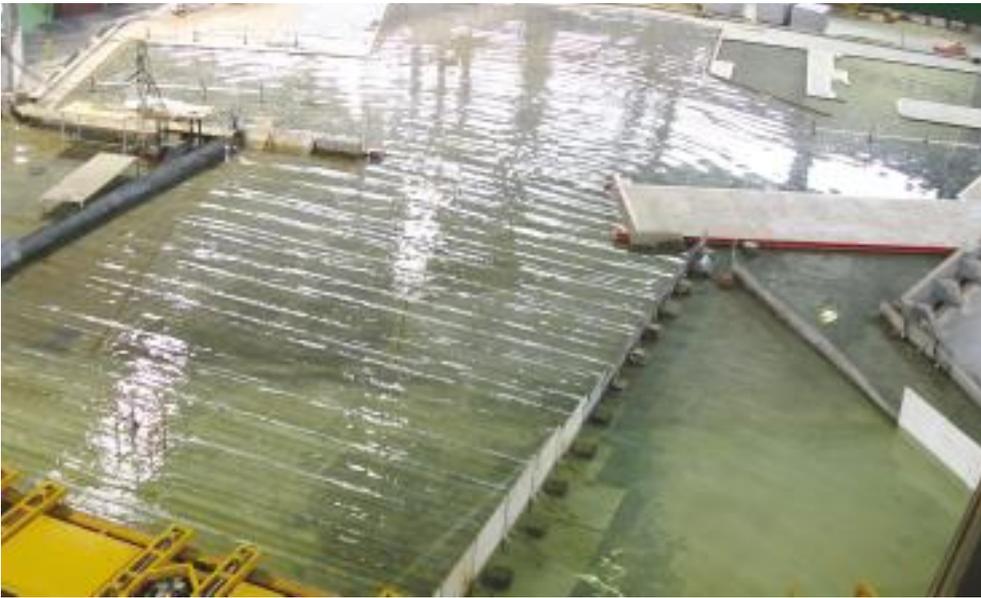


FIGURA 1. Modelo físico, Fase 2, Alternativa 1.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

2.1. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

La definición de las dimensiones del modelo físico se calcularon, una vez fue seleccionada la escala, 1:100, teniendo en cuenta la zona objeto de estudio y la superficie adicional necesaria para la colocación de las paletas generadoras de oleaje que permitió el desarrollo de éste. En este sentido, fueron limitaciones importantes la superficie disponible en la instalación de ensayos y la capacidad de los equipos de generación y medida de oleaje.

La construcción del modelo tridimensional del Puerto de Castellón se llevó a cabo utilizando la técnica de los alambres. Es decir, las batimétricas se reprodujeron con alambre de acero, y se fijaron soldándolas sobre varillas verticales de longitud correspondiente a la profundidad en cuestión. Posteriormente, se rellenó la zona inferior con grava hasta una pequeña distancia de la superficie, disponiendo una capa de

mortero de cemento en los últimos 5 cm. Una vez alisada, reproducirá la geometría del fondo, consiguiendo un buen acabado para reducir al mínimo la fricción.

Las instalaciones del puerto (espigones, diques, dársenas, etc.) se reprodujeron con diferentes materiales y métodos de construcción. Se utilizaron bloques o piedras de pesos y dimensiones calibradas para los diques, y los muelles se construyeron con ladrillos y cemento. Se dispusieron elementos desmontables que redujeron drásticamente el tiempo en las prolongaciones del Dique del Este.

Un hecho decisivo en la técnica de modelos es la adecuada calibración de las reflexiones, que tienen lugar en condiciones muy diferentes a las de prototipo. Por ello, se dispusieron elementos antirreflejantes en los límites del modelo, que permitieron una correcta reproducción de los fenómenos influyentes en la propagación del oleaje. Estos consistieron en mantas de fibra de coco. En la Figura 2 se muestra el modelo físico en fase de construcción.

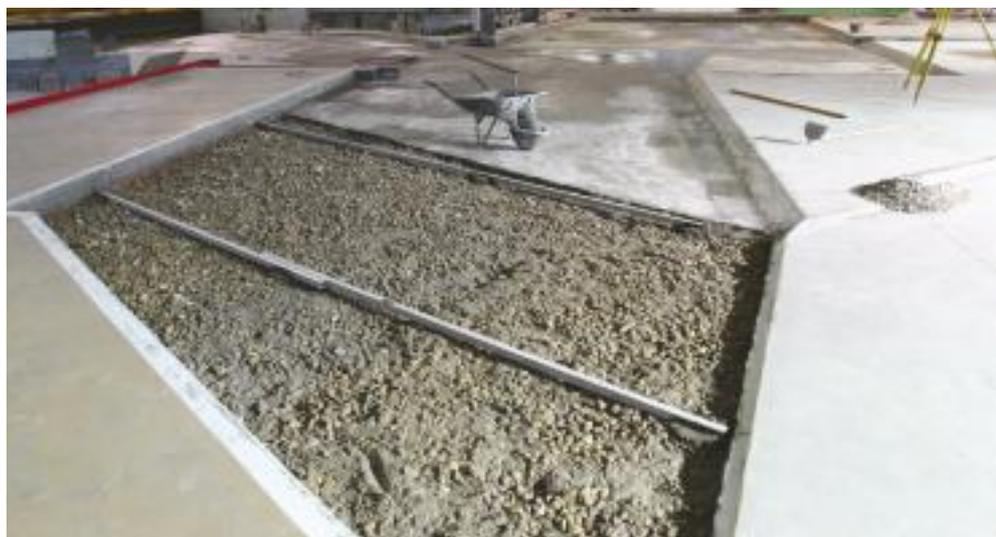


FIGURA 2. Modelo físico en construcción.

Dirección en aguas profundas	Dirección (d=-15 m)	T _p (s)	f _α	f _r	H _s (m)	γ	K _{rs}	WEIBULL	
								B	C
S	E-85°-S	5	0,0534	0,6799	2,0	3,3	0,86	0,392	1,588
SE	E-42°-S	7	0,1181	0,9988	2,5	3,3	0,90	0,332	1,292
E+ENE	E	9	0,3215	0,9043	2,0	7,0	0,88	0,605	1,252
		11	0,3215	0,0795	3,0	7,0	0,84	1,248	1,701

TABLA 1. Oleajes.

2.2. OLEAJES

Los oleajes utilizados en los ensayos fueron ajustados a espectros tipo JONSWAP, con las características indicadas en la Tabla 1 y sus características fueron obtenidas a partir de los estudios previos de Clima Marítimo y Propagación de Oleaje realizados por el departamento de Estudios Portuarios del CEPYC. La caracterización estadística de estos oleajes en aguas profundas se llevó a cabo a partir de la serie histórica de oleaje sintético del punto de malla WANA, situado en las coordenadas 44,0°N - 0,125°E. La dirección de incidencia de los sectores activos establecidos en la zona de estudio fue definido como una media ponderada de los resultados de propagación correspondientes a cada uno de los sectores representativos en aguas profundas.

Las alturas de ola de referencia se eligen, en general, de forma que sean suficientemente representativas desde el punto de vista de explotación del puerto, y compatibles con una adecuada generación y medida de las variaciones del nivel de agua en el modelo, evitándose en todo momento el descrestamiento de las olas ya que produciría pérdidas de energía por rotura en la zona de alimentación y, por tanto, impediría obtener unos resultados correctos de la agitación.

Para el sector direccional E+ENE se consideraron dos periodos, siendo el periodo inferior el que caracteriza el régimen medio y el mayor representante de condiciones extremas.

2.3. CONFIGURACIONES EN PLANTA ENSAYADAS

En este artículo se analizarán, únicamente las 3 alternativas de la Fase 2 de la ampliación sur del Puerto de Castellón, según se ha expuesto anteriormente, resultantes de las modifi-

caciones del diseño inicial de dicha fase en relación a la longitud del dique de abrigo, a los dragados en el interior de la dársena y a la longitud del Muelle de Ribera donde se realizaron los ensayos del buque atracado. El Muelle de Ribera pasa de una longitud inicial de 372 m a unos 610 m y está diseñado para permitir el atraque de buques graneleros o contenedores, por lo cual es necesario incrementar el dragado de la dársena hasta la cota -16 m incluso frente a la alineación futura de dicho muelle hasta alcanzar el Dique de Poniente actual. Bajo estas condiciones, las 3 alternativas en planta ensayadas correspondieron a las 3 actuaciones sobre la prolongación del Dique Este manteniendo en todo caso la orientación, fueron las siguientes:

Fase 2. Alternativa 1: sin prolongación, lo que se corresponde con la situación prevista inicialmente para la Fase 2. En las Figuras 1 y 3 se muestra el detalle.

Fase 2. Alternativa 2: Longitud de prolongación de 229 m. En este caso, el morro del dique se sitúa en el borde del canal de acceso. En las Figuras 3 y 4 se muestra el detalle de esta Alternativa.

Fase 2. Alternativa 3: Longitud de prolongación de 358 m. Es la longitud definida inicialmente en el proyecto para las fases constructivas posteriores a la Fase 2. En las Figuras 3 y 5 se muestra el detalle.

Las tres alternativas, se analizaron bajo la acción de los oleajes más influyentes en la zona. Se realizaron ensayos adicionales, con el oleaje del sector direccional E+ENE y dos periodos de pico, T_p = 9 y 11 s con varias longitudes de prolongación del Dique Este de valores intermedios entre los arriba indicados. Estos ensayos adicionales tenían por



FIGURA 3. Descripción de las Alternativas.



FIGURA 4. Vista general del modelo físico. Fase 2, Alternativa 2.



FIGURA 5. Vista general del modelo físico. Fase 2, Alternativa 3.

objeto analizar la influencia de la prolongación progresiva del Dique Este en el grado de agitación en la zona donde se realizaron los ensayos de buques atracados, una vez que los resultados obtenidos en estos últimos, aparentemente contradictorios (resultados con el dique de 229 m peores que sin la prolongación del Dique Este), crearon cierta incertidumbre.

De los resultados obtenidos en estos ensayos adicionales, se pudo corroborar la coherencia de los resultados obtenidos en la zona mencionada en las configuraciones correspondientes a las 3 alternativas de ensayo, determinando las causas de la aparente contradicción antes aludida.

2.4. ENSAYOS DE AGITACIÓN

Los ensayos de agitación consistieron en medir la elevación de la capa de agua en una malla de puntos (Figura 7) que posteriormente fueron relacionados con el punto de referencia, donde se midió el oleaje con el que se alimentó el modelo físico en cada toma de datos. La interpretación de los resultados obtenidos se realizó analizando los valores de los coeficientes de agitación k_i , definidos como la relación entre la altura de ola significativa en un punto considerado, H_{si} , y la altura significativa de referencia, H_{so} , medida en un punto exterior al puerto, generalmente frente a la paleta: $k_i = H_{si} / H_{so}$.

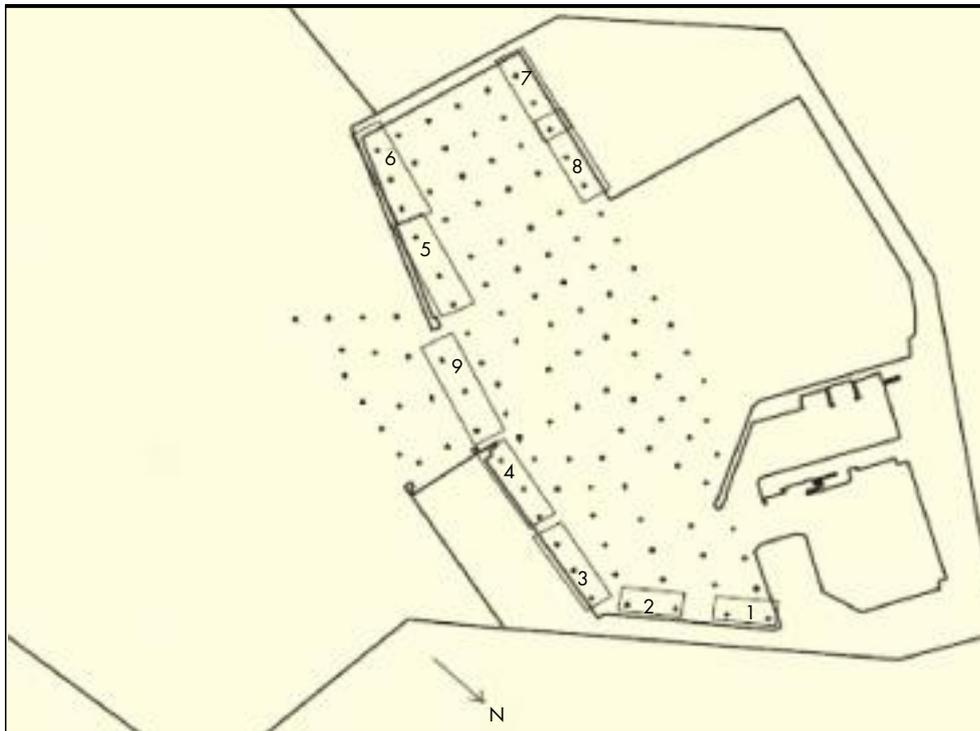


FIGURA 6. Zonas de estudio seleccionadas.

Una vez se obtuvieron los valores de los coeficientes de agitación se dibujaron, para cada caso, las curvas de isoagitación. Estas curvas, determinaron las zonas en las que la agitación está comprendida entre determinados valores, de manera que se apreció claramente cómo se distribuyó la energía del oleaje en el interior del puerto facilitando, además, la comparación de las diversas situaciones de ensayo estudiadas.

Para una mejor interpretación de los resultados se definieron, unas zonas de cálculo (Figura 6) de especial interés en cuanto al comportamiento hidrodinámico del puerto o a sus condiciones de explotación. En cada una de estas zonas y para cada ensayo realizado, se determinaron los coeficientes de agitación medio (kH_{medio}) y máximo ($kH_{máx}$). Igualmente, se obtuvieron las desviaciones estándar de tales valores, para comprobar si existía alguna dispersión significativa en las zonas consideradas. Esta metodología facilitó la comparación de los resultados obtenidos en cada alternativa estudiada.

ZONA	Nº PUNTOS	DESCRIPCIÓN
1	2	Muelle Levante Exterior Norte
2	2	Muelle Levante Exterior Sur
3	3	Muelle Dique Este Norte
4	3	Muelle Dique Este Sur
5	3	Muelle Contradique Norte
6	3	Muelle Contradique Sur
7	3	Muelle Ribera Sur
8	3	Muelle Ribera Norte
9	3	Bocana Exterior

TABLA 2. Descripción de las zonas.

2.5. ENSAYOS DE BARCOS ATRACADOS

El objetivo principal de los ensayos de comportamiento de buques atracados es poder estimar el rango de las tensiones en las amarras y de las reacciones en las defensas, así como las amplitudes de los movimientos de los buques, con el fin de orientar sobre las condiciones de explotación y la operatividad de los atraques.

El buque atracado se considera como un sistema oscilatorio, cuyos movimientos están restringidos por la actuación del equipo de amarre y las defensas, sometido a una excitación exterior impuesta por el oleaje.

De acuerdo con el buque tipo, sus disposiciones de amarras y defensas y los dispositivos de ensayo, se midieron y almacenaron las series temporales de las distintas variables definitivas del comportamiento del buque atracado. Concretamente: oleaje exterior, movimientos del buque (vaivén, deriva, guiñada, alteada, cabeceo y balance), fuerzas en las amarras (largo de proa, spring de proa, través de proa, largo de popa, spring de popa, través de popa) y reacciones en las defensas, para su posterior análisis.

2.5.1. Dispositivos de ensayo

Las características de las amarras y de las defensas se modelizan en base a las propiedades elásticas de varillas y pletinas de acero respectivamente. La unión de las amarras a sus puntos correspondientes en las cubiertas de los modelos de los buques se lleva a cabo por medio de hilos inextensibles.

El contacto entre el modelo a escala del buque y las pletinas de acero que reproducen las defensas se produce en un tetón de metacrilato adherido en una sección concreta de cada pletina.

Para la medida de las fuerzas tanto en las amarras como en las defensas, se utilizaron extensómetros. Las curvas de alargamiento de las amarras y de compresión de las defensas se corrigieron considerando características de deformación li-

neales, que se reprodujeron mediante varillas y pletinas de acero respectivamente.

Los movimientos de los buques atracados se registraron empleando cuatro parejas de emisores-receptores de rayos láser calibrados previamente, dirigiendo el haz a puntos concretos de la cubierta y del costado del buque. A partir de estos datos, se obtuvieron las traslaciones y giros del buque (vaivén, deriva, alteada, guiñada, cabeceo y balance).

El equipo de captosres de señal se completó con una sonda para la medida de la altura de ola de referencia en el exterior del puerto, a suficiente distancia del generador de oleaje, de forma que permitiera obtener la señal de aquel, una vez desarrrollado.

Los distintos captosres se conectaron a un ordenador de toma de datos a través de sus correspondientes acondicionadores de señal (amplificadores, conversores A/D, etc), permitiendo el registro y posterior tratamiento de las series temporales de los valores de las diferentes variables a medir (tensiones de las amarras, esfuerzos de las defensas y movimientos de los buques).

2.5.2. Modelo de buque

La construcción del buque tipo ensayado, así como el ajuste de sus parámetros dinámicos característicos (alturas meta-céntricas, inercia, periodos propios de balance, arfada y cabeceo, etc.) fue realizada, conforme a la ley de semejanza de Froude.

Se ha analizado el comportamiento de un buque portacontenedores de 4.000 TEUS atracado en el Muelle de Ribera, sometido a la acción de los oleajes procedentes del sector direccional E+ENE con los dos periodos de pico $T_p = 9$ y 11 s y en las 3 alternativas definidas anteriormente. Para cada atraque en concreto se persiguió obtener alturas de ola semejantes con cada dirección y periodo del oleaje a fin de poder comparar los resultados obtenidos en cada una de las alternativas, soslayando en lo posible los efectos no lineales en el comportamiento del oleaje y en la respuesta del buque.

El buque tipo ensayado fue un portacontenedores de unos 4.000 TEUS, a plena carga. Las dimensiones y características de este buque fueron las indicadas en la Tabla 3.

Eslora entre perpendiculares (m)	210,0
Eslora total (m)	218,2
Manga (m)	28,3
Calado (m)	9,3
Desplazamiento (t)	38.095,0

TABLA 3. Dimesiones principales del buque.

2.5.3. Amarras

Para este buque se adoptó la misma geometría de amarre en todos los ensayos, disponiendo las líneas conforme a su equipo específico y a la situación de los bolardos proyectada en los muelles. La Figura 7 muestra un esquema de la distribución de las líneas de amarre.

El portacontenedores fue ensayado en las diversas alternativas de la Fase 2, en los atraques Norte y Sur del Muelle de Ribera, con la misma configuración de amarre. La configuración de amarre reproducida en los ensayos fue de veintidós líneas, distribuidas de la siguiente forma:

- 4 Largos a proa y 4 a popa de polipropileno.
- 4 traveses a proa y 4 a popa de polipropileno.
- 3 Springs a proa y 3 a popa de polipropileno.

Para todas ellas se tomaron amarras de polipropileno de mena 12'' (97 mm de diámetro).

2.5.4. Defensas

En todos los atraques, se dispusieron las mismas defensas con una separación de 30 m, estando intercaladas con los bolardos.

La modelización de las defensas se realizó, como es habitual, a base de pletinas de acero inoxidable a las que se adhiere un tetón de metacrilato en la zona de contacto con el modelo del buque. El tetón de metacrilato se fija a lo largo de la pletina en una sección tal que la deflexión producida en la misma, en combinación con las características mecánicas del material, ajustara a la escala adoptada, la rigidez de la defensa.

En estos atraques está previsto montar parejas de defensas HZ 1700-L2000, que poseen una carga de trabajo de 313 t.

3. RESULTADOS

3.1. EXCEDENCIAS OBTENIDAS DE AGITACIÓN

El comportamiento de cada una de las situaciones de ensayo se evalúa a partir de los coeficientes de agitación, k_i , de la distribución de las curvas de isoagitación y por los valores medios y máximos del coeficiente de agitación en las distintas zonas de medida seleccionadas. En la Figura 7 y en la Tabla 3 se ha presentado un esquema del puerto con las zonas estudiadas.

La direcciones de oleaje consideradas en el modelo para la disposición de las paletas a la profundidad de 15 m, como ya se ha comentado, fueron las siguientes:

- E: Para simular los oleajes del sector direccional E+ENE, con $T_p = 9$ y 11 s.
- E-42°S: Para simular los oleajes del sector direccional SE, con $T_p = 7$ s.
- E-85°S: Para simular los oleajes del sector direccional S, con $T_p = 5$ s.

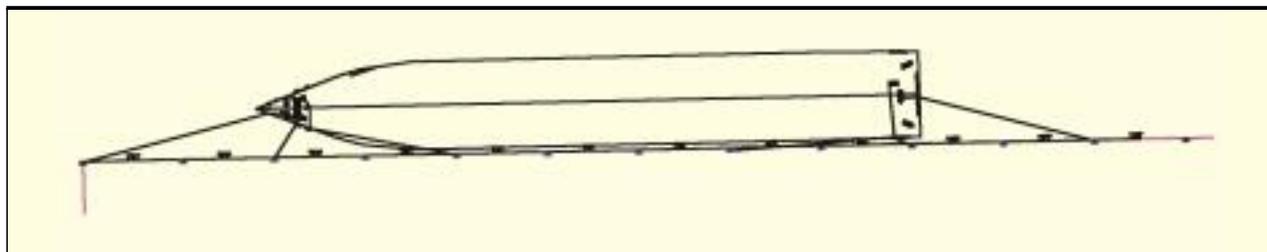


FIGURA 7. Configuración de amarre del portacontenedores.

A continuación, se detallan los datos más significativos del comportamiento del puerto en cada una de las situaciones de ensayo, tanto en lo que se refiere a los oleajes como a las diversas alternativas de la Fase 2 estudiadas. Los resultados obtenidos en todas las alternativas analizadas han mostrado una mejora de la agitación en lo que se refiere al comportamiento de las zonas del puerto actual.

3.1.1. Fase 2, Alternativa 1

Dirección E+ENE; $T_p = 9$ s

Se obtuvieron coeficientes de agitación altos en la zona sur de la nueva dársena y con agitación irregular debido a las reflexiones en el Muelle de Ribera y en el paramento interior del contradique.

En la zona central la agitación fue muy alta, superando los coeficientes el valor 1,15 en algunos puntos. En las zonas de interés, el menor valor medio, $k_i = 0,10$, se produce en la zona sur del Muelle de Levante Exterior y el máximo, $k_i = 0,31$, en la zona norte del muelle adosado al contradique.

En la Bocana el coeficiente de agitación medio fue, $k_i = 0,89$.

Dirección E+ENE; $T_p = 11$ s

Al aumentar el periodo del oleaje respecto al anterior, también lo hacen los coeficientes de agitación, por lo que se obtuvieron coeficientes de agitación altos en la zona sur de la nueva dársena y, de nuevo, con agitación irregular debido a las reflexiones en el Muelle Sur y en el paramento interior del Contradique.

En la zona central, al igual que en el caso anterior, la agitación es muy alta, superando los coeficientes el valor 1,15 en algunos puntos.

En las zonas de interés, el menor valor medio, $k_i = 0,12$, se produjo en la zona sur del Muelle adosado al Dique Este y los máximos, $k_i = 0,38$ y $0,39$, en las zonas norte del Muelle de Ribera y del Muelle adosado al Contradique, respectivamente.

En la Bocana el coeficiente de agitación medio fue, $k_i = 0,89$.

Dirección SE; $T_p = 7$ s

Los coeficientes de agitación fueron del orden de los obtenidos para el oleaje del E con el periodo $T_p = 9$ s en la zona norte del área abrigada (situación actual del puerto) y disminuyeron en las zonas sur y central.

El valor inferior de los coeficientes de agitación, $k_i = 0,11$, se produjo en las zonas sur del Muelle de Levante Exterior y del Muelle adosado al Dique Este y el máximo valor, $k_i = 0,24$, se presenta en la zona norte del Muelle de Ribera.

En la Bocana el valor medio de la agitación fue $k_i = 0,77$.

Dirección S; $T_p = 5$ s

La zona norte del puerto se encontraba poco abrigada frente a esta dirección de oleaje por lo que, en general, los coeficientes de agitación en esta parte fueron bastante elevados.

En la zona sur del puerto los coeficientes fueron inferiores, aunque relativamente altos ya que a pesar de que esta zona sur se encontraba muy abrigada frente a estos oleajes, el tramo situado en la cabecera del Muelle adosado al Dique Este reflejó el oleaje hacia la zona sur incrementando la agitación.

En la zona central los coeficientes fueron muy inferiores a los obtenidos en los casos anteriores.

El menor valor del coeficiente de agitación medio, $k_i = 0,10$, se produjo en la zona sur del Muelle adosado al Dique Este y el máximo, $k_i = 0,23$, en la zona sur del Muelle de Levante Exterior y en el Muelle adosado al Contradique en su parte norte.

En la Bocana el valor medio obtenido fue, $k_i = 0,75$.

3.1.2. Fase 2, Alternativa 2

Dirección E+ENE; $T_p = 9$ s

Los coeficientes de agitación mejoraron en las zonas central y norte mientras que aumentaron en la zona sur, respecto al caso correspondiente de la Alternativa 1.

Los efectos conjuntos del oleaje "atrapado" en el borde derecho del canal de acceso y la doble difracción en los morros del Dique Este y del Contradique, para este oleaje concreto, produjeron un incremento de la agitación en la toda zona sur a pesar de que con la prolongación del Dique Este el resto del puerto se encontraba más abrigado.

El menor valor del coeficiente de agitación medio, $k_i = 0,08$, se produjo en la zona sur del Muelle adosado al Dique Este y el mayor, $k_i = 0,38$, en la parte norte del Muelle de Ribera.

En la Bocana se obtuvo un coeficiente de agitación medio de valor, $k_i = 0,53$.

Dirección E+ENE; $T_p = 11$ s

Se puede comentar lo mismo que en el caso anterior si se compara con el correspondiente de la Alternativa 1, pero, en este caso, la mejora de la agitación en las zonas central y norte no es tan importante como en el caso de esta dirección de oleaje con el periodo $T_p = 9$ s.

El grado de agitación en toda la zona sur fue más elevado que en el mismo caso de la Alternativa 1. Los valores de los coeficientes de agitación fueron, el menor, $k_i = 0,10$, en la zona sur del Muelle adosado al Dique Este y el mayor, $k_i = 0,41$, en la zona norte del Muelle adosado al Contradique.

El coeficiente de agitación medio en la Bocana fue, $k_i = 0,58$.

Dirección SE; $T_p = 7$ s

En términos generales los coeficientes de agitación obtenidos se pueden considerar aceptables, sin que se aprecien zonas de acumulación de energía.

Se presentó mejor comportamiento en la zona norte del puerto que en la sur, ya que el oleaje difractado en el morro del Dique Este se reflejó en el tramo en talud del cabecero del Muelle adosado a dicho dique haciendo que parte de la energía incidente se dirija hacia la zona sur incrementando la agitación.

El valor inferior de los coeficientes de agitación, $k_i = 0,07$, se produjo en la zona sur del Muelle adosado al Dique Este y el máximo valor, $k_i = 0,18$, se presentó en la zona norte del Muelle de Ribera.

En la Bocana, el valor medio de la agitación fue $k_i = 0,65$.

Dirección S; $T_p = 5$ s

En la zona norte del puerto se obtuvieron coeficientes de agitación muy altos ya que el nivel de abrigo para esta zona es escaso, sin embargo en la zona sur del puerto y en la zona central los coeficientes fueron aceptables.

El valor más bajo de los coeficientes de agitación medios es $k_i = 0,14$ y se produjo en la zona sur del Muelle adosado al Dique Este. El máximo coeficiente, $k_i = 0,47$, se produjo en la zona sur del Muelle de Levante Exterior.

En la Bocana el valor medio obtenido fue, $k_i = 0,82$.

3.1.3. Fase 2, Alternativa 3.

Dirección E+ENE; $T_p = 9$ s

Los coeficientes de agitación en la zona norte fueron muy bajos siendo algo elevados en las zonas central y sur, aunque muy inferiores a los correspondientes a este oleaje en las alternativas anteriores.

La situación y orientación del borde izquierdo del canal de acceso contribuyo a incrementar la agitación en la zona sur del puerto.

El menor valor del coeficiente de agitación medio, $k_i = 0,07$, se produjo en la zona sur del Muelle adosado al Dique Este y el mayor, $k_i = 0,22$, en la parte norte del Muelle adosado al Contradique.

En la Bocana, muy abrigada, se obtuvo un coeficiente de agitación medio, $k_i = 0,27$.

Dirección E+ENE; $T_p = 11 s$

Se obtuvieron resultados análogos al caso anterior aunque con valores de los coeficientes de agitación mayores en la zona central y menores en la zona sur, siendo del mismo orden en la zona norte.

Los valores de los coeficientes de agitación estaban comprendidos entre, $k_i = 0,06$, en la zona sur del Muelle adosado al Dique Este y el mayor, $k_i = 0,21$, en la zona norte del Muelle adosado al Contradique.

El coeficiente de agitación medio en la Bocana fue, $k_i = 0,32$.

Dirección SE; $T_p = 7 s$

Los coeficientes de agitación obtenidos se pueden considerar aceptables en las zonas norte y sur mientras que en la zona central el grado de agitación fue alto.

Como en el caso anterior, el borde izquierdo del canal de acceso contribuyo en cierta medida al alto nivel de agitación que se produjo en esta zona.

El valor más bajo de los coeficientes de agitación, $k_i = 0,06$, se produjo en la zona sur del Muelle adosado al Dique Este y el máximo valor, $k_i = 0,15$, se presento en las zonas norte del Muelle adosado al Contradique y del Muelle de Ribera.

En la Bocana, el valor medio de la agitación fue $k_i = 0,46$

Dirección S; $T_p = 5 s$

Se obtuvieron coeficientes de agitación altos en la zona norte del puerto ya que, como se ha comentado anteriormente, el nivel de abrigo para esta zona es escaso aunque ahora es algo mayor que en el caso de la alternativa 2.

En las zonas sur y central del puerto, los coeficientes se pueden considerar aceptables. El valor más bajo de los coeficientes de agitación medios es $k_i = 0,14$, se produjo en tres zonas: la zona sur del Muelle adosado al Dique Este; la zona sur del Muelle adosado al Contradique; y en la zona norte del Muelle de Ribera. El máximo coeficiente, $k_i = 0,36$, se dió en la zona norte del Muelle adosado al Dique Este.

En la Bocana el valor medio obtenido fue, $k_i = 0,85$.

3.2. OPERATIVIDAD DE LOS ATRAQUES

La determinación de la operatividad de los muelles se realiza de acuerdo con los resultados de los ensayos en modelo físico a escala reducida de barcos atracados, siguiendo el método que a continuación se expone:

En primer lugar, se fijan los valores máximos admisibles para los movimientos del buque a efectos de explotación del atraque y las fuerzas máximas admisibles en las amarras y en las defensas.

Los criterios para determinar las amplitudes admisibles de los movimientos de los buques depende, entre otros fac-

Buque	Amarras	Defensas
Portacontenedores (PC 210)	68,4 t	626,0 t

TABLA 5. Cargas admisibles en amarras y defensas.

tores, del tipo de buque, de la mercancía y de los medios de carga y descarga disponibles. En la Tabla 4 se presentan los valores utilizados en este trabajo, basándose en los establecidos por el Grupo de Trabajo n° 24 de la Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) en su Informe Final de 1995, para diferentes tipos de buques.

En cuanto a las fuerzas admisibles en las amarras y en las defensas, se adoptaron los valores de sus respectivas cargas de trabajo, las cuales, se resumen en la Tabla 5.

Posteriormente los límites anteriores se interpretan desde un punto de vista estadístico, asociando los fenómenos –movimientos y esfuerzos– a las frecuencias de excedencia del oleaje que los provoca, de acuerdo con los datos del correspondiente estudio de Clima Marítimo, resultando así las relaciones:

- Altura significativa del oleaje (H_s) – amplitud admisible del movimiento.
- Altura significativa del oleaje (H_s) – fuerza admisible.

que permiten estimar los máximos de las amplitudes de los movimientos y de las fuerzas esperables en 8 horas de oleaje continuado.

Procediendo en sentido contrario, a partir de los valores umbrales de referencia puede obtenerse la altura de ola significativa límite correspondiente al valor admisible de cada movimiento o de cada fuerza, bien sea la tensión en las amarras o la reacción de las defensas.

De esta forma, se detecta el movimiento o la fuerza que daría lugar a la suspensión de la operación de carga/descarga y su altura de ola límite admisible.

Combinando este resultado con el régimen direccional del oleaje, y extrapolando mediante una distribución de Weibull, puede calcularse un índice de operatividad –horas/año o días/año–, en que los movimientos o fuerzas superan la amplitud admisible y durante los cuales no puede desarrollarse la transferencia de carga a pleno rendimiento.

En consecuencia, puede compararse la bondad de cada configuración analizada en términos de operatividad.

Como resultado del proceso descrito, en la Tabla 6 se muestran las alturas de ola límites en el exterior del puerto, a una profundidad de 15 m, que producen las amplitudes máximas admisibles de cada movimiento.

En la Tabla 7 se exponen, respectivamente, las amplitudes de los movimientos durante 8 horas ininterrumpidas de permanencia de los buques en sus correspondientes atraques actuando cada uno de los oleajes ensayados.

Las amarras y defensas no sobrepasaron sus respectivas cargas de trabajo.

TABLA 4. Valores admisibles de los movimientos del buque.

Buque	Vaivén	Deriva	Guiñada	Alteada	Cabeceo	Balance
Portacontenedores	1 m	0.6 m	1 °	0.8 m	1 °	3 °

Muelle	Oleaje	H _s (m)	Movimiento	Horas/año	Días/año
N-A1	E - 9 s	1,9	Deriva	12	0,5
N-A2	E - 9 s	1,4	Deriva	72	3,0
N-A3	E - 9 s	2,8	Deriva	0	0,0
S-A1	E - 9 s	1,6	Deriva	34	1,4
S-A2	E - 9 s	1,3	Deriva	103	4,3
S-A3	E - 9 s	2,0	Deriva	7	0,0
N-A1	E - 11 s	1,5	Balance-Vaivén	24	1,0
N-A2	E - 11 s	1,3	Balance	33	1,4
N-A3	E - 11 s	1,8	Deriva	12	0,5

TABLA 6. Alturas de ola
significante límite (m) para
cada movimiento.
Muelle de Ribera N y S.
Alternativas 1, 2 y 3.

Muelle	H _s (m)	Oleaje Dir - T _p	Vaivén (m)	Deriva (m)	Guiñada (°)	Alteada (m)	Cabeceo (°)	Balance (°)
N-A1	2	E - 9 s	0,4	0,7	0,8	0,5	0,6	2,6
N-A2	2	E - 9 s	0,4	0,8	1,1	0,7	0,8	3,3
N-A3	2	E - 9 s	0,2	0,4	0,6	0,4	0,4	1,6
S-A1	2	E - 9 s	0,3	0,7	0,3	0,5	0,3	3,3
S-A2	2	E - 9 s	0,3	0,9	0,5	0,7	0,3	3,6
S-A3	2	E - 9 s	0,1	0,6	0,3	0,4	0,2	2,2
N-A1	3	E - 11 s	2,1	2,3	1,9	1,4	1,2	6,2
N-A2	3	E - 11 s	1,5	3,1	2,2	1,5	1,4	7,3
N-A3	3	E - 11 s	0,8	1,2	1,3	0,8	0,7	3,2

TABLA 7. Amplitudes durante 8
horas ininterrumpidas de
permanencia.
Muelle de Ribera N y S.
Alternativas 1, 2 y 3.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en los ensayos permiten elaborar las siguientes conclusiones:

4.1. AGITACIÓN

4.1.1. Fase 2. Alternativa 1 (sin prolongación del Dique Este)

Esta configuración en planta deja gran parte de la ampliación sur muy expuesta a los oleajes de los sectores E+ENE y SE, lo que se traduce en unos coeficientes de agitación muy altos en esta zona. z

El oleaje incidente en el Muelle de Ribera procedente principalmente de los sectores E+ENE y SE, se refleja hacia el Muelle Contradique incrementando la agitación de este último.

La zona norte del puerto presenta coeficientes de agitación altos ($k_i = 0,31$), cuando el oleaje proviene del sector S, mientras que para los oleajes de los sectores E+ENE y SE los resultados se pueden considerar aceptables ($k_i = 0,18$).

Las excedencias de las alturas de ola límite en la zona sur, son debidas en mayor medida, a los oleajes del sector E+ENE, siendo escasa la contribución de los oleajes de los sectores SE y S. En cambio, para la zona norte son los oleajes de dirección S los más desfavorables, aunque los valores obtenidos fueron bajos.

Del análisis de excedencias de alturas de ola límite para la operatividad de los buques se puede decir que para la altura de ola (H_s)_{límite} = 0,30 m, referente de la operatividad de buques tipo ro-ro, las excedencias son aceptables en las zonas donde se piensa ubicar los atraques para este tipo de buques (inferiores a 2 días/año).

Los atraques del Muelle de Ribera presentan unos valores de excedencias, para la altura de ola límite (H_s)_{límite} = 0,50 m, muy bajos (del orden de 3 días/año), siendo prácticamente nulos para la altura de ola (H_s)_{límite} = 0,75 m.

Las zonas ubicadas en los muelles de la zona norte del puerto han presentado un índice de excedencia, para las alturas de ola límite de valores (H_s)_{límite} = 0,50 m y (H_s)_{límite} = 0,75 m, prácticamente nulos.

En el Muelle adosado al contradique, cuyos atraques van destinados a buques de gases licuados, las excedencias de $(H_s)_{\text{límite}} = 1,00$ m son nulas.

4.1.2. Fase 2. Alternativa 2 (longitud de prolongación del Dique Este, $L = 229$ m)

La agitación disminuye en todas las zonas del interior del puerto, respecto a la obtenida en la configuración anterior, excepto en el extremo norte del Muelle de Ribera para los oleajes de dirección E+ENE y en la zona norte del puerto para los oleajes de dirección S. La situación del Muelle de Ribera, se debe a fenómenos puntuales provocados por la conjunción de diversas circunstancias. Por un lado, que la prolongación del Dique Este se realice hasta el borde del canal de acceso y por otro, la doble difracción en los morros del Dique Este y del Contradique. El resultado de la acción conjunta de estos factores es una concentración de energía en dirección a la zona norte del Muelle de Ribera con el consiguiente aumento de la agitación, lo cual ha sido corroborado con la realización de ensayos adicionales para diferentes longitudes del Dique del Este

Las excedencias de las alturas de ola límite en la zona sur aumentan, con relación a la Alternativa 1, debido de nuevo a los oleajes del sector E+ENE, con escasa contribución de los oleajes de los sectores SE y S. En la zona norte, son los oleajes de dirección S los más desfavorables, con valores más altos que en el caso de la alternativa anterior.

El análisis de excedencias para la operatividad de los buques tipo ro-ro ha mostrado un índice relativamente alto en las zonas potencialmente usuarias de este tipo de buques.

En los atraques del Muelle de Ribera aumentan considerablemente los días de excedencia alcanzando valores del orden de 6,9 días/año en su zona norte, por la razón antes indicada.

Las zonas ubicadas en los muelles de la zona norte del puerto han presentado un índice de excedencia, para la altura $(H_s)_{\text{límite}} = 0,50$ m, muy bajo y prácticamente nulo para la excedencia de $(H_s)_{\text{límite}} = 0,75$ m. S En el Muelle adosado al contradique, las excedencias de $(H_s)_{\text{límite}} = 1,00$ m son, al igual que para la Alternativa 1, nulas.

4.1.3. Fase 2. Alternativa 3 (longitud de prolongación del Dique Este, $L = 358$ m)

La agitación es muy baja en todas las zonas del interior del puerto salvo en la zona norte del puerto si el oleaje proviene de la dirección S, en cuyo caso los coeficientes son bastante elevados. En general, los coeficientes de agitación son inferiores a los correspondientes de la alternativa anterior.

En esta alternativa, la energía asociada al oleaje reflejado en el tramo en talud situado en el cabecero del Muelle de Levante tiene mayor importancia que en las configuraciones anteriores al estar más confinado por la mayor longitud del Dique Este.

Las excedencias de las alturas de ola límite son inferiores a las de la Alternativa 1 salvo en las zonas ubicadas en la conjunción de los muelles de Levante y adosado al Dique Este, aunque para los tipos de buque usuarios de esos atraques los valores son muy bajos.

Para esta configuración, el análisis de excedencias de altura de ola límite para la operatividad de cualquier tipo de buque en sus atraques respectivos ha dado como resultado unos índices muy bajos, por lo que se puede estimar una operatividad del puerto prácticamente del 100%.

Finalmente, hay que hacer notar que la inoperatividad de los atraques queda cuantificada principalmente por los resultados obtenidos en los ensayos de barcos atracados, siendo el índice de excedencia de una altura de ola límite determinada un coeficiente meramente indicativo de las condiciones de agitación en las diferentes zonas de atraque analizadas. Si bien dichas condiciones tienen una relación directa con algunos movimientos del buque, no deben tomarse como determinantes de la operatividad de los muelles y si los resultados específicos del buque atracado con su sistema de amarre en una posición concreta en el muelle. De esta manera, se obtiene una estimación más realista del rendimiento de las instalaciones portuarias.

4.2. BARCOS ATRACADOS

En todos los atraques ensayados se obtuvo una operatividad aceptable, observando en todos ellos que los mejores resultados se obtuvieron para las alternativas 1 y 3, con valores de 0,5 a 1,4 días/año en la primera y de 0 a 0,5 días/año en la alternativa 3 y los peores para la alternativa 2, con valores entre 1,4 y 4,3 días/año.

4.2.1. Atraques Norte y Sur del Muelle de Ribera. $T_p = 9$ s.

En las tres alternativas estudiadas, el movimiento crítico que provocaba la menor altura de ola límite admisible fue la deriva. Este movimiento se puede reducir incrementando las líneas de amarre, en particular los traveses.

4.2.2. Atraque Norte del Muelle de Ribera. $T_p = 11$ s.

En las alternativas 1 y 2, el movimiento crítico fue el balance. Dado que es un movimiento que está en plano vertical, es difícil disminuir su valor cambiando o modificando únicamente el sistema de amarre.

En la alternativa 3, el movimiento crítico fue la deriva. Para corregir estos valores sirve lo que se ha dicho anteriormente para el oleaje de $T_p = 9$ s de incrementar el número de traveses.

5. REFERENCIAS

- Criteria for movements of moored ships in harbours. Report of Working Group 24. Supplement to Bolletín 88, 1995. Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC). List of Members: H. Smitz, Ole Juul Jensen, S. Heinesen, P. Hebert, G. Viggooson, L. Bolatti Guzzo, S. Ueda, Th. Elzinga, S. Bjordal, H. Moes, J.R. Iribarren, E. Bowers.
- Mooring Equipment Guidelines, 3rd Edition. London. Oil Companies International Marine Forum (OCIMF). Witherby Seamanship International, 2008.
- Models in Hydraulic engineering. Physical principles and Design Applications. P. Novak, J. Cábalka. Pitman, 1981.
- Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. Steven A. Hughes. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1993.
- Random Seas and Design of Maritime Structures. Yoshimi Goda. University of Tokyo Press, 1985.
- Ensayos de barcos atracados en modelo físico a escala reducida. Lázaro Redondo Redondo, Antonio Baonza González, Ramón Gutiérrez Serret. Revista Ingeniería Naval, número 878, febrero 2010.