

METODOLOGIA PARA LOS ENSAYOS DE AGITACION Y BARCOS ATRACADOS EN MODELO REDUCIDO. UNA TECNICA UTIL

JOSE RAMON IRIBARREN ALONSO (*)

RESUMEN. El análisis de los fenómenos presentes en las dársenas, así como del comportamiento de los buques atracados, puede llevarse a cabo desde diferentes perspectivas, pero el ensayo en modelo físico es, indudablemente, una de las herramientas más potentes para este tipo de estudios. La información que proporcionan los modelos reducidos es enormemente útil y fiable, siempre y cuando los ensayos se desarrollen en las condiciones adecuadas, minimizando los efectos de escala, y las medidas se lleven a cabo con el cuidado que exige todo proceso de este tipo.

En este artículo se pasa revista a diversos aspectos de la técnica de modelos, presentando la forma de trabajo habitual en el CEPYC. Se analizan con detalle la planificación, preparación y desarrollo de los ensayos de agitación y de comportamiento de buques atracados, como exponentes del trabajo en modelo reducido tridimensional. En todas las fases del artículo se presentan múltiples casos de aplicación que corroboran la utilidad y validez de este tipo de trabajos.

ABSTRACT. *The analysis of the response of basins and the behaviour of moored ships can be achieved using different methods, but model testing is, undoubtedly, one of the most powerful techniques relevant to this kind of surveys. The data provided by scale models are useful and reliable, as long as tests are developed in true-to-life condition, scale effects are minimised and, of course, measurements are achieved accurately.*

This paper examines several aspects of models testing techniques and describes the usual approach applied in CEPYC. Planning, setting up and development of wave agitation and moored ship tests are analysed, as an illustration for tridimensional model testing surveys. Several case studies are presented all along the text, in order to confirm the applicability and usefulness of this kind of work.

INTRODUCCION

Los ensayos en modelo reducido demuestran ser, con todas sus limitaciones, un instrumento de análisis útil en la técnica portuaria. Aportan al proyectista una información muy valiosa a la hora del diseño, y siempre a un coste muy inferior al de la obra en cuestión. En un campo, como es el del oleaje, dependiente de gran cantidad de parámetros, y, por tanto, muy difícil de modelizar y reducir a fórmulas precisas, el ensayo en modelo físico resulta ser una técnica eficaz para la resolución de muchos problemas presentes en el diseño de un puerto y en su explotación.

En este artículo se presentan algunas orienta-

ciones sobre las técnicas utilizadas en el CEPYC para el estudio de las obras portuarias, y más específicamente, la metodología utilizada en los ensayos de agitación y comportamiento de buques atracados.

A través de diversas aplicaciones se podrá comprobar, por una parte, la dificultad de realización de este tipo de estudios, con el objetivo permanente de obtener resultados fiables y limitar los efectos de escala, y, por otra, su innegable utilidad en el proyecto y mejora de instalaciones portuarias.

GENERACION DEL OLAJE

El oleaje será, en la mayoría de los casos, la sollicitación dominante en el diseño de la instalación portuaria. Ello no quita que, en ocasiones, sean también las corrientes, la marea o el viento factores a considerar. Pero la especial dificultad para

(*) Ingeniero Naval. División de Experimentación Portuaria, Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX).

reproducir adecuadamente este fenómeno ha dado lugar a que la mayor parte de los esfuerzos se vuelquen en la obtención en el modelo de oleaje que se ajusten de forma precisa a la realidad.

En la actualidad, el CEPYC dispone de medios para generar oleaje aleatorio con un espectro de tipo JONSWAP, o bien utilizar registros de la naturaleza. El proceso comienza en los datos recogidos por la Red de Medida y Registro de Oleaje (REMRO), por medio de boyas repartidas a lo largo de la costa española. De su análisis pueden obtenerse los espectros correspondientes a los temporales característicos de cada zona, que se utilizarán como fuente para el ajuste de un espectro tipo en el modelo físico. En la figura 1 puede verse uno de estos ajustes, para un temporal del E en la costa de Levante, y comparar el espectro teórico con el obtenido realmente en el modelo. (Refs. 1 y 2.)

El oleaje generado se graba en cinta magnéti-

ca, lo que permite su uso repetido a lo largo de los ensayos. La instalación típica constará de un magnetófono, el correspondiente amplificador, una unidad de control encargada de la regulación de la señal y una paleta generadora de oleaje con excitador hidráulico.

Como es sabido, el movimiento oscilatorio de traslación horizontal de la paleta en el agua da lugar a dos fenómenos simultáneos: una onda progresiva de frecuencia igual a la del movimiento de la paleta y altura proporcional a su recorrido, y una serie de ondas estacionarias superpuestas de amplitud decreciente a medida que se alejan del generador. Por ello, será necesario disponer la paleta suficientemente alejada del modelo (unas 5 o 6 veces la longitud de onda) como para permitir la atenuación de estas señales perturbadoras.

Por otra parte, las mayores dificultades actuales para generar oleaje en modelo son, de una parte, la reproducción de los grupos de ondas, tema

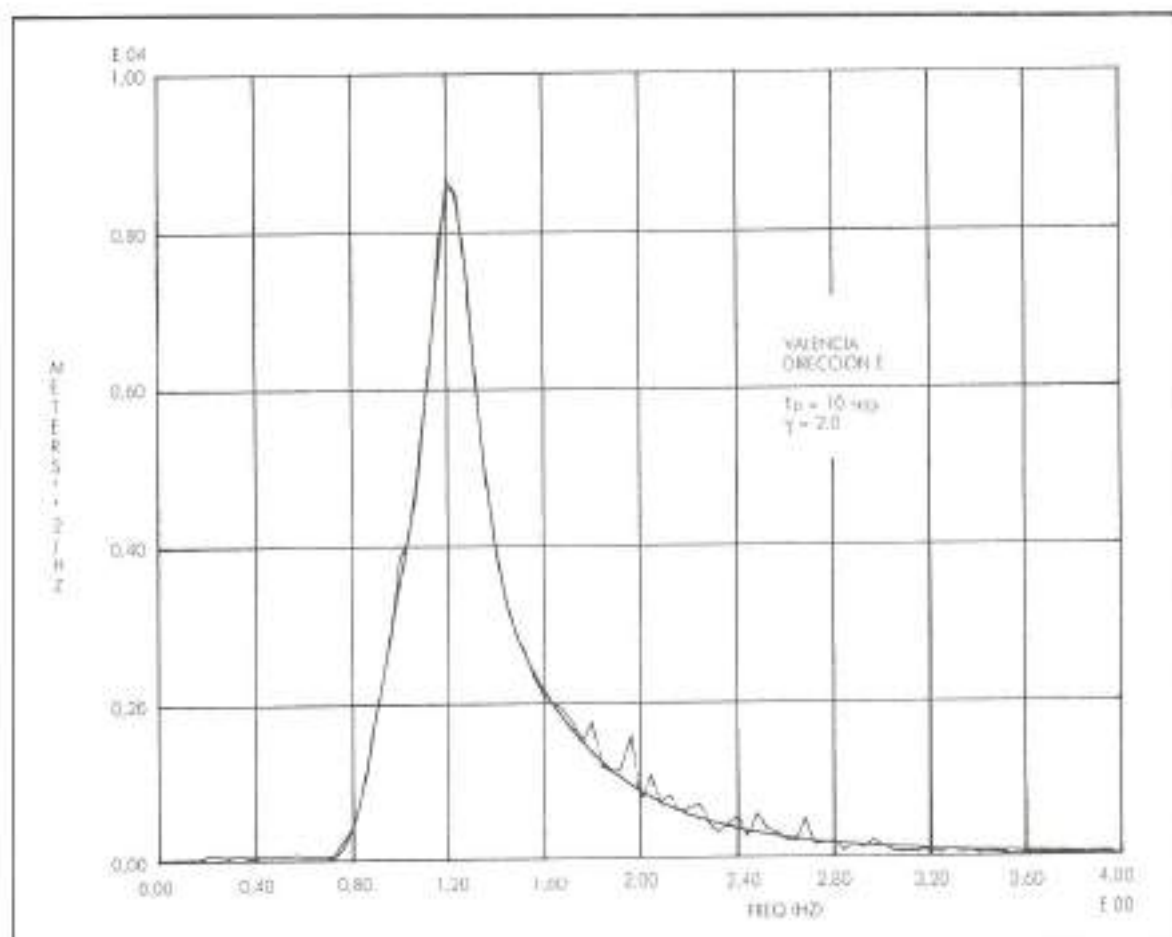


FIGURA 1. Espectro de oleaje dirección E (Levante)

objeto de múltiples estudios, y, de otra, la eliminación de las ondas espúreas.

Los grupos de ondas dan lugar a oscilaciones de período largo (30-200 seg.) que, pese a ser de segundo orden frente al oleaje normal, pueden producir fenómenos de resonancia en dársenas o en el movimiento de los buques atracados, por estar sus períodos propios de oscilación en el rango de los de los grupos de ondas. Hoy en día no se consigue ajustar el espectro del oleaje en el rango de las bajas frecuencias con la exactitud que se logra en la zona central.

Las ondas parásitas son consecuencia el sistema de generación del oleaje: El movimiento de la paleta, una superficie plana, no permite la adecuada reproducción del campo de velocidades orbitales de las partículas en las olas naturales. Para compensarlo, aparece un campo de velocidades de signo contrario que produce una onda larga progresiva, no ligada a los grupos de ondas.

La eliminación de esta perturbación se lleva a cabo de dos formas: Superponiendo una señal de segundo orden en el movimiento de la paleta, que produzca las velocidades deseadas, o bien, de forma más sencilla aunque menos efectiva, utilizando el efecto de filtro de la profundidad sobre los distintos tipos de olas.

En efecto, según los estudios de Ottesen-Hansen (Ref. 3), el efecto de «shoaling» para las ondas parásitas H_p y para las ondas largas aso-

ciadas al oleaje H , al pasar de profundidad h_1 a h_2 resulta ser muy diferente:

$$\frac{H_{p2}}{H_{p1}} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{1/4} \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{1/2}$$

Así pues, la reducción relativa será:

$$\frac{H_2}{H_{p2}} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{1/4} \times \frac{H_1}{H_{p1}}$$

Como se ve, la reducción de altura de las ondas parásitas es mucho más pronunciada que en la onda larga asociada. Por ello, si se genera el oleaje en una zona de mayor profundidad que el modelo que se quiere estudiar ($h_1 \gg h_2$) el efecto de las ondas espúreas se verá muy amortiguado.

Es práctica habitual disponer la paleta en una zona más profunda, lo que obliga a elevar sobre el nivel del suelo el área del puerto objeto de estudio. Según diversos autores, las mejores condiciones vienen dadas por

$$h = 0,0256 g T_p^2$$

siendo h la profundidad de generación del oleaje, y T_p el período de pico.

Si se toman mayores valores de h , se obtendrán

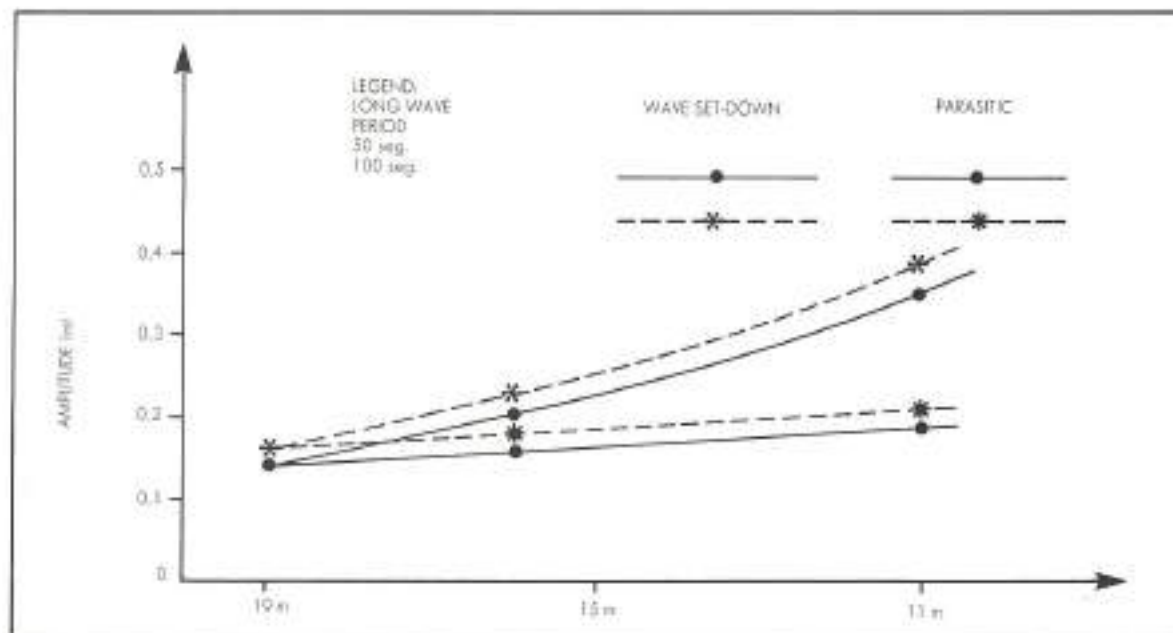


FIGURA 2. Efecto de la profundidad sobre las ondas largas, para un oleaje de $T_p = 13$ seg. y $H_s = 2,5$ m.

ondas largas exageradas, mientras que reduciendo este valor óptimo, y si no se superpone una señal correctora de segundo orden, las ondas largas del modelo serán pequeñas frente a las reales.

Aplicando esta formulación al modelo del Puerto de Valencia, por ejemplo, tenemos, para el oleaje del NE, con un $T_p = 14$ seg., un valor óptimo de $h = 49$ m, que en modelo a escala 1:150 serán 33 cm. Para el temporal del SE, de período menor, $T_p = 8$ seg., sería $h = 16$ m, o 11 cm en modelo. En el modelo se dispusieron las paletas de generación de oleaje a una profundidad de 50 m, reproduciéndose la batimetría completa a partir de la cota -20 m. La adaptación entre una y otra zona se lleva a cabo mediante una rampa de acuerdo

de pendiente 2:1. (Ref. 2), como vemos en la figura 3.

Otra limitación existente es el hecho de que los periodos cortos, presentes en determinadas direcciones de los temporales del Mediterráneo, por su reducido «fetch», pueden dar problemas de vibraciones en las paletas. Ello obliga a utilizar alturas de olas bajas, si se quiere obtener una buena precisión en la reproducción del oleaje.

En determinados casos, dependiendo de la disposición del puerto a analizar, puede ser necesario el uso de varios generadores sincronizados, con el fin de obtener un frente de onda de mayor longitud. En caso contrario, pueden aparecer problemas en cuanto a la alimentación del oleaje.

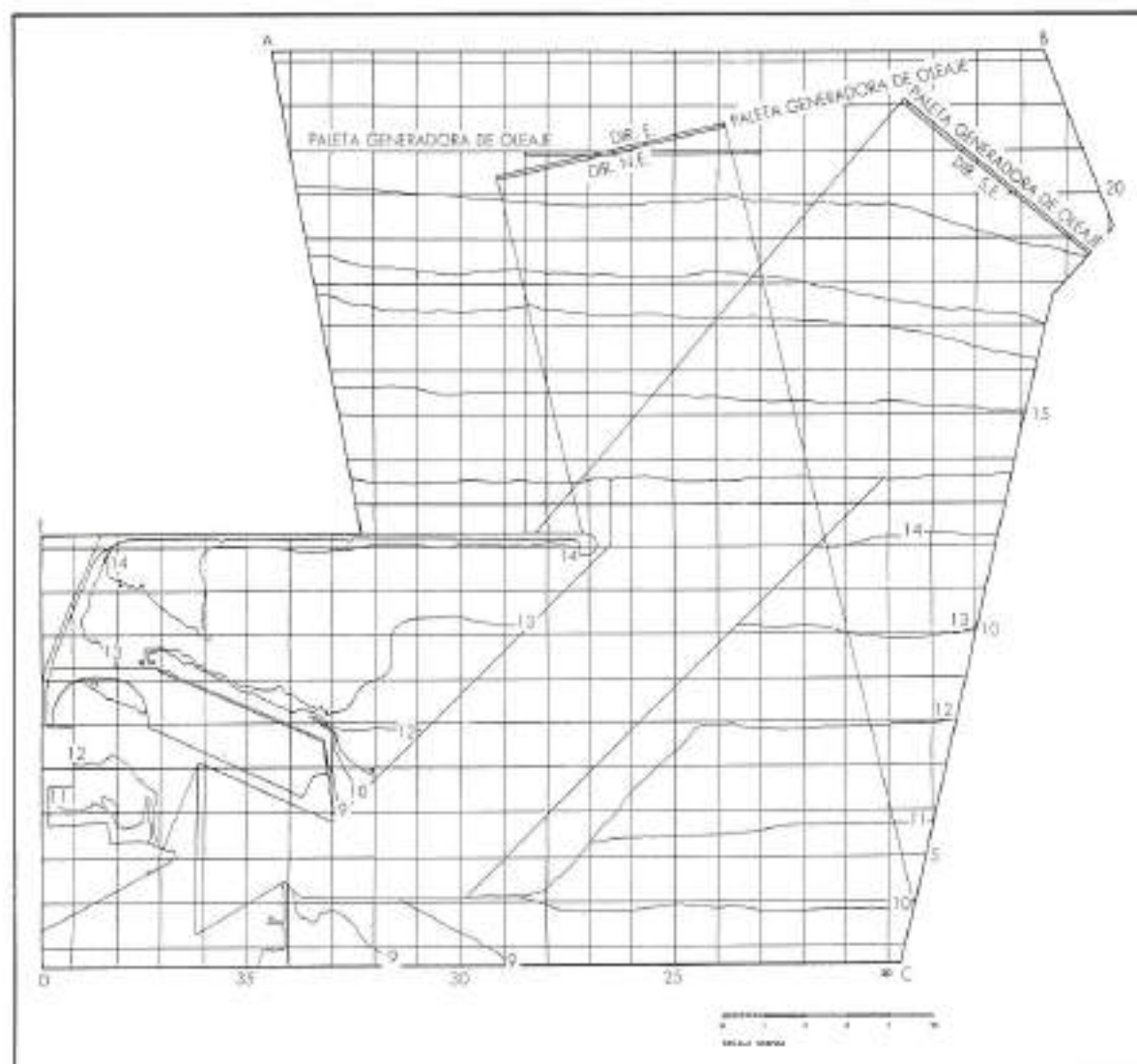


FIGURA 3. Disposición general del modelo del Puerto de Valencia.

Así, por ejemplo, en el Puerto de Las Palmas (Ref. 4) se analizó la prolongación del dique, utilizando un modelo existente. Las limitaciones impuestas por las dimensiones del modelo ya construido para ensayos anteriores no permitieron el estudio de la longitud de dique prevista. En efecto, si se hubieran ensayado mayores longitudes, la zona de alimentación del oleaje en la zona de sombra tras el dique hubiera quedado cortada por las pantallas de encauzamiento, dando lugar a unas condiciones de agitación inferiores a las reales y, por tanto, a un ensayo falseado.

La longitud ensayada se determinó utilizando la formulación del profesor Iribarren (Ref. 5), que señala como zona de alimentación el área que se abre formando 45 grados con la dirección del oleaje incidente, desplazada media longitud de onda desde el morro del dique (ver la figura 4). El cálculo de esta zona, tomando como límite la posición de las pantallas, determinada por la situación de la paleta, permitió fijar la máxima longitud de dique ensayable sin disminuir las condiciones de agitación.

CONSTRUCCION DEL MODELO

La construcción del modelo tridimensional se lleva a cabo utilizando la técnica de los alambres. Es de-

cir, las batimétricas se reproducen con alambre de acero, y se fijan soldándolas sobre varillas verticales de longitud correspondiente a la profundidad en cuestión. Posteriormente, se rellena 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, debiendo conseguirse un buen acabado para reducir al mínimo la fricción.

Los datos de batimetría se obtienen de diversas fuentes: Las cartas generales y locales, información actualizada de los puertos sobre las condiciones de dragado, o incluso, si es necesario, campañas de medición *in situ*.

Las instalaciones del puerto (espigones, diques, dársenas, etc.) se reproducen con diferentes materiales y métodos de construcción. Habitualmente se utilizan bloques o piedras calibradas para los diques, y los espigones se construyen con ladrillos y cemento. En determinados casos se disponen elementos desmontables que reducen drásticamente el tiempo y coste de construcción (espaldones, muelles claraboya, rampas y varaderos, etc.).

En el modelo del Puerto de Las Palmas, por ejemplo, la especial disposición de las soluciones

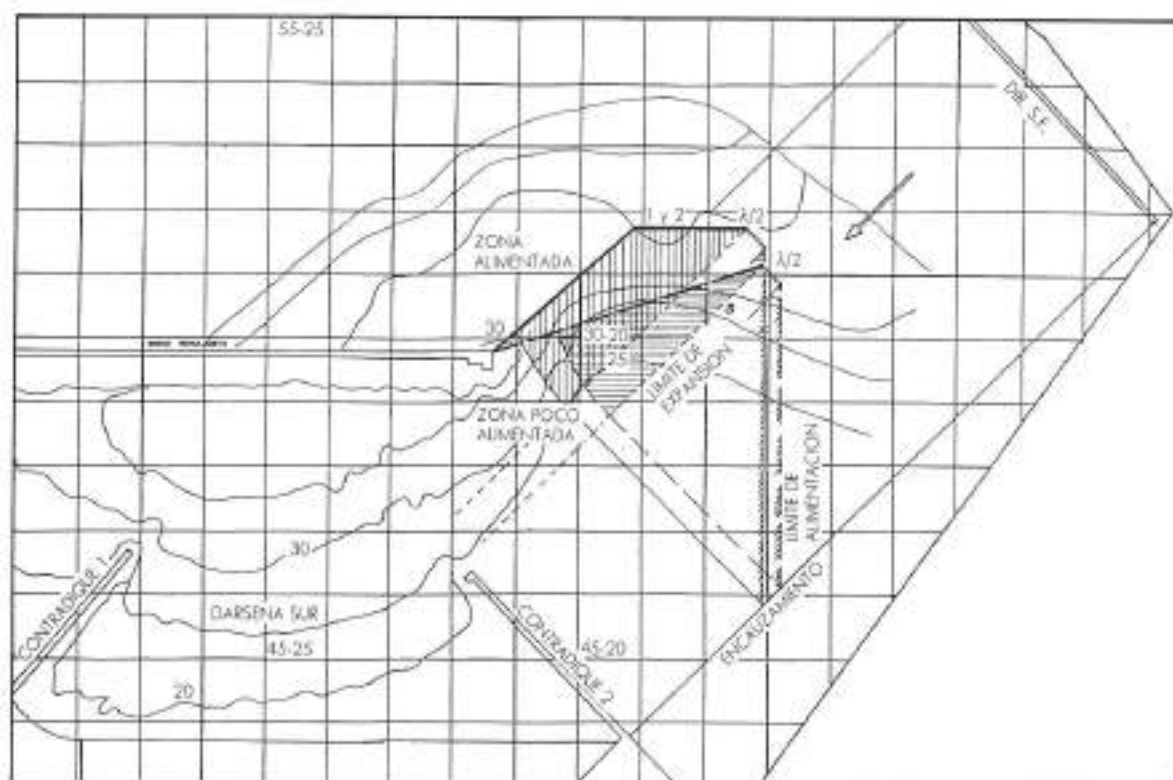


FIGURA 4. Cálculo de la alimentación del oleaje de Las Palmas.

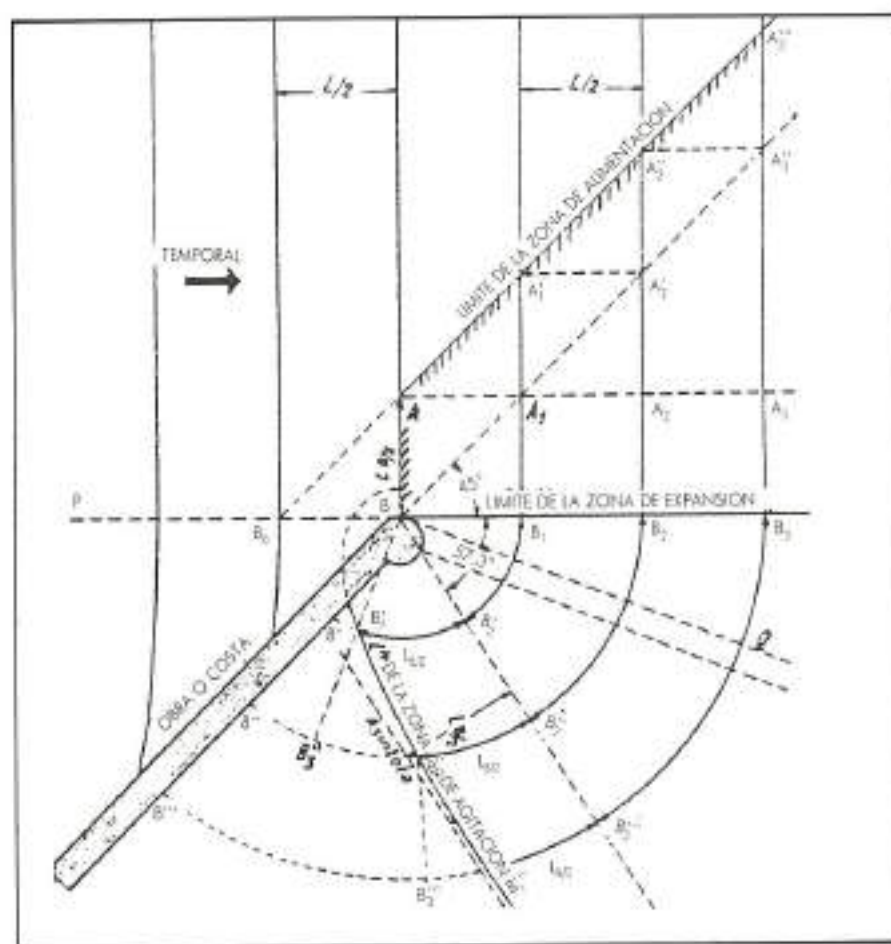


FIGURA 5. Gráfico de difracción según Iribarren.

ensayadas permitió superponer las tres alternativas, sin necesidad de demoler las soluciones previas. Ello redujo de forma importante el plazo sin alterar las condiciones de los ensayos. Los posteriores ensayos de comportamiento de buques atracados se llevaron a cabo en orden inverso, demoliendo progresivamente las soluciones más interiores (Ref. 4).

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, es necesario disponer elementos antirreflectantes en los límites del modelo, que permitan una correcta reproducción de los fenómenos de propagación del oleaje. Estos consistirán habitualmente en mantas de fibra de coco, playas de gravilla muy tendidas, etc. Hay que tener en cuenta, además, que las ondas largas tienen condiciones de propagación diferentes a las del oleaje, siendo muy difícil controlar sus reflexiones, que se verán mucho menos amortiguadas.

Asimismo, cuando el elemento reflectante sea

un muelle tipo claraboya, por ejemplo, deben realizarse ensayos bidimensionales previos para determinar la variación del coeficiente de reflexión dentro del rango de alturas y períodos esperados en el atraque. La técnica habitual es llevar a cabo ensayos a una escala mayor (1:20 o 1:25), representativa de las condiciones del prototipo, para evaluar las condiciones reflectantes del muelle. Posteriormente, se ajustará el coeficiente de reflexión del modelo de agitación (a escala 1:75-1:150) actuando sobre algún parámetro de la sección (índice de huecos, pendiente de taludes, disposición de claraboyas, etc.) hasta conseguir valores semejantes a los reales.

En el desarrollo de los ensayos será necesario considerar, en muchos de los casos, los diferentes niveles de marea. El comportamiento hidráulico de las dársenas puede verse seriamente afectado por las variaciones en su calado, produciéndose en alguna situación fenómenos de amplificación del oleaje. Algo semejante puede decirse del comportamiento de los buques atracados, que depende,



FIGURA 6. Prolongación del Dique Exterior de Las Palmas.

entre otros factores, del resguardo bajo la quilla («keel clearance»). Esta variable es definitiva del amortiguamiento de los movimientos. Por otra parte, la geometría de los sistemas de amarre varía con la altura de marea, como lo hace con la condición de carga del buque.

El nivel de dragado de las dársenas o los canales de acceso a los puertos es también un factor determinante de su comportamiento. Es un parámetro muy sencillo de reproducir en el modelo y proporciona una gran información sobre las condiciones de propagación del oleaje y efectos de peralte («shoaling»). Los ensayos realizados en el CEPYC han demostrado, en determinados casos, la decisiva influencia de la disposición de los calados en las diferentes zonas del puerto.

MEDIDA Y ANALISIS

Para el análisis del comportamiento de un puerto se recurre a la definición de una serie de puntos de medida del oleaje. Estos se seleccionan con el objetivo de conseguir una información lo más amplia posible y, a la vez, un tiempo de ensayo razonable. Habitualmente se determina una distribución re-

gular de los puntos, que permite conocer la agitación cada 50 a 150 m de distancia en prototipo, acumulando puntos de medida en las zonas conflictivas. Según el tamaño del modelo, pueden realizarse de 20 a 100 medidas de altura de ola.

A la hora de seleccionar los puntos de medida ha de tenerse en cuenta que en zonas confinadas es habitual que se produzcan ondas estacionarias debidas a las reflexiones. Por ello, debe tantearse la situación de los nodos y vientres para evitar mediciones de altura falseadas.

Por otra parte, suelen definirse una serie de zonas que agrupan varias medidas locales, elegidas con criterios de explotación o comportamiento hidráulico del puerto (bocana, canales de acceso, líneas de atraque, dársenas, etc.). De este modo, puede conocerse de forma global la respuesta del puerto ante los distintos temporales, y comparar de forma eficaz unas y otras soluciones.

La medida de la altura de ola se lleva a cabo utilizando sondas de resistencia. Consisten en dos varillas de acero que se sumergen en el agua, variando su resistencia según el nivel que alcance en ellas. Alimentadas con corriente continua, generan

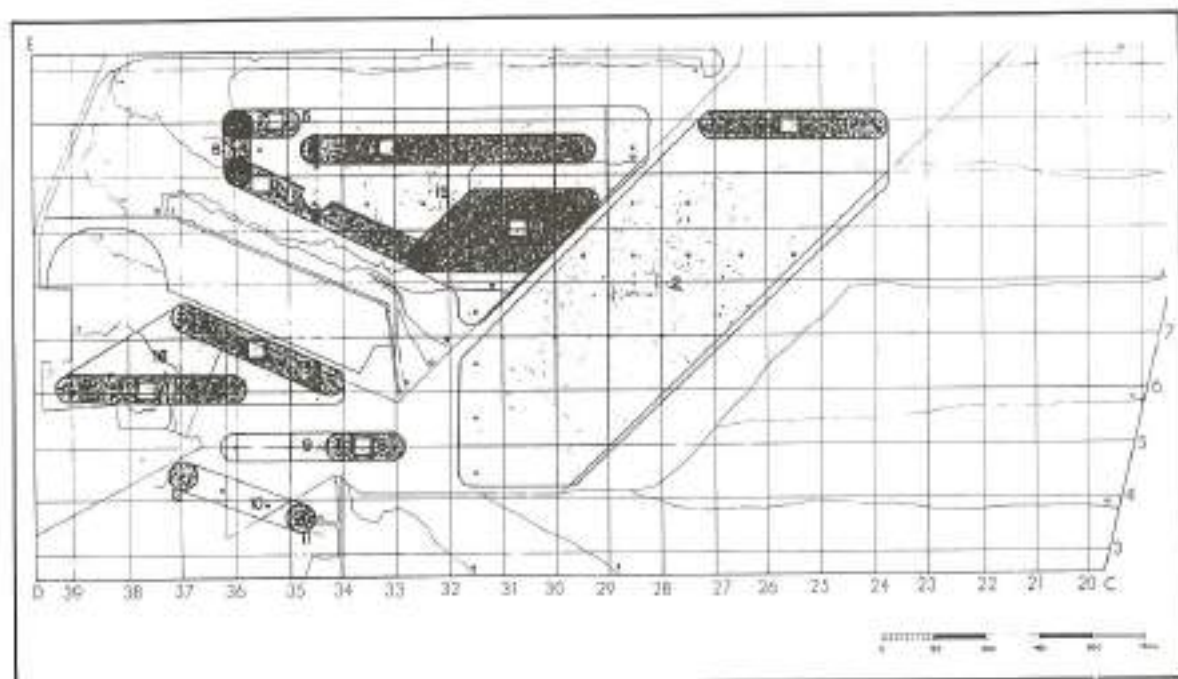


FIGURA 7. Definición de las zonas de estudio en el Puerto de Valencia.

una señal proporcional a la altura de ola, que es amplificada y almacenada en la memoria del ordenador, tras la oportuna conversión analógica-digital.

Los datos registrados se someten a distintos tipos de análisis estadísticos y espectrales, pudiendo comprobarse el número de olas, las alturas media, significativa y máxima de la muestra, los periodos medio y significativo y la distribución conjunta de alturas y periodos. Los programas disponibles permiten obtener los espectros del oleaje incidente y resultante en los diferentes puntos, utilizando el método FFT. Así, puede analizarse la transferencia de energía en las diferentes bandas a cada zona del puerto.

La información obtenida en este tipo de análisis es amplísima, y para su eficaz interpretación se recurre a la obtención de los coeficientes de agitación, que relacionan la altura local con la altura de ola exterior. Estos se representan gráficamente en las curvas de isoagitación, que proporcionan una información valiosísima sobre las condiciones del puerto. Las curvas de isoperíodos resultan también una herramienta eficaz en determinados casos, especialmente si la geometría de las dársenas facilita los fenómenos de resonancia.

En la figura 8 puede verse la evolución de las curvas de isoagitación en el Puerto Exterior de Las Palmas al prolongar el dique con diversas orientaciones y longitudes (Ref. 5).

Es también útil el estudio por zonas, según se apuntó antes. La obtención de valores medios y máximos del coeficiente de agitación y del periodo en cada zona permite una comparación rápida y significativa de las distintas áreas de explotación del puerto. Podrán evaluarse con facilidad las condiciones de navegabilidad en bocana o canales de entrada, estimar la operatividad de un atraque o comparar de forma global diferentes disposiciones de una dársena.

ENSAYOS DE BUQUES

La finalidad de este tipo de ensayos es cuantificar el rango de movimientos que el buque sufrirá cuando esté atracado en puntos determinados del puerto objeto de estudio. Igualmente, se busca evaluar las fuerzas que aparecen sobre las amarras y defensas como resultado de tales desplazamientos. La información recogida en estos ensayos sirve como indicador fiable de la operatividad del atraque y de las condiciones de explotación.

El objetivo indudable del puerto es proporcionar al buque un abrigo suficiente para poder llevar a cabo las operaciones de carga y descarga o aprovisionamiento. En este sentido, los estudios de agitación por sí solos no constituyen un criterio de decisión suficiente. Se ha comprobado que, bajo determinadas circunstancias, en zonas de muy escasa agitación, que serían aceptadas desde

Ingeniería Civil/66

este punto de vista, se producen movimientos del buque inadmisibles para sus tareas habituales y que ponen en peligro la integridad de su equipo de amarre.

Recordemos que el buque amarrado constituye un sistema dinámico de masa variable (diferentes condiciones de carga, masa añadida dependiente de la frecuencia de movimiento, etc.) unido a su entorno por una serie de ligaduras elásticas (amarres y defensas) de comportamiento no lineal y rigideces diferentes, y sometido a amortiguamientos de diverso origen (fricción con el agua o las defensas, formación de torbellinos, deformación de amarres y defensas, etc.). Por ello, su comportamiento frente a una excitación aleatoria y de espectro amplio, como es el oleaje, es muy difícil de simplificar y reducir a fórmulas sin perder fiabilidad.

Así pues, el ensayo en modelo físico, aun con un coste elevado y dificultades de realización, es una herramienta útil para la evaluación de la operatividad de los atraques de una instalación portuaria. El análisis de los desplazamientos y fuer-

zas en amarres permite detectar situaciones complicadas que no salieron a la luz en los estudios de agitación, y que en muchos casos pueden ser corregidas actuando sobre la disposición del sistema de amarre o alterando el material y grosor de las amarres.

El modelo del buque a ensayar se selecciona de acuerdo con las autoridades del Puerto, teniendo en cuenta el tipo de terminal objeto de estudio y la información disponible. El modelo se construye siguiendo la técnica habitual en la Ingeniería Naval, en madera o plástico. Se reproducen cuidadosamente el desplazamiento del buque, tanto a plena carga como en lastre, y la distribución de pesos, de forma que la respuesta dinámica del modelo sea semejante a la del prototipo. Normalmente, si no hay fuertes corrientes, no es necesario actuar sobre la rugosidad de las superficies, al ser los movimientos del buque atracado cortos y de baja velocidad. Del mismo modo, pueden despreciarse los elementos de la superestructura, ya que el efecto del viento se analiza separadamente y se recoge, en su caso, utilizando pesos calibrados.

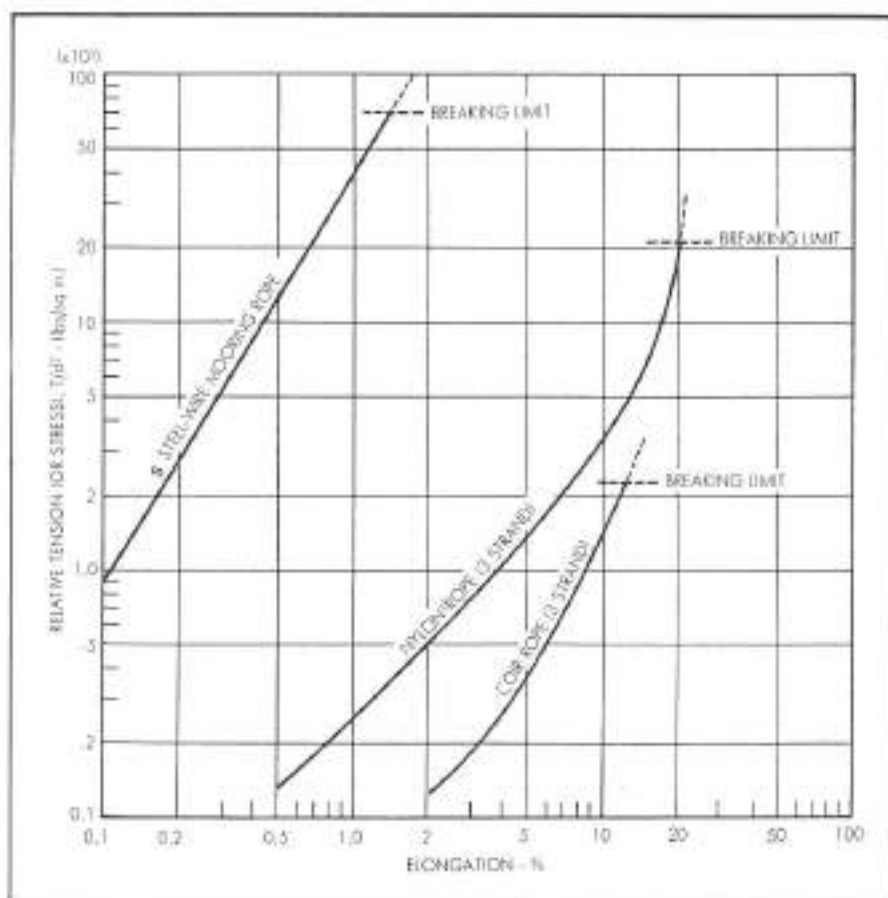


FIGURA 9. Gráficos de Wilson para cálculo de amarres.

En todo este proceso es fundamental seleccionar una escala adecuada. El objetivo básico es reducir los efectos de escala al mínimo, como ocurría en agitación, pero es también muy importante que tanto el modelo del barco como las amarras y defensas sean manejables. En los ensayos de buques se utiliza una gran variedad de elementos y aparatos de medida (plataformas, defensas, muelles, sondas, potenciómetros, strain gauges, etc.) que complican extraordinariamente su preparación y desarrollo. Por ello, la medida de magnitudes en un rango aceptable y el manejo de elementos de un tamaño adecuado redundará en unos resultados más fiables.

Las amarras y defensas se modelizan utilizan-

— Carga de trabajo $Pt = k \cdot Pr = 0,67 \cdot 77 = 52 \text{ t}$.

— Alargamiento a $Pt \text{ et} = 20,6 \%$.

El coeficiente de seguridad k se ha tomado 0,67 siguiendo las recomendaciones de la BSRA para cables de fibra (Ref. 9).

La rigidez resultante es, pues,

$$K = Pt/et/L = 52/0,206/L = 252/L \text{ t/m}$$

Aplicando este cálculo a las amarras consideradas, una vez estimada su longitud, tanto en el exterior del buque como a bordo, resultan los siguientes valores:

AMARRA	L ext	L cub	L tot	Ki (t/m)	NUMERO	K (t/m)	K (g/cm)
Largo	30	2	32	7,88	3	23,63	10,50
Través	12	5	17	14,82	2	29,64	13,17

do muelles de acero muy finos, calibrados de forma que la rigidez se corresponda con la real a escala $1/e^2$, siendo e la escala de longitudes. Para su cálculo, ha de disponerse de amplia información, relativa a los materiales utilizados, los grosores y número de amarras de cada línea, la disposición de éstas (situación de largos, traveses y springs), las condiciones de marea y dimensiones del barco a plena carga y lastre, la posición de los bolardos y la colocación del buque en el muelle, etc.

Con estos datos puede estimarse la longitud exterior de cada amarra, que sumada a la longitud a bordo definirá la elasticidad de las líneas. Utilizando el método de Wilson (Ref. 7), como se hace en el CEPYC, puede obtenerse entonces la rigidez de los muelles a utilizar en el ensayo. Veamos un ejemplo:

De acuerdo con la información suministrada por el Puerto de Valencia, junto con datos de buques semejantes, en los ensayos de comportamiento de un Bulkcarrier de 64.000 TPM realizados para este puerto (Ref. 8) se utilizaron configuraciones de amarre con las siguientes características:

- 3 largos a proa y popa
- 2 traveses a proa y popa

El material utilizado fue polipropileno, con 80 mm de diámetro (mena 10"), cuyas características resistentes, de acuerdo con los gráficos de Wilson que se adjuntan en la figura 10 son:

— Carga de rotura $Pr = 77 \text{ t}$.

En este proceso debe tenerse en cuenta que los muelles, en el rango de fuerzas en que se desarrolla el ensayo, se comportan linealmente, lo que para determinados materiales podría no ser correcto. Otro factor que suele despreciarse es el desgaste por fatiga de las fibras de las amarras, que produce una rigidización de éstas por encima de los valores iniciales tabulados.

Las defensas siguen como criterio de diseño el primer impacto del buque sobre el muelle, pero son elementos de gran influencia en la respuesta dinámica del buque una vez atracado. Su rigidez, normalmente muy superior a la de las amarras, provoca la aparición de oscilaciones de período corto superpuestas a los movimientos de deriva del buque. Por otra parte, la mayoría de los diseños ac-



FIGURA 10. Disposición de un modelo de barco en un ensayo.

tuales no ofrecen buenas condiciones de amortiguamiento, que podrían colaborar de forma decisiva a la mejora del comportamiento del barco en puerto.

En el modelo se utilizan muelles calibrados y dispositivos de palanca, que transforman la comprensión de las defensas en tracción. De este modo se ajusta la rigidez, pero es importante también la reproducción de las características amortiguadoras y la fricción con el casco del buque. En este sentido, se echa en falta información más detallada de los constructores y los puertos, lo que redundaría en diseños más eficaces.

La medida de las fuerzas en amarras y defensas se realiza por medio de extensómetros de gran sensibilidad («strain gauges»). Los movimientos del buque se miden con potenciómetros giratorios fijos en tierra. Un conjunto de hilos adecuadamente dispuestos, unidos a puntos determinados de la

cubierta del barco y a los potenciómetros, permite controlar el movimiento de estos puntos. La suma o diferencia de éstos dará como resultado la amplitud de movimiento del centro de gravedad del buque en las diferentes direcciones (vaivén, deriva y alzada), así como los giros del buque (cabeceo, balance y guiñada). En la figura 11 se tiene una disposición típica para un ensayo de este tipo.

Del mismo modo que en agitación, se dispone de programas para la adquisición de datos y conversión analógico-digital, almacenándolos en disco. El análisis estadístico posterior permite evaluar los valores medios, máximos y significantes de los movimientos y fuerzas, junto con sus períodos. Es posible también obtener gráficos con el desarrollo temporal de las diferentes variables (figura 11), los espectros correspondientes o ajustes de distribuciones de probabilidad que permiten extrapolar los resultados a series más largas.

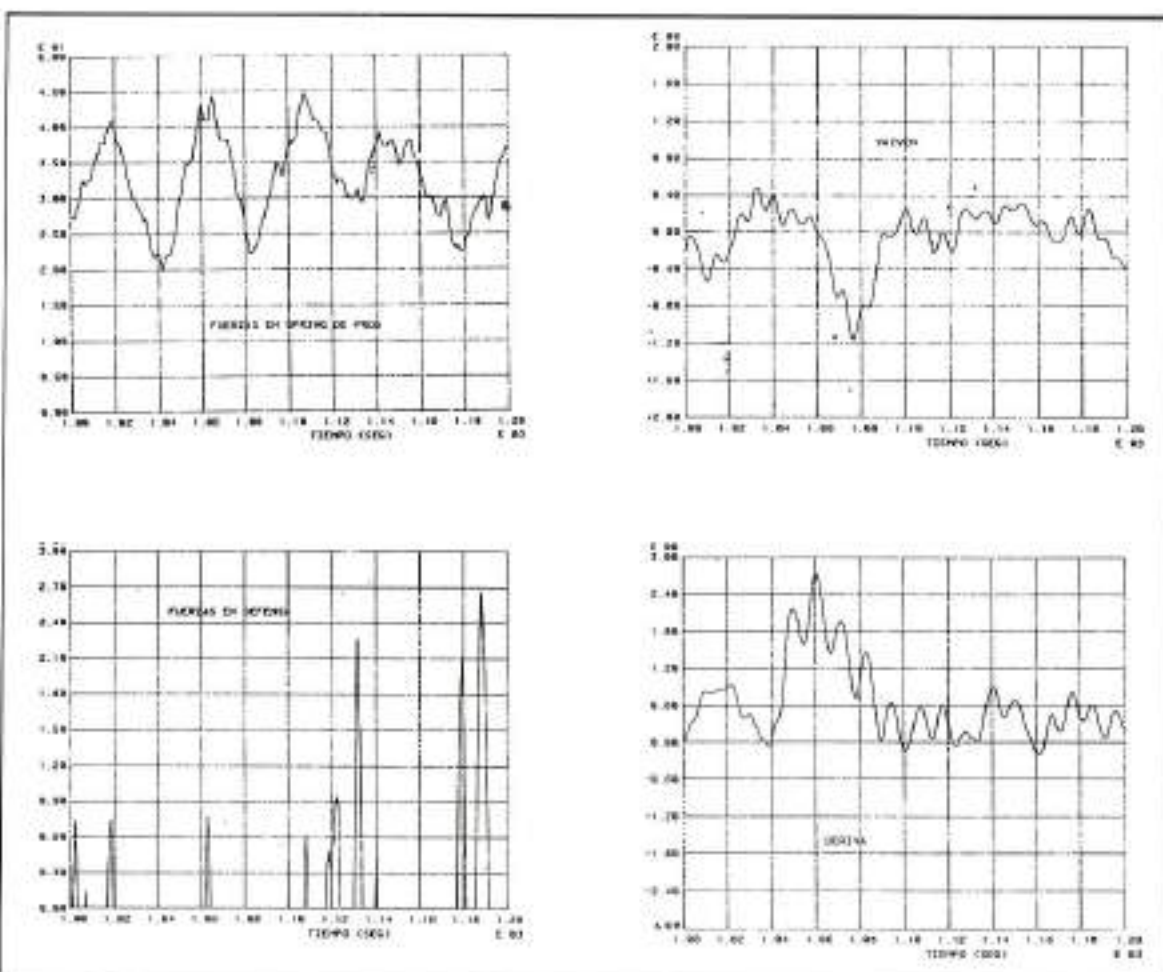


FIGURA 11. Registros de movimientos y fuerzas en el buque atracado.

Es de señalar la diferencia existente entre los movimientos que dependen de las características geométricas del buque y de su condición de carga —alceada, cabeceo y balance— y los determinados por el sistema de amarre —vaivén, deriva y guiñada—. Los primeros se ven muy poco afectados por el número, rigidez o longitud de las amarras, y a la vez tienen una importancia secundaria en la aparición de problemas en la carga y descarga. Por el contrario, los movimientos en el plano dan lugar a dificultades en las tareas de puerto, posible rotura de amarras y desperfectos en las defensas.

Pero es posible mejorar fuertemente la situación del atraque, a un coste bajo, actuando sobre las amarras y defensas. El cambio de traveses por springs, el refuerzo de determinadas líneas o el aumento de la pretensión de las amarras pueden producir beneficios sorprendentes. Todo depende del conocimiento de las solicitaciones que actúan sobre el barco, según la posición de atraque, y de los factores que determinan la respuesta de éste.

Así, en el caso del Puerto de Escombreras (Ref. 10), en Cartagena, se consiguieron reducciones del orden del 55 % en el vaivén y 25 % en la deriva de un buque metanero de 184 m de eslora atracado en una terminal con duques de alba. Para ello, se ensayaron cinco disposiciones de amarre diferentes, partiendo del sistema habitual utilizado por el barco. Este consistía en 2 largos a proa y popa, de poliamida de 62 mm, 2 traveses a proa y 1 spring a popa, también en poliamida, más 3 traveses a popa y 2 springs a proa, con calabrotes de alambre de 32 mm y poliamida. Como vemos en la figura 12, un sistema con una alta asimetría, tanto de materiales como de geometría.

A lo largo de los ensayos se fueron cambiando el número y orientación de las líneas, en busca de la simetría que diera lugar a un comportamiento más lineal del barco, y redujera por tanto el acoplamiento entre los diferentes movimientos. En la configuración 2 se utilizaron 2 largos y 2 traveses, eliminándose el spring de proa, pasando en la configuración 3 a abrir el ángulo del través de popa. Posteriormente, se incrementó la longitud del largo de proa, con el objetivo de igualar las restricciones transversal y longitudinal. Por último, el través de proa cambió su ángulo, orientándose más a proa, en la configuración final.

De este modo, fueron rebajándose las amplitudes de vaivén y deriva, hasta reducirlas en un 55 % y 25 % respectivamente, tras dar un incremento a la pretensión de 3 a 6 t en la configuración 6. Los esfuerzos en amarras y defensas se mantuvieron siempre muy por debajo de los valo-

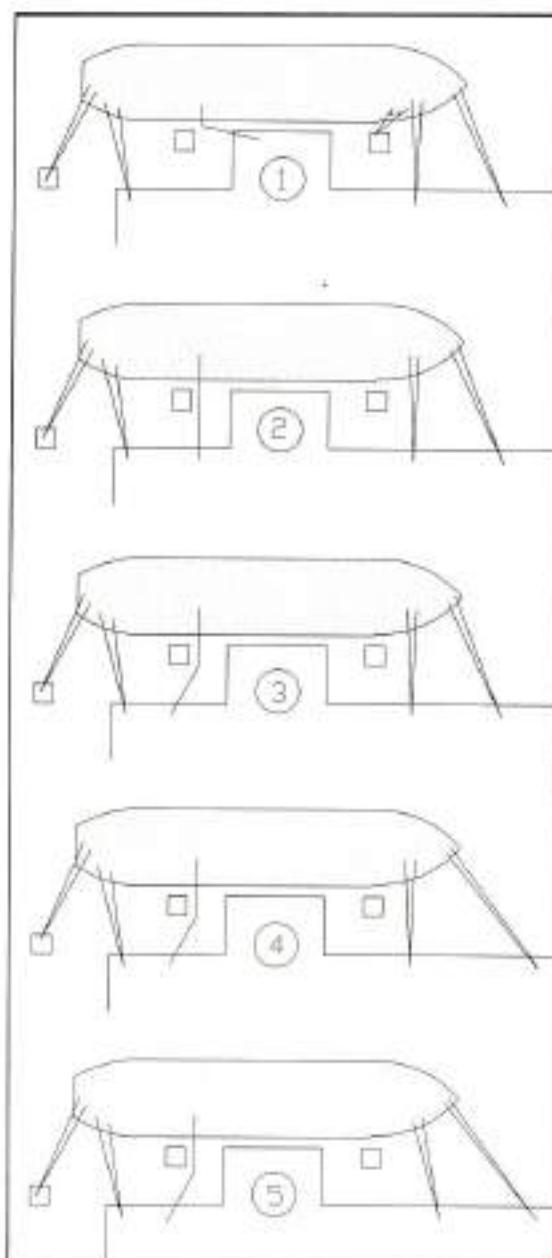


FIGURA 12. Disposiciones de amarre utilizadas en Escombreras.

res admisibles, quedando finalmente en el 56 % de la carga de rotura para las amarras y el 45 % para las defensas.

Estos fueron los resultados de las diversas configuraciones, recogiendo los valores máximos cada 1.000 movimientos para una altura de ola significativa de 2,60 m.

Se comprueba repetidamente a lo largo de los ensayos que el grado de pretensión de las amarras

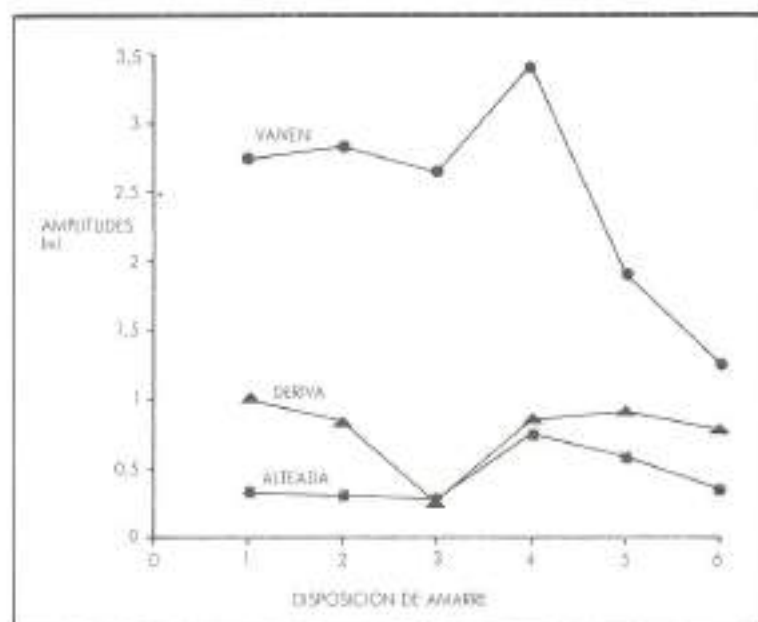


FIGURA 13. Resultados del ensayo de Escriberras.

CONFIGURACION	1	2	3	4	5	6
Amarres (t)	9,08	11,14	12,92	9,22	6,16	11,00
Defensas (t)	72,8	43,6	—	46,5	66,7	44,2
Alteada (m)	0,33	0,31	0,28	0,75	0,58	0,34
Vaivén (m)	2,74	2,83	2,65	3,41	1,90	1,25
Deriva (m)	1,00	0,84	0,25	0,85	0,91	0,77

es un factor de gran importancia en el comportamiento del buque atracado. En Bilbao (Ref. 6) se llevaron a cabo ensayos de este tipo variando la situación de un carguero de 150 m de eslora, desde tener las amarras en banda hasta una pretensión reducida, de sólo 2,5 t por línea. Los períodos propios de vaivén, deriva y guiñada se vieron muy afectados, bajando de 90, 160 y 140 seg. a 55, 50 y 50 con las amarras en tensión. El efecto sobre el buque fue inmediato: Sometido a un oleaje de $T_p = 12$ seg. y 2,5 m de altura, se obtuvieron valores significantes de 1,50 m de vaivén, 0,58 m de deriva y 0,69 grados de guiñada en el primer caso, bajando a 0,85 m, 0,50 m y 0,50 grados al aplicar la pretensión. Las mejoras son del 45, 10, y 30 %, respectivamente.

El efecto es aún más acusado al aplicar ondas largas. En el mismo ensayo se excitó al barco con ondas regulares de 245 seg. y pequeña altura (25 cm), evaluando la amplificación en cada movimiento. La relación entre el vaivén y la altura de

ola pasó de 2,00 a 1,43 (30 % de mejora); el coeficiente de deriva, de 0,86 a 0,31 (reducción del 55 %) y la amplificación de guiñada bajó de 4,99 a 1,76 (reducción del 65 %). En la figura 14 pueden verse los registros de movimientos en ambos casos.

Así pues, una adecuada pretensión, combinada con una disposición de amarre orientada a cada caso particular, puede producir importantes mejoras en el comportamiento del buque atracado. Además, se asegura que los esfuerzos en amarras y defensas queden dentro de rangos admisibles.

CONCLUSION

El ciclo se cierra cuando se enlazan los estudios de oleaje iniciales con los ensayos de propagación y agitación, y éstos con el análisis del comportamiento de los buques atracados. Una vez conocidas las frecuencias de presentación de los distintos temporales, las probabilidades de excedencia de cada altura de ola, las condiciones de agitación a las que dan lugar en las diferentes dársenas y la respuesta del buque atracado, se tiene una información global e integrada del comportamiento del puerto en su conjunto.

En este momento, pueden darse orientaciones fundadas sobre las condiciones de explotación de las terminales o los muelles, construidas sobre criterios de seguridad o de economía.

En todo este proceso, se han ido enlazando estudios de campo, teorías y modelos de propagación de oleaje y ensayos en modelo físico, tanto de agi-

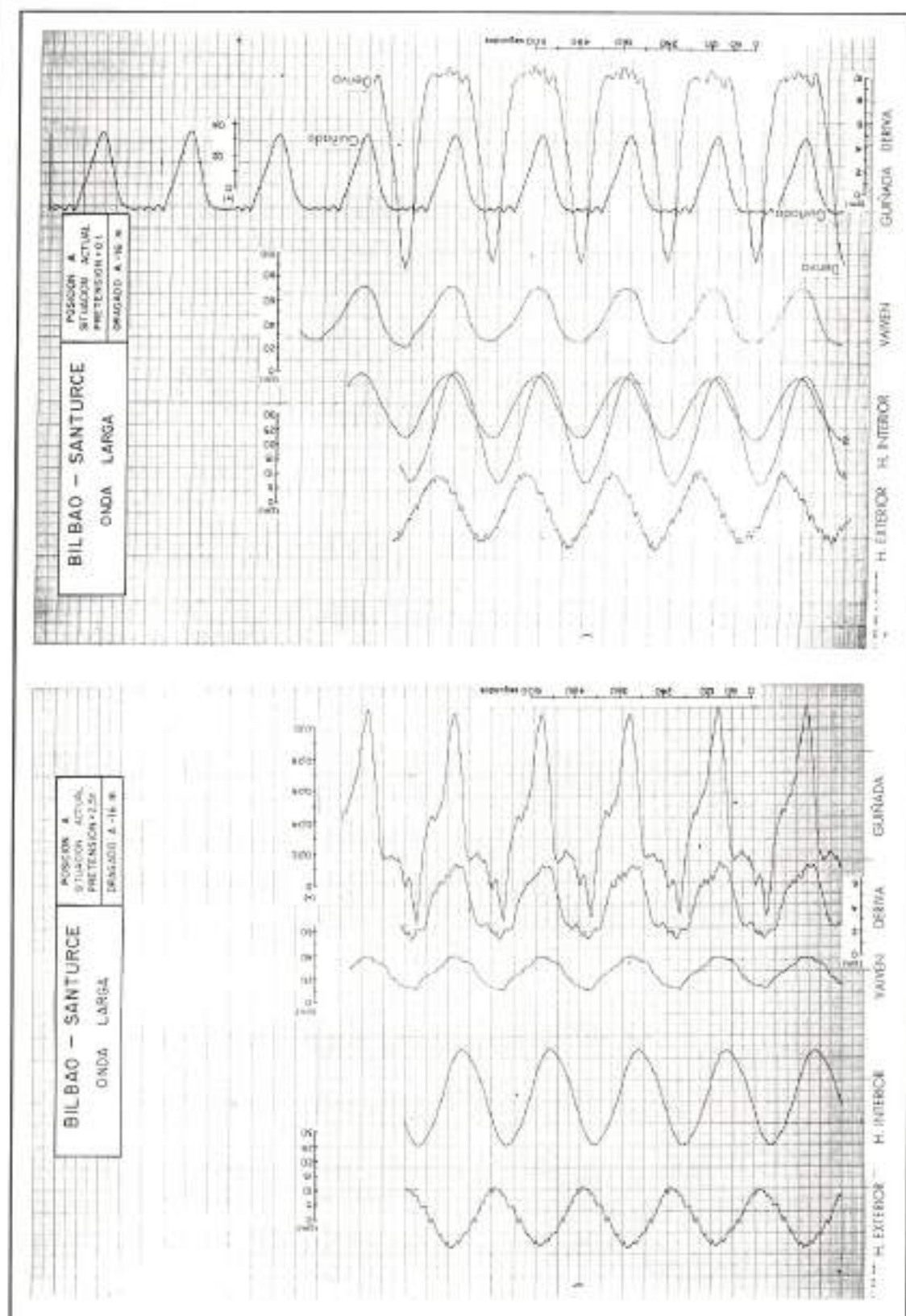


FIGURA 14. Inmóviles de bisques con onda larga. Bilbao.

tación como de comportamiento de buques atracados. Y es a través de estos últimos como se consigue conocer de forma fiable el comportamiento del puerto y de los barcos atracados en sus dársenas. Queda pues demostrada su utilidad e interés en el análisis de las instalaciones portuarias. Por ello, los ingenieros involucrados en este tipo de trabajos están obligados a desarrollar técnicas de ensayo más eficaces y económicas y métodos de estudio de mayor precisión.

REFERENCIAS

1. «Ampliación del Puerto de Valencia. Informe de Clima Marítimo.» CEPYC. Abril 1987.
2. «Ampliación del Puerto de Valencia. Ensayos de agitación.» CEPYC. Enero 1988.
3. «Correct reproduction of group-induced long waves.» Ottesen-Hansen, Sand, Lundgren, Sørensen, Gravesen.

17 Coastal Engineering Conference. Sidney, marzo 1980.

4. «Ampliación de la Dársena Sur del Puerto Exterior de La Luz y Las Pulmas. Ensayos de agitación.» CEPYC. Marzo 1988.

5. «Obras Marítimas. Oleaje y Diques.» Ramón Iribarren Cavanilles. Madrid, 1954.

6. «Estudio de las Dársenas de Santurce (Bilbao).» CEPYC. Febrero 1988.

7. «Elastic characteristics of mooring lines.» Wilson. NATO Lisboa 1965.

8. «Ampliación del Puerto de Valencia. Ensayos de Comportamiento de Buques atracados.» CEPYC. Marzo 1988.

9. «Research Investigation for the Improvement of ship mooring methods.» BSRA. Report 179. Wallsend 1967.

10. «Ensayos sobre el comportamiento de un buque tipo atracado en el Nuevo Muelle de Graneles de la Dársena de Escombreras. (Puerto de Cartagena.)» CEPYC. Agosto 1987.



LOS LLANOS DE JEREZ. 10 y 12. Pol. Industrial de Coslada - COSLADA (Madrid) ☎ 671 31 08 - 671 53 00

GEOTECNIA Y CIMENTOS, S. A.

OBRAS Y ESTUDIOS

Obras

- Cimentaciones especiales
- Estabilizaciones - Jet Grouting
- Pantallas continuas

Estudios y reconocimientos

- Geológicas-Geofísicas
- Geotécnicas
- Mineros
- Hidrogeológicas

LABORATORIO

- Ensayos de materiales
- Tecnología Físico-química
- Control radiológico-ambiental
- Auscultación e inventarios de carreteras
- Auscultación de obras civiles
- Entidades colaboradoras de la Administración

CONTROL DE CALIDAD

PILOTES

PREFABRICADOS - CONTROL TOTAL
SISTEMA INTEGRADO

PANTALLA
CONTINUA

PILOTES
A ROTACION



TERRATEST

Acreditados en toda España. Miles de pilotes instalados en obras de viviendas, obras públicas, industriales, etc. Nuestros pilotes tienen una calidad constante y uniforme, gracias al control de fabricación en factoría fija. Sección cuadrada de 235, 270 y 300 mm. de lado, con hormigón de 450 kg/cm² y acero 6.000. Empalmables hasta la longitud necesaria con nuestra junta ABB patentada.

Un método actual, rápido, limpio y eficaz para una cimentación de confianza y seguridad. Capacidad de carga controlada en cada pilote con la medida de hinca. Resistencia a los sulfatos y al agua del mar.

Nuestros pilotes prefabricados TERRA, ofrecen, además, una comprobación perfecta con el analizador electrónico de hinca, que controla las aceleraciones y tensiones del pilote, la energía transferida, resistencia final, etc.

Asimismo, trabajos de pantalla continua y pilotes a rotación, con la misma calidad de servicio y experiencia.



Alcalá, 65, 4º dcha. 28014 Madrid. Tels. 593 16 87 - 593 06 70. Telex 43530 MONC



LA FUERZA FIRESTONE



ROCK GRIP SUPER GROUND GRIP SRG Deep Tread SUPER ROCK GRIP

En Neumáticos para Grandes Obras, FIRESTONE marca la pauta con su alta tecnología. Super-Neumáticos que por resistencia, por economía, por tracción y por mayor transmisión de potencia proporcionan la máxima rentabilidad en todo tipo de trabajos de construcción y obras públicas. Porque allí donde se mueve maquinaria, donde la dureza es el indicativo del trabajo... ¡Allí está la Fuerza Firestone!

Firestone
EN MARCHA