

INSTRUMENTACION DE OBRAS MARITIMAS EN PROTOTIPO (1)

JOSE R. AMOROS SERRET (*)

RESUMEN. En el presente artículo se resumen un conjunto de actuaciones llevadas a cabo en el diseño e instalación de un sistema de medidas en prototipo. Se describen las principales consideraciones en la elección de unas adecuadas características de los sensores y se incluyen elementos teóricos y de investigación de otros autores sobre la misma problemática.

ABSTRACT. *The present article summarises a series of activities carried out concerning the designing and installation of a system of measurements in prototype. There is a description of the main considerations regarding the selection of suitable characteristics for the sensors and theoretical elements are also included together with research into the same problem, carried out by other authors.*

0. INTRODUCCION

El presente trabajo tiene por objeto recoger la experiencia y parte de los planteamientos teóricos utilizados para el diseño de un moderno sistema de adquisición de datos de presiones en prototipo instalado en la Dársena de Los Llanos, en el Puerto de Santa Cruz de Tenerife.

El propósito de tal sistema, así como la de cualquier instalación capaz de obtener datos reales, es la de proporcionar una valiosa información sobre la evolución de la onda de presión que se desarrolla sobre el paramento de nuestras obras de abrigo y defensa, que permitirá tasar de una forma más acertada nuestros modelos teóricos y comprobar el rango de validez de nuestros ensayos de laboratorio.

1. ANTECEDENTES AL PRESENTE ESTUDIO

El conocimiento real de las sollicitaciones actuantes sobre los paramentos de obras de defensa, abrigo o ataque, se viene haciendo, en la actualidad, fundamentalmente a través de ensayos a escala que intentan reproducir el comportamiento real de la estructura en estudio. Dadas las peculiares características de los ensayos en modelo reducido, susceptibles de verse influenciados por diversos efectos colaterales no perfectamente conocidos en su totalidad, y la ausencia de correlaciones entre resultados calculados, resultados medidos en laboratorio y resultados medidos en el prototipo, obliga a la

realización de medidas en naturaleza de las que obtener una provechosa información.

En estos casos la ausencia general de información al respecto se puede explicar porque la estructura que se ensaya no se ha construido todavía, y en estas etapas el estudio en modelo tiene por objeto perfilar y mejorar el diseño de ingeniería, o bien por el coste y complejidad adicionales que supondría el mantener un equipo de medida permanente en prototipo (aunque su utilidad es evidente).

Por otra parte el actual proceso de diseño de este tipo de obras se fundamenta en descripciones maximales de los fenómenos actuantes, basadas en envolventes simples de esfuerzos máximos originados. Este tipo de descripciones aparece bastante desligada del fenómeno físico que es el oleaje generador y sus características (altura, período, agrupamientos presentes, incidencia del oleaje y tipo de rotura sobre el paramento).

Tampoco existen indicaciones elaboradas que permitan asumir en las etapas de diseño de una obra un riesgo (o un coeficiente de seguridad) basado en el período de retorno de esas envolventes de esfuerzos máximos.

Por otro lado, las diversas simplificaciones que conllevan cada una de las diversas teorías existentes, hacen que su número crezca, aumentando la incertidumbre en su utilización, que se ve incrementada por la disparidad de los resultados obtenidos por su aplicación a casos determinados. En cuanto a las formas poligonales sencillas que se admiten como definición de las curvas envolventes de los esfuerzos pésimos, se suele ignorar bajo qué condiciones de sollicitación (teóricas o experimentales) se calcularon sus puntos de inflexión (vértices de polígono de esfuerzos), bajo qué condiciones de coeficiente de seguridad o período de retorno y, sobre todo, su sensibilidad al dimensionado de la obra (escalado) o su adaptabilidad a unas condiciones de oleaje conocidas.

(1) El contenido del presente artículo forma parte del trabajo realizado por el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX para la Dirección General de Puertos y Costas del MOPU bajo el título «Medida de presiones en prototipo» y número de clave CEDEX 21-433-9-086.

(*) Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEPYC, CEDEX.

2. DESCRIPCION TECNICA DEL EQUIPO

El conjunto de los sistemas componentes del equipo de medición de presiones instalado responde al objetivo perseguido de lograr una correcta y completa determinación de los esfuerzos actuantes sobre las estructuras de abrigo que presentan parámetros verticales a la acción del oleaje. El conocimiento de dichas sollicitaciones es un factor de trascendental importancia en el diseño y dimensionamiento óptimo de las obras, incidiendo positivamente en el coste global de las mismas.

El conjunto de instrumentos elegido para su colocación en el prototipo a estudiar responde a la necesidad planteada e incorpora los más actuales avances en materia de transductores de señal y teletransmisión de datos para lograr un conjunto robusto y resistente frente a la acción de los elementos, a la vez que susceptible de ser automatizado y controlado por miniordenador, asegurándose de esta manera una captura y almacenamiento continuo de la información adquirida a través de los sensores.

3. ELEMENTOS DEL EQUIPAMIENTO

3.1. CAPTADORES DE PRESION

Para la medida de las presiones ejercidas por las olas en su choque contra el espaldón, se ha escogido un conjunto de captadores de presión absoluta, de tecnología piezorresistiva, con rango de presiones hasta 300 psi. Es-

tos captadores de presión son herméticos y el material con el que se encuentran contruidos (acero inoxidable especial) garantiza su funcionamiento en condiciones ambientales adversas, a la vez que la particular disposición de la membrana asegura su hermeticidad y la eliminación de burbujas de aire que pudieran quedar ocultas.

El rango de temperatura para el cual está compensado el captador es de 27 °C a 80 °C y el cambio de la sensibilidad por efecto de la temperatura es de 0,02 % fso/F. Para evitar los cambios térmicos que pudieran sufrir los sensores a las distintas profundidades (originando errores transitorios), se realiza el ajuste de cero cuando el sensor se encuentra en contacto con el agua. Por otra parte el sellado final del sensor y de las juntas presentes en el sistema de evacuación de los cables de señal hasta la superficie previenen contra cambios bruscos de la temperatura del conjunto.

No obstante, a pesar de la estabilidad que se logra con el procedimiento de montaje anterior, los sensores presentan un rango de trabajo en temperaturas que oscila entre - 40 °C y 120 °C, margen ampliamente suficiente para las sollicitaciones a las que se va a ver sometido el conjunto del sistema después de su instalación.

Para su instalación definitiva cada uno de los sensores (de diafragma tipo flush) se rosca a una chapa de acero inoxidable de tal forma que el diafragma queda

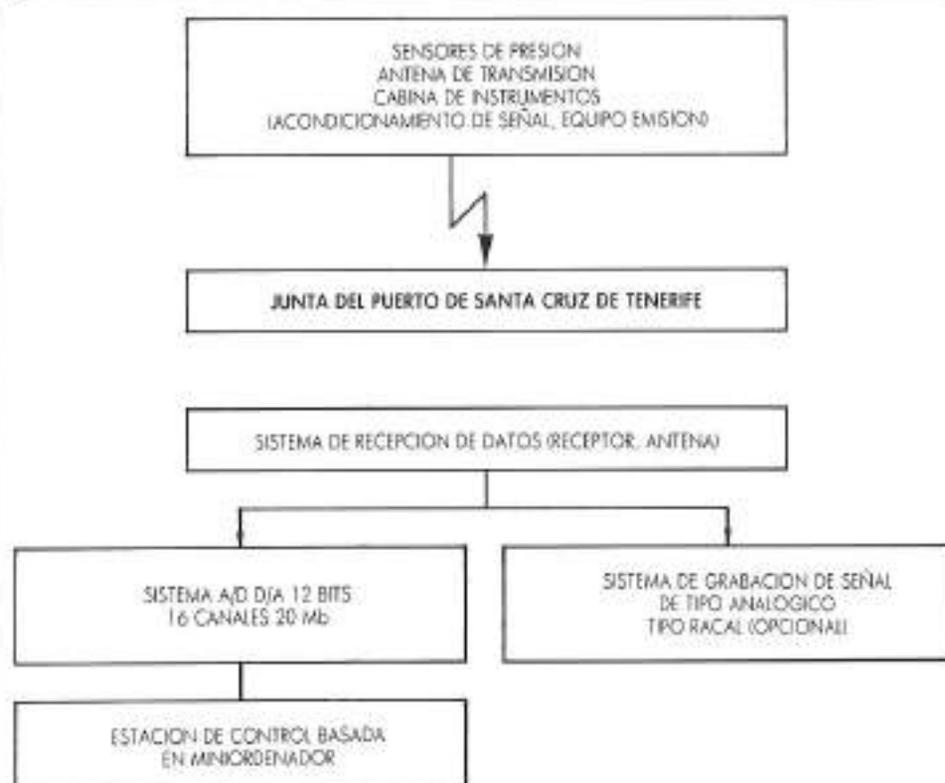


FIGURA 1. Esquema de la disposición física del sistema.

perfectamente enrasado con la chapa y dispuesto para ser introducido en los receptáculos del paramento del dique, fijándose después por medio de taladros que aseguran la chapa contra la superficie vertical del paramento.

Como características técnicas definitivas de las capacidades del sensor citaremos las siguientes:

- Rango de medida: 0-300 psi.
- Sobrerango: 1.000 psi.
- Sumergible y hermético. Resistente a la acción del agua.
- Montaje de tipo diafragma flush.
- Sensibilidad: 100 mV.
- Presión absoluta. Sumergible hasta 50 pies.
- Rango de temperatura: -40 °C a 120 °C.
- Desviación térmica: 0,02 % fso/F.

3.2. ACONDICIONADORES DE SEÑAL

Para la alimentación y amplificación de la señal procedente de los transductores se ha elegido un acondicionador de c.c. específicamente diseñado para este cometido.

Este amplificador de alta ganancia amplifica señales procedentes de captadores extensométricos (piezorre-

sistivos), proporcionando la alimentación del puente con protección de sobreintensidad.

En la parte frontal del acondicionador se encuentran todos los mandos de ajuste fino y grueso, amplificación, calibración y polaridad. Una particularidad de este acondicionador es su salida programable (puede programarse la salida entre 0 y 10 voltios para cualquier rango de presión, aceleración u otra magnitud).

Las principales características técnicas son:

- Ganancia ajustable desde 10 a 10.000.
- Tensión de alimentación al captador de 2,5 a 10 V c.c. ajustable.
- Salida de 0 a 10 V programable.
- Linealidad de 0,1 % fs.
- Banda pasante de 0 a 5.000 Hz.
- Rango de temperatura de 0 a 50 °C.

3.3. TELEMETRIA. SISTEMA DE TRANSMISION DE DATOS

El sistema de telemetría tiene por objeto la transmisión de los datos recogidos por los sensores en forma PCM a la unidad receptora que se encuentra en el edificio de la Junta del Puerto.

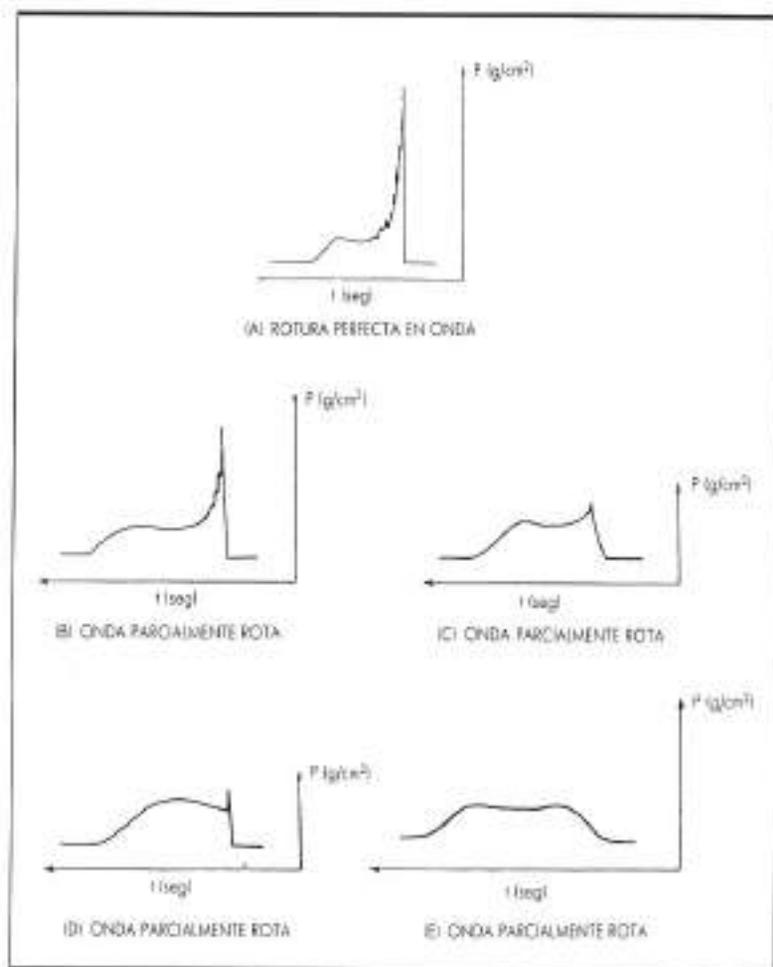
FIGURA 2. Curvas presión-tiempo para oleaje con roturas parciales. Aunque el oleaje parcialmente roto incluye un amplio rango de olas rompientes, entre la rotura perfecta y el clapotis, estas curvas de presión-tiempo para olas parcialmente rotas pueden ser divididas en cuatro categorías, tal como se muestra en los figuras.

La figura (A) muestra la forma típica de una curva presión-tiempo para una ola parcialmente rota presentando una gran similitud con una ola en rotura perfecta. El pico de presión en esta curva es claramente inferior al de la primera y, en general, la duración de este evento viene a ser de 1/100 a 1/120 seg. Una situación menos severa que la anterior se observa en la figura (B) que manifiesta un aplazamiento sensible del pico máximo.

La figura (C) muestra como al mismo una curva de respuesta presión-tiempo correspondiente al choque entre una onda de largo período y pequeña pendiente contra una pared vertical. El primer máximo corresponde al choque contra la pared, el segundo se produce por la evolución de una gran parte de la masa de agua contra la pared, al no considerarse rizado a lo largo del muro (sin embargo, este segundo pico muestra valores superiores al mero nivel de presión estática del agua en ese punto).

En la figura (D) se recoge el choque de una onda con características que asemejan su choque contra una pared vertical al clapotis, con una profundidad o pie de dique notablemente superior a su altura. El primer pico de la curva se debe a una presión dinámica horizontal ejercida por el impacto de la ola, y el segundo debido a presiones dinámicas verticales originadas después del choque.

De NAGAI, «Shock pressures exerted by breaking waves at breakwaters», 1960.



La unidad emisora se encuentra alojada a pie de dique en una cabina específicamente pensada para el alojamiento de los sistemas de acondicionamiento y transmisión de señal, cerca de la cual se ha dispuesto la correspondiente antena de emisión de señal.

El sistema se considera compuesto por los siguientes elementos:

EMISOR:

- Tarjeta multiplexora A/D para la adquisición de datos.
- Microprocesador y módem.
- Tarjeta de fonía y mantenimiento.
- Equipo de radio.
- Convertidores y filtro de red.
- Antena directiva.

RECEPTOR:

- Antena receptora.
- Circulador de ferrita.
- Módem.
- Unidad de conmutación y fonía.
- Equipo de radio.
- Microprocesador de control.
- Salida RS-232 C.

5. PREPARACION DE LOS ENSAYOS

5.1. DEFINICION DE LOS PARAMETROS ASOCIADOS AL PROCESO DE RECONSTRUCCION DE LA ONDA DE PRESION

El programa de control del sistema de toma de datos en prototipo se aloja dentro de una unidad microcomputadora del tipo PC compatible, estructurándose el flujo de información alrededor de unos parámetros seleccionados, capaces de resumir la enorme cantidad de información generada por los sensores de una forma lo más segura y fiable.

El sistema se estructura alrededor de tres programas principales:

- A. Programa de configuración.
- B. Programa de almacenamiento de resultados.
- C. Programa de impresión de resultados.

El programa de configuración de las tomas de datos se encarga de fijar las características de umbral en cada uno de los sensores (situados a profundidades diferentes), a la vez que define el tipo de sensor situado a cada profundidad con sus correspondientes valores de calibración (en este estudio sólo se permite el empleo de sensores de presión o acelerómetros).

Se pueden realizar indefinidas configuraciones del sistema, que tienen por objeto precisar los resultados que interesan en cada análisis (normalmente máximos de presión, para poder definir curvas envolventes máximas, o bien correlacionar resultados de presión a cada profundidad con los valores de altura de ola que se registran en una boya próxima a la instalación).

Las variables utilizadas por el programa tienen las siguientes definiciones:

INTERVALO DE TOMA: Tiempo total de la toma de datos incluyendo su análisis.

NUMERO DE INTERVALOS DE TOMA: Número de intervalos de medición que se realizan con antelación a la grabación en disco.

CADENCIA MAXIMA: A efectos de previsión de overflow de memoria debe especificarse el número máximo de picos de presión esperados.

ALTURAS MINIMAS: Mínima altura para considerar la onda de presión como fenómeno físico. Evita la consideración de espúreos.

ALTURA UMBRAL: Acciona automáticamente el proceso de la toma de datos cuando se supera uno cualquiera de los umbrales definidos para cada uno de los canales.

En el caso del programa de almacenamiento de resultados y procesado de datos, se contienen para cada uno de los canales las siguientes variables:

FECHA.

HORA: Tiempo de inicio de la toma de datos. Los restantes tiempos constituyen un offset a estos valores.

NUMERO DE MAXIMOS RECOGIDO/NUMERO DE MINIMOS RECOGIDO: Variables que recogen el número de máximos o mínimos de la onda (de presión o de aceleración) recogidos en el análisis.

MAXIMO: Valor del máximo recogido.

MINIMO: Valor del mínimo recogido.

TMAXIM: Tiempo relativo de ocurrencia del máximo medido (en segundos a partir del inicio).

TMINIM: Tiempo relativo de ocurrencia del mínimo medido (en segundos a partir del inicio).

AMPLITUD PICO-PUNTA: Distancia cresta-valle en la onda recogida.

PERIODO: Período medido para la onda.

VALORES RESUMEN: Constituyen un resumen de los datos de cada registro. Fundamentalmente corresponden a las siguientes variables:

MAXIMO: Valor máximo maximorum para el registro dado.

MINIMO: Valor mínimo minimorum para el registro dado.

TMAX: Valor relativo al origen ya referenciado de la ocurrencia del valor máximo maximorum.

5.2. REALIZACION DE ENSAYOS EN LABORATORIO

Dado que las fuerzas que intervienen de forma predominante en el fenómeno en estudio son las de inercia y las de gravedad, el tipo de semejanza apropiado para la realización de ensayos en laboratorio es el basado en la semejanza de Froude que mantiene constante la relación entre aquellas fuerzas. A partir de aquí y con una escala de modelo lo mayor posible, resultan las siguientes relaciones ligando magnitudes entre prototipo y modelo:

Longitudes: $L = L \cdot 1/E$

Tiempos: $T = T \cdot (1/E)^{1/2}$

Fuerzas: $F = F \cdot (1/E)^3$

Momentos: $M = M \cdot (1/E)^4$

Presiones: $P = P \cdot 1/E$

Los ensayos se suelen realizar en un tanque de oleaje complejo de 6,50 m de anchura, dotado de una paleta traslacional generadora de oleaje, accionada hidráulicamente mediante una servoválvula cuyo control se efectúa por procedimientos electrónicos. En el interior del tanque se suele disponer un canal de anchura dependiente de la escala del modelo, cuyo eje coincide con el del tanque, y que contiene a dicho modelo.

Los pasos laterales que quedan entre los lados suelen finalizarse con una rampa absorbidora de energía que limita la ocurrencia de reflexiones y la energía radiada al modelo, manteniéndose así las situaciones de control espectral obtenidas durante la fase de calibración. La profundidad de agua a pie de paleta debe garantizar una correcta generación del oleaje, alcanzándose la profundidad de ensayo a pie de sección mediante una rampa de pendiente suave.

El sistema de medida de presiones en laboratorio suele estar constituido por:

- Un dinamómetro y su correspondiente acondicionador de señal para la medida de fuerzas (horizontales y verticales) y de momentos en un plano. La medida suele hacerse mediante bandas extensométricas, formando un conjunto cilíndrico que contiene tres puentes completos.
- Un conjunto de captadores de presión miniatura, de membrana exterior tipo flush para evitar deformaciones en los valores medidos por la presencia de burbujas de aire ocultas.

Un registro de la señal recibida en forma analógica por cada uno de los sensores puede llevarse a cabo de forma paralela, permitiéndose así una inspección visual de resultados y la selección no automática de las curvas pésimas de estados del mar.

Sobre los datos registrados se realiza a posteriori un estudio de máximos, para la determinación de los máximos esfuerzos y las envolventes de presiones máximas sobre el paramento.

Las leyes envolventes de presiones máximas se realizan tomando para cada punto el valor mayor de las presiones leídas bajo el oleaje de ensayo, independientemente del tipo de oleaje, de la altura de ola significativa y del tipo de rotura sobre el paramento. El resultado así obtenido es, pues, una ley de presiones excesivamente conservadora, puesto que en ella se ha recogido la acción de olas muy diversas. Considerando que cada forma de rotura de la ola sobre la estructura induce una ley de presiones característica, la envolvente de presiones máximas viene a constituir un caso irreal, al resultar ser una combinación de acciones que no pueden darse simultáneamente.

De aquí un criterio más realista sería la consideración de la ley de presiones sobre el paramento correspondiente al caso pésimo de todos los ensayos (en

tanto se garantice que el abanico de estados del mar barridos ha sido lo suficientemente amplio). En este estado de cosas conviene señalar asimismo que los ensayos en laboratorio obvian la distribución de presiones en la zona de apoyo de los cajones (subpresiones y fuerzas de rozamiento), al considerar un modelo que no llega a apoyar sobre la capa de base.

5.3. DIFERENCIAS OBSERVADAS ENTRE EL ANALISIS EFECTUADO EN PROTOTIPO Y EL OBTENIDO EN MODELO REDUCIDO

Determinada la evolución de las presiones sobre el paramento de un espaldón, y caracterizados esos valores mediante una función envolvente de las presiones encontradas, podemos derivar los esfuerzos actuantes sobre la estructura mediante la simple integración de las leyes de presiones recogidas. En los ensayos de laboratorio se llega a observar una discrepancia de resultados entre los esfuerzos calculados mediante integración y los determinados por el procedimiento directo de medida dinamométrica. Las causas de este comportamiento pueden ser establecidas como sigue:

- A.** El desfase temporal de los momentos reales de presentación de las máximas presiones actuantes sobre cada uno de los sensores (debido a la forma particular de la estructura en estudio y a la forma de análisis de los datos procedentes de los captadores de señal hacia el sistema de conversión A/D, pudiendo presentar retrasos significativos por multiplexión del conversor entre canales, o bien ausencia de mecanismos de Sample/Hold para cada uno de los canales).
- B.** La ocurrencia de presiones dinámicas, de tiempo de actuación extremadamente corto, que producen una pequeña variación en el incremento de la cantidad de movimiento del sistema.
- C.** La observación en el inicio de los impactos de presiones elevadas que se concentran en el tercio central del paramento, produciéndose acto seguido un reparto con mayor uniformidad de las presiones medidas, a la vez que una deceleración muy marcada en su evolución, justificable por el paso de presiones de características dinámicas a presiones de tipo semiestático.

6. CARACTERIZACION DE LA ENERGIA TRANSMITIDA DURANTE EL CHOQUE DE LA OLA CONTRA EL PARAMENTO

La energía transmitida a la estructura durante el proceso de choque de la ola puede ser caracterizada de forma estadística o bien acudiendo a pequeños modelos que, asumiendo ciertas hipótesis simplificadoras, demuestren un acuerdo correcto con los datos de campo que se obtengan.

Los efectos del choque de la ola contra la estructura son, como ya se ha dicho, fuertemente dependientes del tipo de rotura observada contra el paramento. Así se pueden distinguir:

1. Choque ventilado.

2. Choque en compresión.
3. Choque de tipo golpe de martillo.

De ellos los más preocupantes son los producidos como golpe de martillo. Sabemos que cuando las olas rompen contra el muro se obtienen unas presiones de muy corta duración (conocidas como gifies en la terminología francesa), seguidas de presiones secundarias de intensidad menor y más larga duración (que reciben la denominación de bourrage), de un orden de magnitud semejante a la presión del clapotis.

La importancia de la presión de choque aumenta cuando el espesor del colchón de aire aprisionado disminuye, teniéndose muy pocos datos en la actualidad que permitan formarse una idea clara del tamaño, posición exacta y evolución de esta bolsa de aire ocluida entre el muro y la cresta de la ola de desplome, así como de los movimientos y oscilaciones engendradas en el muro.

Un modelo de distribución energética de tipo random asume que la distribución del contenido principal de la energía debido al choque, se encuentra dentro de un rango de frecuencias que presenta un perfil específico en términos de densidad espectral de potencia (*PSD*). La distribución estadística de las amplitudes de presión instantáneas en el dominio del tiempo es, en este tipo de modelización, de tipo gaussiano.

El nivel eficaz promedio de la señal recogida se llega a definir como el valor cuadrático del área limitada por la curva definida por la función *PSD*(*f*) de la forma:

$$a_{rms} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} PSD(f) df} \quad (g_{rms})$$

El nivel instantáneo máximo de la señal viene determinado por el valor máximo admitido para la relación:

$$\text{valor pico/valor eficaz}$$

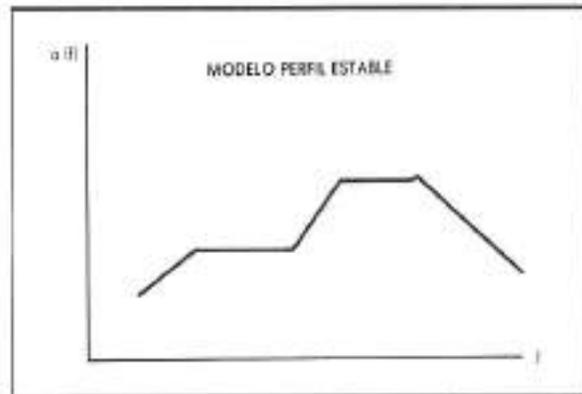
o bien por la desviación máxima admítida en la amplitud instantánea, según la distribución estadística gaussiana de amplitudes que mencionábamos, respecto al valor medio o eficaz.

Entre los tipos de modelos asociados a las características aleatorias del fenómeno se pueden escoger:

A. MODELOS DE PERFIL ESTABLE. Siguen una curva como la dibujada, constituyendo una acción mantenida y estabilizada a lo largo del tiempo.

B. MODELOS DE LOS NIVELES CONCATENADOS. La concatenación de niveles (curvas representando el mismo perfil energético, pero con distinto contenido de energía), representan una situación de impacto con aumento progresivo del valor eficaz promedio, manteniendo proporcional la misma función de densidad espectral de potencia (*PSD*).

La concatenación de perfiles en el modelo es una situación que se considera cuando el impacto genera distribuciones de energía con valores eficaces promedio si-



milares, pero funciones de densidad espectral de potencia diferentes.

C. MODELIZACION PSEUDORANDOM. Los modelos de distribución energética de tipo pseudorandom aplican la distribución de una determinada cantidad de la energía del impacto entre un número limitado de frecuencias discretas de la forma:

$$a(t) = \sum_0^n a_i \text{sen } 2\pi (f_i + \Delta f) t$$

$$f_1 \leq f_i \leq f_2$$

$$n = 100, 200, 400, 800$$

$$\Delta f = \frac{f_2 - f_1}{n}$$

En esta modelización cabe la posibilidad de obviar en exceso la consideración de determinadas frecuencias, llegando a no excitar frecuencias que podrían ser propias de la estructura, dejando por ello sin consideración los efectos resonantes, que pueden ser importantes en la formación de fisuras y agrietamientos en los cajones.

D. MODELOS SENO SOBRE RANDOM. La elección de modelos de tipo seno sobre random rango de frecuencias con una componente importante concentrada sobre una sola frecuencia (modelo mixto) de la forma:

$$a(f) = a_0(f_0) + PSD(f)$$

A partir de aquí podríamos realizar una definición más compleja de los fenómenos actuantes a través de modelos más evolucionados como:

- Random limitado en la banda sobre random.
- Tonos relacionados armónicamente sobre random.

La modelización del fenómeno del choque propio contra la estructura debería considerar los siguientes parámetros definitorios:

- A. Tipo de choque.
- B. Aceleración pico.

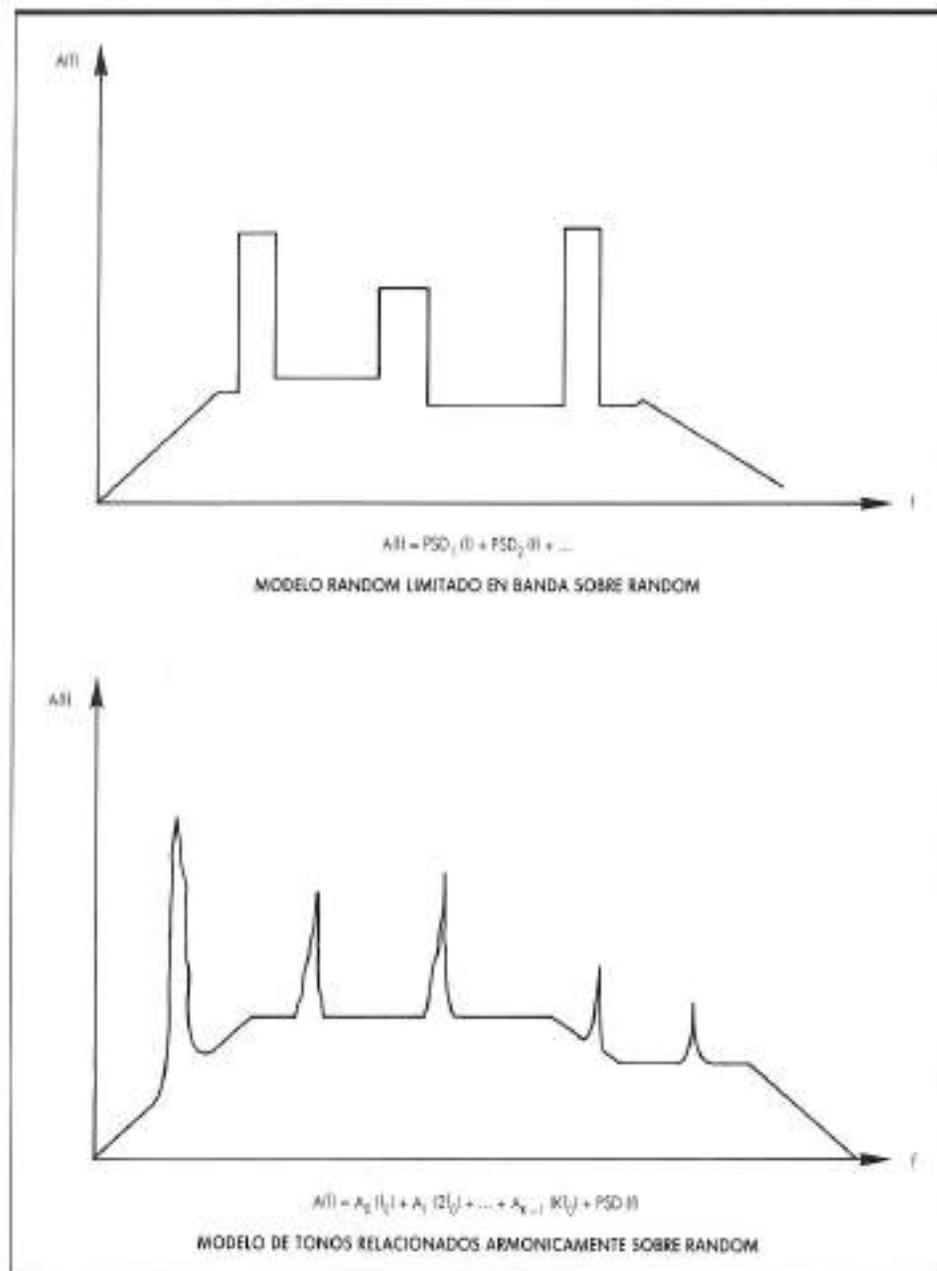


FIGURA 3. Modelización de la distribución energética en el impacto de una ola sobre una estructura.

- C. Duración del pulso.
- D. Nivel de pre y post-aceleración (en porcentaje).
- E. Cadencia (choques observados por unidad de tiempo).
- F. Banda pasante (distribución de la energía en frecuencia).

7. CONCLUSIONES

La realización del presente estudio ha puesto de manifiesto las posibilidades que se derivan de un conocimiento correcto de las hipótesis de diseño de las obras portuarias de abrigo y defensa. En estos casos el proyectis-

ta se ve forzado a recurrir a la formulación teórica, previamente establecida, o bien a la simulación numérica de los fenómenos dinámicos que van a ser determinantes de las características que va a tener la obra proyectada y de la respuesta que va a presentar ésta a lo largo de su vida operativa.

Para solventar las múltiples incertidumbres que un diseño puede presentar, o para establecer un conocimiento más cercano a la fenomenología realmente interviniente en el proceso resistente de la estructura, el ingeniero cuenta con otra herramienta, aparte las ya citadas de formulación numérica y modelo matemático,

que es la experimentación en modelo reducido de la obra considerada.

No vamos a hacer mención de las incertidumbres que presenta el diseño a partir de leyes envolventes de esfuerzos u otras formulaciones (por necesidad, muy simples), que proporcionan caminos de diseño que garantizan la seguridad, si bien el método utilizado no asegura un determinado coeficiente, ni tampoco una correlación con el período de retorno de los temporales máximos, ni con las características estadísticas del oleaje incidente.

Este conjunto de incertidumbres puede ser en parte obviado por la experimentación en un modelo físico, si bien aquí el problema resulta de la falta de correlación entre los resultados medidos para cada una de las condiciones de estudio y el comportamiento real, en cada uno de los momentos, de la estructura. A pesar de todo ello este método es el que proporciona una mayor sensibilidad a los parámetros de diseño versus características del oleaje, presentando su utilidad máxima en las fases de diseño de la obra, puesto que permite focalizar la atención en puntos característicos de la estructura y seguir la evolución del fenómeno dinámico en esos puntos, para las distintas condiciones de oleaje ensayadas.

Esto nos evidencia la necesidad de contar con datos de campo que refuercen las teorías desarrolladas por los investigadores, que constituyan datos de entrada válidos para fijar las condiciones de borde de las simulacio-

nes dinámicas, y que, finalmente, sirvan para garantizar el adecuado comportamiento de la ley de semejanza empleada en los ensayos de laboratorio.

Una modelización en el sentido de Froude predice un incremento lineal en las presiones observadas, creciente con el parámetro de longitud virtual l . También, dentro de la consideración del fenómeno de impacto como un evento puramente elástico, el fenómeno admite una simulación usando una ley de semejanza de tipo Mach, según la cual la presión variará según la raíz cuadrada de la escala de longitudes.

En todo caso la ley de Froude es la más conservativa de entre estas dos y, consecuentemente, suele ser la única aplicada en la experimentación.

8. BIBLIOGRAFIA

- FUHRBOTER, H. (1986). Model and prototype tests for wave impact Coastal Eng. Elsevier 10, pp. 49-84.
- ITSUYASU, H. (1966). Shock pressure of breaking wave. Proc. 10th. Int. Coast. Eng. Conf. ASCE. Vol. 1.
- NAGAI, S. (1960). Shock pressures exerted by breaking waves on breakwaters. Journal Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. ASCE.
- ROSS, C. W. (1974). Shock pressure of breaking waves. Proc. Int. Coast. Eng. Conf.
- WEGGEL, HALL, y MAXWELL. (1970). Experimental study of breaking wave pressures. Offshore Technology Conference. OTC 1244.