

# Adquisición y tratamiento de datos para la caracterización de las acciones dinámicas en los disipadores de energía hidráulica

LUIS G. CASTILLO E. (\*)

JOSE DOLZ R. (\*\*)

JOSE POLO C. (\*\*\*)

**RESUMEN.** Las características de tridimensionalidad, turbulencia anisotrópica y no homogénea que se presentan en el flujo de los disipadores de energía hidráulica, no permiten un estudio analítico del problema, siendo por tanto la modelación hidráulica la herramienta fundamental para el estudio del campo de presiones en tales estructuras.

Las dificultades prácticas que conlleva el realizar este tipo de estudios, como son, entre otras, la detección, registro y análisis de las presiones, comprobación de la instrumentación y los efectos de escala, no han permitido un conocimiento adecuado del mismo.

En el presente trabajo se expone una solución a tales dificultades prácticas, a través de una Metodología Experimental y Numérica.

La Metodología Experimental nos permite obtener adecuadamente los registros de presiones en diferentes puntos de la estructura en estudio, y la Metodología Numérica nos permite una correcta adquisición y tratamiento del campo de presiones.

Este análisis se realiza tanto en el dominio del tiempo y de la frecuencia, presentando unos primeros resultados de la aplicación de esta metodología al caso del vertido libre en presas de bóveda.

**ABSTRACT.** *The characteristics of three-dimensionality, anisotropy and non homogeneity of turbulence, that are present in the flow of hydraulic energy dissipators prevent an analytical study of this problem. In this case hydraulic modelling is the fundamental tool for studying the pressure field in those structures.*

*The practical difficulties in this kind of studies, like detection, recording and analysis of pressures, instrumentation checking and scale effects, among others, prevent us from obtaining better knowledge of the problem.*

*This paper suggests a solution for those practical difficulties, through an experimental and numerical methodology.*

*The experimental methodology enables pressures to be recorded at different points of the structure in study and the numerical methodology enables us to correctly acquire and analyse the pressure field. This analysis is performed in the time domain and frequency domain.*

*The first results of the application of this methodology in the case of free falling jet at arc dams into a plunge pool, are presented.*

## 1. INTRODUCCION

Los fenómenos asociados a las presiones de fluctuación macroturbulentos pueden ser responsables de presiones

diferenciales, fenómenos de fatiga por efecto de cargas alternantes, fenómenos de resonancia por el acople de las frecuencias de las fluctuaciones con las frecuencias propias de la estructura y fenómenos de cavitación intermitente, por efecto de la disminución de la presión instantánea por debajo de la presión de vaporización.

Existen muchos ejemplos de deterioro en todo el mundo (5 y 6) que demuestran un conocimiento insuficiente en el tema, y esto, debido posiblemente a las dificultades prácticas que plantea la detección registro y análisis de las variables aleatorias (velocidades y presiones).

(\*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director General de Consultora Iberoamericana, CIBER, Zaragoza.

(\*\*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de Ingeniería Hidráulica. ETSI de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

(\*\*\*) Ingeniero de Telecomunicaciones. ETSI de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

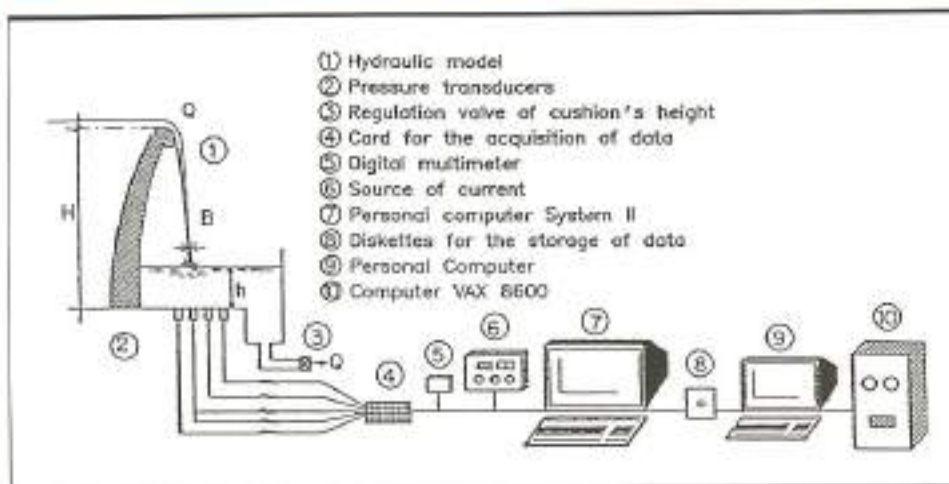


FIGURA 1. Sistema automatizado de adquisición y tratamiento de datos.

En el presente trabajo se presenta una metodología de tipo experimental y numérico que en el Laboratorio de Hidráulica de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña (España) se ha diseñado, puesto a punto y contrastado, para el estudio del campo de presiones en los distintos disipadores de energía hidráulica.

Esta metodología se aplica desde dos puntos de vista:

- Como una herramienta fundamental en el estudio de modelos hidráulicos de prototipos específicos.
- En una línea de investigación que permita profundizar en el conocimiento hidráulico y estructural de los disipadores de energía.

## 2. FUNDAMENTO DE LA METODOLOGIA

La metodología se basa en la modelación física con similitud de Froude de la estructura en estudio y en el registro de las presiones instantáneas en diferentes puntos, por medio de transductores de presión de tipo piezorresistivo.

La detección y registro de las presiones se realiza atendiendo al Teorema de Muestreo de la Teoría de Sistemas, es decir que la frecuencia de muestreo tiene que ser por lo menos el doble de la frecuencia a detectar, evitando con esto el solapamiento de las frecuencias altas en las bajas frecuencias o fenómeno de «aliasing» (9 y 12).

El análisis de las presiones registradas se realiza por medio de la Teoría de Variables Aleatorias, ya que el fenómeno en estudio se le asume como un Proceso Estocástico, Estacionario y Ergódico (1, 10 y 11).

La metodología se concreta en un software que consta de dos programas de adquisición de datos y cinco programas de tratamiento de datos.

## 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Consiste en un sistema automatizado de adquisición de datos (véase figura 1) en donde como partes fundamen-

tales consta el modelo hidráulico, que en caso de esta aplicación consiste en un cuenco de vertido, los transductores de presión, una tarjeta de adquisición de datos, la misma que realiza la transformación de la señal analógica a digital y el ordenador que comanda los ensayos respectivos.

La señal que se registra en los ensayos se almacena en diskettes, para posteriormente ser transferidos a un ordenador de mayor capacidad para su tratamiento.

Dentro de la metodología experimental se considera la comprobación de los transductores de presión, ya que son los elementos básicos que determinan los registros de presiones; de esta forma, se debe comprobar su funcionamiento para garantizar la fiabilidad de los resultados experimentales.

En la figura 2 se presenta un esquema del dispositivo construido para realizar la calibración estática y dinámica de los transductores de presión.

### 3.1. CALIBRACION ESTATICA

La calibración estática consiste en registrar los niveles de presión de columna de agua y sus correspondientes valores de tensión eléctrica, medidos en el transductor. Esto se realiza para diferentes alturas, tanto en llenado como en vaciado del tubo de carga.

Se grafican los resultados y se determinan sus ecuaciones de regresión respectivas. Una respuesta lineal en todos los transductores, además de facilitar en gran medida su utilización, garantiza una histéresis muy baja. Por tanto es importante que esta característica se exija en el momento de su selección. Una curva típica de resultado de la calibración estática puede observarse en la figura 3.

### 3.2. TRATAMIENTO DEL RUIDO

Se ha comprobado que los valores de las pendientes de las curvas de calibración estática de los transductores de presión (sensibilidad nominal) obtenidas en el laboratorio son prácticamente iguales a los valores dados por los fabricantes y son, sensiblemente constantes a lo lar-



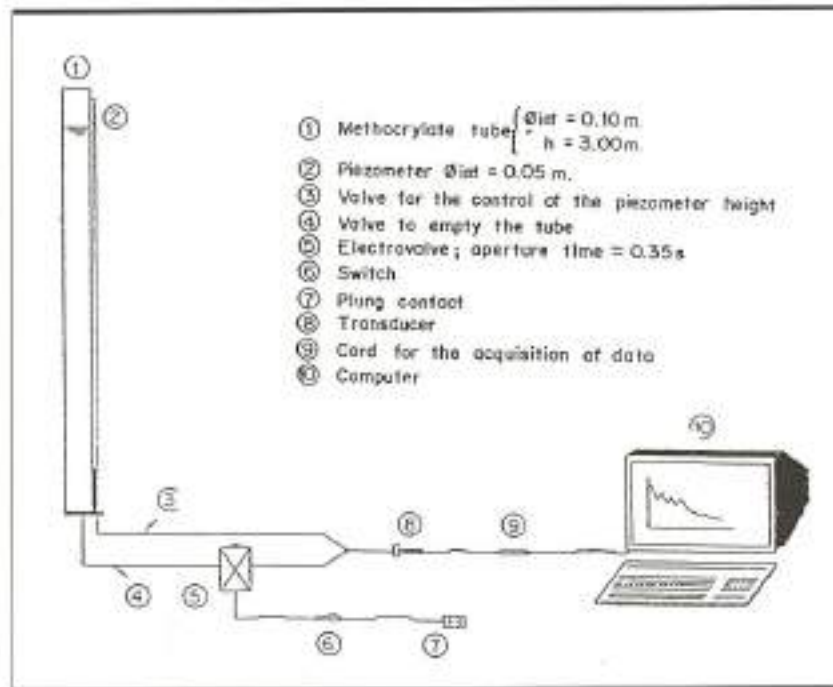


FIGURA 2. Dispositivo para la calibración estática y dinámica de los transductores de presión.

go de su vida útil; en cambio, los valores de las ordenadas al origen de estas curvas de calibración varían aleatoriamente, afectados por las condiciones del ruido presente en cada día; por tanto, es necesario obtener este valor en cada campaña de ensayos. [Véase Castillo (1989)].

### 3.3. CALIBRACION DINAMICA

La calibración dinámica permite la comprobación de las funciones de transferencia de los transductores de presión.

La función de transferencia nos define el tipo de respuesta (en el dominio de la frecuencia) de los transductores de presión, a las sollicitaciones de tipo dinámico; por lo tanto, hasta qué frecuencia es fidedigna la información dinámica obtenida en los ensayos.

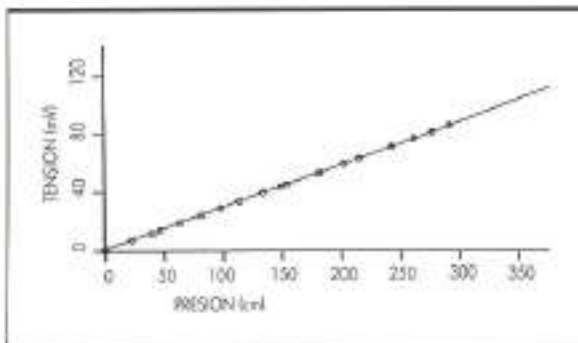


FIGURA 3. Curva de calibración estática de un transductor de presión.

Se define la función de transferencia de un sistema, como la transformada de Fourier de la respuesta al impulso (7 y 9).

Para obtener la función de impulso, se usa el mismo equipo que se emplea en la calibración estática (figura 2); así, se intenta conseguir una función salto o escalón accionando la electroválvula, que al abrirse provoca por vasos comunicantes un incremento de presión considerado unitario. De esta forma, la derivada de la función salto nos da la función impulso buscada.

Es importante hacer notar que, la calibración dependerá del tipo de función obtenida realmente en laboratorio, concretamente, por el tiempo de apertura de la electroválvula. Así, para tiempos menores o iguales al período de muestreo, la respuesta obtenida puede considerarse como una función salto; de lo contrario, se obtendrá una función rampa (2).

En la figura 4 se presenta una función de transferencia de uno de los transductores de presión, la misma que nos indica que la respuesta dinámica de tal transductor es fidedigna hasta unos 25 Hz. Para valores superiores sería necesario corregir la función de Transferencia, por medio de un filtro inverso.

## 4. METODOLOGIA NUMERICA

Se basa en un Modelo Probabilístico y nos permite el análisis del campo de presiones en el Dominio del Tiempo y de la Frecuencia.

### 4.1. ANALISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

A partir de los registros de presiones se obtienen valores máximos, mínimos, medios, fluctuaciones de pre-

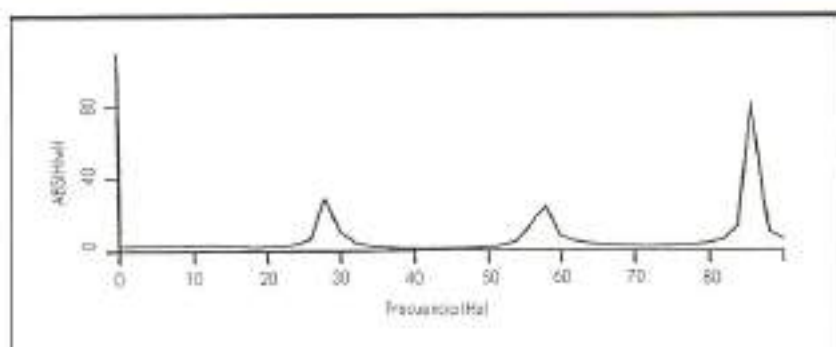


FIGURA 4. Módulo de la función de transferencia, obtenido en la calibración dinámica de un transductor de presión.

ción, amplitudes máximas, semiamplitudes máximas superiores e inferiores con respecto a la presión media, correlaciones temporales y espaciales y la forma de las ondas de presión a través de las funciones de Distribución de Probabilidad y Densidad de Probabilidad.

#### 4.2. ANALISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Se realiza a través de la descomposición frecuencial, por medio de las técnicas convencionales del análisis espectral (Transformada Discreta Finita de Fourier y la implementación del algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier FFT).

Este análisis frecuencial se realiza tanto para el caso Univariante como en el Multivariante, obteniéndose su estimación Espectral a través del método del Periodograma.

**4.2.1. Densidad Espectral Univariante.** Nos determina la distribución en frecuencia de la energía del movimiento de las fluctuaciones de presión. Podemos por tanto analizar los fenómenos de resonancia por posibles acoples de bandas de frecuencias dominantes de las fluctuaciones de presión, con las frecuencias propias de la estructura.

**4.2.2. Densidad Espectral Multivariante.** Por medio de las funciones «coherencia y fases» podemos medir el grado de asociación lineal y el desfase medio en una frecuencia, de los registros de presiones medidos en diferentes puntos.

La coherencia nos mide el grado de correlación y la fase nos determina el instante de acción y el sentido de las presiones en los puntos analizados.

Por tanto a partir de este análisis podremos definir las acciones y modos de vibración de la estructura en estudio.

### 5. APLICACION DE LA METODOLOGIA AL VERTIDO LIBRE EN PRESAS BOVEDA

Una primera aplicación de la metodología descrita se ha realizado al caso del vertido libre en presas bóveda, para lo cual se ha utilizado la infraestructura del modelo hidráulico de la presa Llosa de Cavall, la misma que permitió una altura de caída constante de 1,72 m. Se construyó un cuenco de vertido en metacrilato y en cuya solera se instalaron los piezómetros y los transductores de presión.

Se analizaron tres caudales de vertido ( $Q = 3, 6$  y  $8$  l/s) y ocho alturas de colchón de agua ( $h = 0, 4, 6, 12, 16, 20$  y  $25$  cm), obteniéndose para los cinco puntos de medida un total de 110 registros de presiones instantáneas.

Cada registro de presión consta de 2.400 datos, obtenidos con una frecuencia de 20 muestra/s y un tiempo de ensayo de 120 s.

En la figura 5 se puede observar las principales magnitudes a considerar, así como los cinco puntos de medición en la solera del cuenco. El punto de impacto o de estancamiento define el origen de coordenadas ( $x, y$ ).

En la figura 6 se presentan los resultados del cálculo de las presiones medias de los tres caudales ensayados y con la altura extrema del colchón de agua de  $h = 0,25$  m, para diferentes tiempos de registros desde 30 s hasta 120 s. Estos resultados nos confirman la hi-

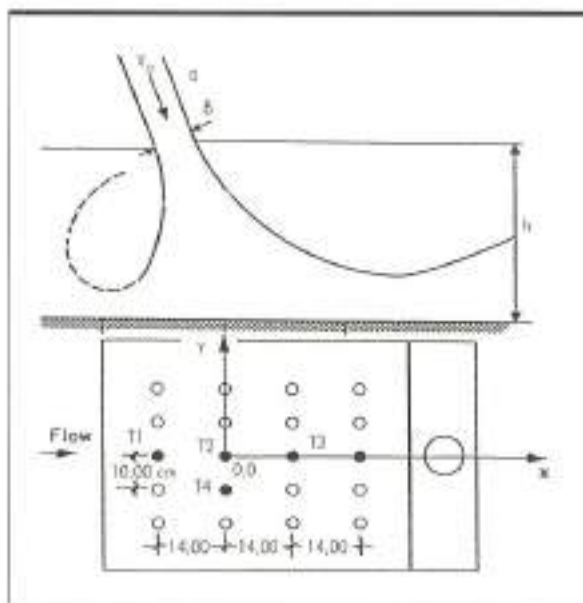


FIGURA 5. Magnitudes principales ( $V_0, q, B, h$ ) y puntos de medición, en la solera del cuenco disipador de energía.

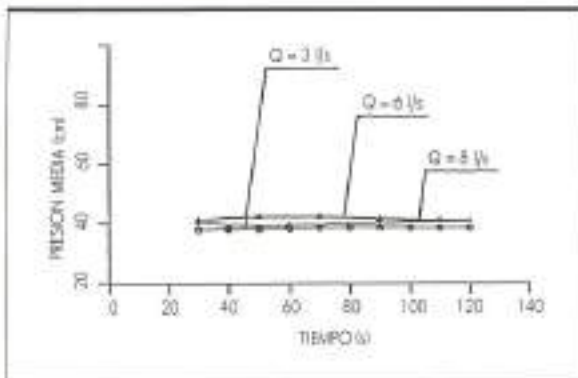


FIGURA 6. Presiones dinámicas medias entre los tiempos de ensayo de 30 y 120 s, para los tres flujos considerados ( $Q = 3 - 6 - 8$  l/s) y altura de colchón de agua de  $h = 0,25$  m.

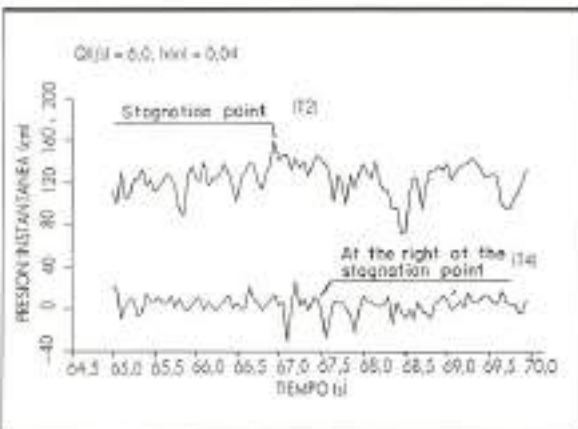


FIGURA 7. Ampliación de los registros de presiones instantáneas, en el punto de estancamiento y a la derecha del mismo.

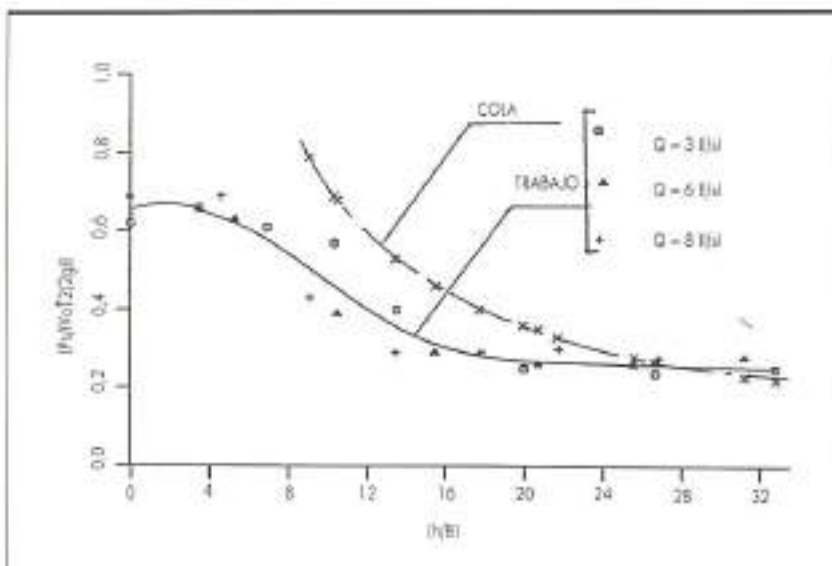


FIGURA 8. Comparación de las presiones dinámicas medias obtenidas en este trabajo, con la propuesta por Cola (1966), para el punto de estancamiento.

pótesis de estacionariedad asumido en el análisis y tratamiento de la información.

Registros típicos de un ensayo se indican en la figura 7, donde podemos observar que la frecuencia de muestreo ha sido suficiente para registrar el fenómeno. Obsérvese las presiones alternantes y su continuo descenso por debajo de cero en el punto T4, así como también las presiones diferenciales entre los puntos T2 y T4.

En la figura 8 se presenta la presión dinámica media  $P_m$ , obtenida en este trabajo para el punto de estancamiento, y se compara con la expresión propuesta por R. Cola (1966).

Podemos concluir que la presión dinámica media en el punto de estancamiento se puede ajustar con una sola curva, en función del parámetro  $h/B$ , y que por tanto es independiente del caudal vertido ya que todo su efecto se encuentra integrado en el espesor del chorro  $B$ .

Los valores obtenidos con la expresión propuesta por Cola son superiores a los obtenidos en este trabajo, ya que no considera, por una parte, el efecto de aireación del chorro al caer libremente en la atmósfera y, por otra parte, el arrastre del aire que se produce al ingresar el chorro al colchón dissipador.

Esta conclusión es extensiva para la presión dinámica máxima, mínima, amplitudes máximas de presión y semiamplitudes superiores e inferiores con respecto a la presión media, tal como puede verse en Castillo (1989, 1990).

Las presiones de fluctuación se analizan a través de la «presión de fluctuación cuadrática media»  $P_{f2}$ , adimensionalizada con respecto a la «presión de fluctuación cuadrática media correspondiente al caso de impacto directo o colchón nulo  $P_{f0}$  y en función del parámetro  $h/B$ , tal como puede observarse en las figuras 9 y 10. Podemos concluir de los resultados de este trabajo y de la comparación con los propuestos por Lencastre (1961)



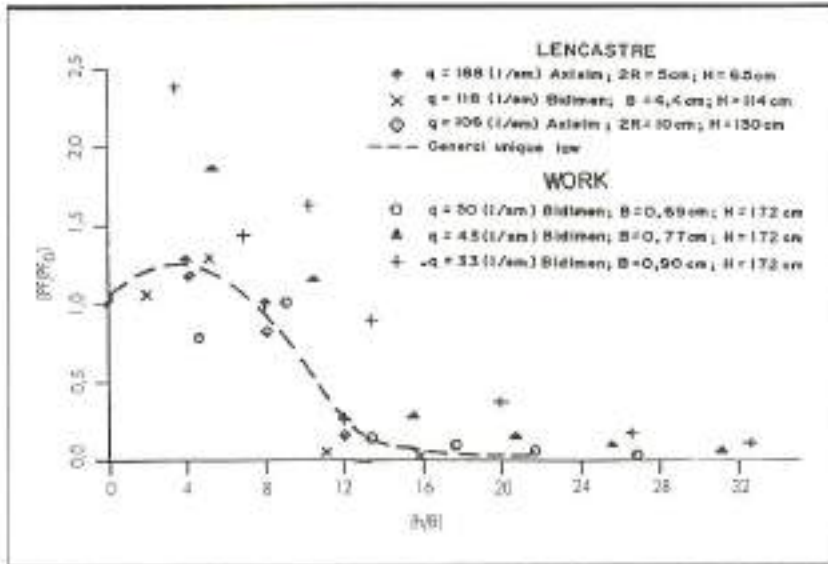


FIGURA 9. Presiones de fluctuación cuadrática media presentadas por Lencastre (1961) y las obtenidas en este trabajo, en el punto de estancamiento.

que se establece una relación funcional a través de familias de curvas dependientes del caudal de vertido y que, por tanto, no se encuentra todo su efecto en el espesor del chorro  $B$ , tal como fue propuesto por este autor.

Un aspecto importante que ya fue indicado por Lencastre (1961) y que ahora se comprueba es que las máximas fluctuaciones de presión no se producen para el caso del impacto directo ( $h = 0$ ), sino para pequeñas alturas del colchón de agua. Este fenómeno puede explicarse por el pequeño o nulo efecto de los pequeños colchones en la disipación de energía y por la facilidad que un cierto espesor de colchón de agua ofrece al desarrollo

de la turbulencia. Estas máximas fluctuaciones de presión se producen para valores de  $[4 \leq h/B \leq 8]$ .

Con el presente estudio se pone en evidencia el pobre conocimiento de la disipación de las fluctuaciones de presión y de los índices de turbulencia en función de la altura del colchón de agua.

Por lo pronto, de acuerdo a los valores obtenidos en nuestros ensayos, y los resultados de otros autores, presentamos unos primeros resultados.

En la figura 11 se presentan las Funciones de Densidad y Distribución de probabilidad de las presiones instantáneas, registradas en el punto de estancamiento

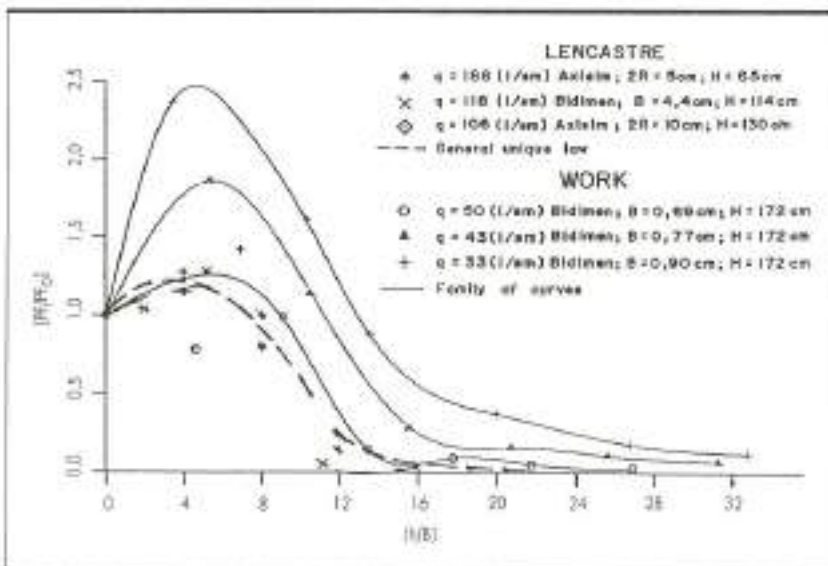


FIGURA 10. Curvas envolventes de las presiones de fluctuación cuadrática medias, en el punto de estancamiento.

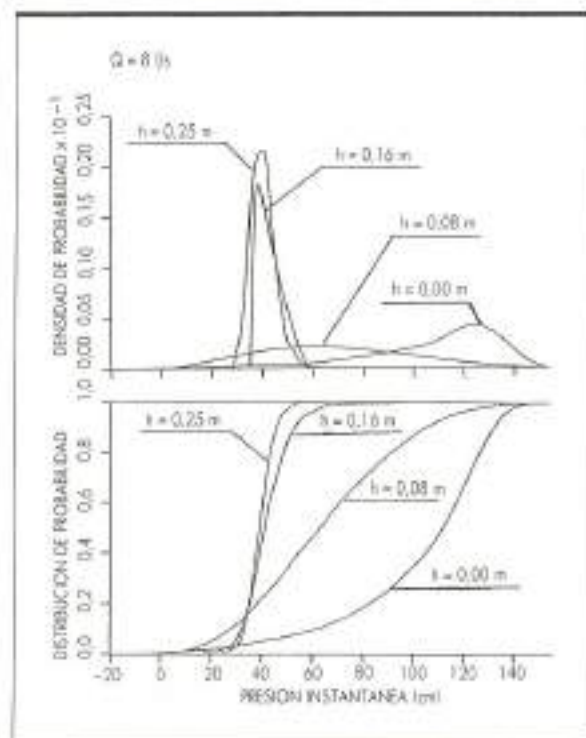


FIGURA 11. Funciones de densidad y distribución de probabilidades de los registros de presiones instantáneas, en el punto de estancamiento.

para diferentes alturas de colchón de agua, observando que se aproximan a una Distribución de Tipo Normal, cuando existe mayor altura de colchón de agua.

En la figura 12 a) se presentan las Densidades Espectrales Univariantes para el caso de Impacto Directo ( $h = 0$ ), y en la figura 12 b), las Densidades Espectrales Máximas para todos los flujos ensayados en el punto de estancamiento. Se puede concluir que la energía asociada a las fluctuaciones de presión son despreciables para frecuencias superiores a 0,3 Hz y, por tanto, son las fluctuaciones de presión macroturbulentas las causantes de la destrucción de las estructuras. Además se vuelve a confirmar que las máximas fluctuaciones de presión se presentan para pequeñas alturas de colchón de agua y no para el caso de impacto directo.

En la figura 13 se presentan las coherencias máximas y las fases correspondientes de las fluctuaciones de presión para los tres caudales ensayados y alturas de colchón de agua de  $h = 4, 12$  y  $20$  cm. Se observa que las máximas coherencias se encuentran por debajo de 0,10 Hz para todos los casos analizados. La mayor coherencia corresponde a la pareja de puntos aguas abajo y a la derecha del punto de estancamiento, cuando el caudal es de 3 l/s y existe una altura de colchón de agua de 20 cm. La fase correspondiente es de  $0^\circ$ , lo cual nos indica que las fluctuaciones de presión en estos puntos se producen al mismo tiempo y en el mismo sentido.

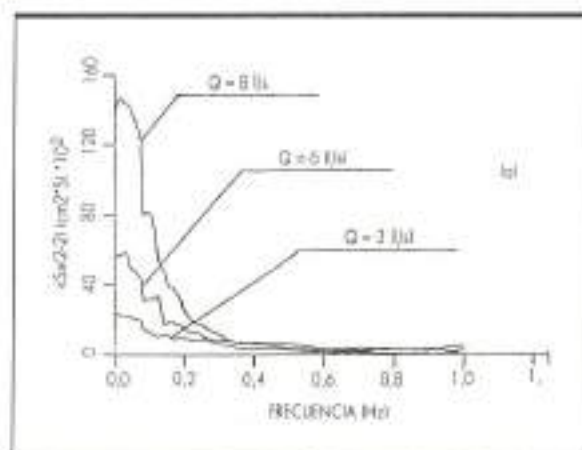


FIGURA 12a. Densidades espectrales univariantes en el punto de estancamiento para el caso de impacto directo ( $h = 0$ ).

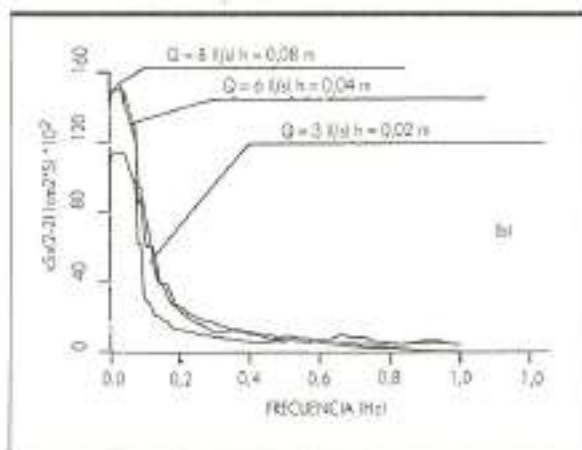


FIGURA 12b. Densidades espectrales univariantes en el punto de estancamiento.

El análisis completo de las coherencias y fases para cada caudal y cada altura de colchón de agua, entre los puntos de medición en la solera del cuenco, se encuentra en Castillo (1989).

La evolución de las coherencias en función del parámetro  $h/B$  para el  $Q = 3$  l/s, se presentan en la figura 14.

Observamos que las presiones en los puntos emparejados con el de estancamiento tienen una baja coherencia, lo que nos indica una independencia de las acciones; en tanto que para emparejamientos diferentes con el de estancamiento, las presiones tienen coherencias más altas, lo que implica una considerable sincronización de las fluctuaciones de presión, hecho que debe ser considerado en el cálculo dinámico de la estructura.

Actualmente, en el laboratorio de Hidráulica de la

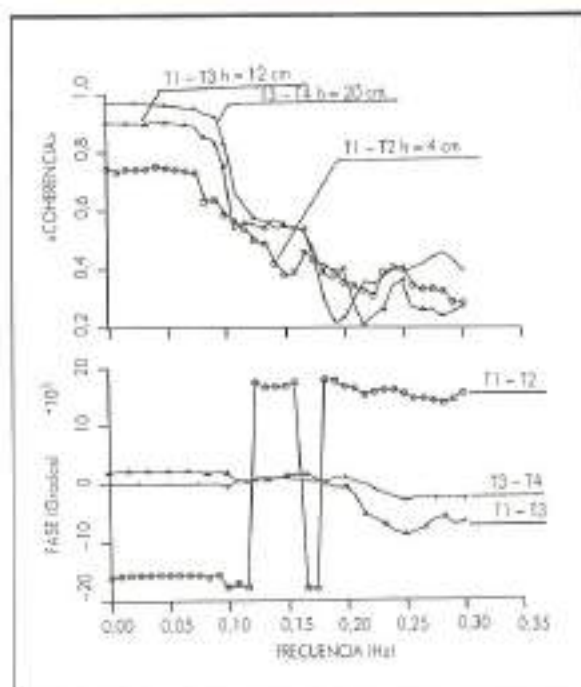


FIGURA 13. Coherencias máximas y sus fases correspondientes para los diferentes puntos en la solera del cuenco disipador de energía.

Universidad Politécnica de Cataluña, se ha construido una infraestructura para realizar ensayos con alturas de caída de 7 m y rangos de caudales de hasta 300 l/s, y que en conjunto con esta metodología permitirán profundizar en el conocimiento de este tipo de estructuras.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de muchas personas e instituciones especialmente el «Plan de Investigación Electrotécnica» (PIE), y las empresas que patrocinaron esta línea de investigación, FECSA, ENHER, HECSA, ERZ y Fuerzas Eléctricas del Segre.

#### REFERENCIAS

1. ASH, R. B., y GARDNER, M. F. (1975). «Topics in Stochastic Processes». Academic, New York.
2. CASTILLO ELSITDIE, LUIS G. (1989). «Metodología experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones en los disipadores de energía hidráulica. Aplicación al vertido libre en presas bóvedas». Tesis doctoral, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
3. CASTILLO ELSITDIE, LUIS G. (1990). «Comprobación y unificación de las formulaciones de la presión dinámica media de un eborro incidente en el punto de estancamiento y la zona de influencia». XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Montevideo, Uruguay.
4. COLA, RAFFAELE (1966). «Diffusione di un getto piano verticale in un bacino d'acqua d'altezza limitata». L'Energia Elettrica, núm. 11, noviembre, págs. 649-667.
5. ICOLD. (1983). «Deterioration of Dams and Reservoirs. Examples and their analysis». Report of the ICOLD Comité on Deterioration of Dams and Reservoir, Paris, France.
6. ICOLD (1987). «Spillways for Dams». Boletín 58. Paris, France.
7. KOOPMANS, L. H. (1974). «The Spectral Analysis of Time Series». New York: Academic Press.
8. LENCASTRE, A. (1961). «Desarregadores de lámina libre». LENC, Lisboa, Memoria núm. 174.
9. OPPENHEIM, A. V., y SCHAFER, R. W. (1975). «Digital Signal Processing». Englewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall.
10. PAPOULIS, A. (1965). «Probability, Random Variables and Stochastic Processes». New York: McGraw-Hill.
11. STANISIC, M. M. (1985). «The Mathematical Theory of Turbulences». New York: Springer-Verlag.
12. TRETTER STEVEN, A. (1976). «Introduction to Discrete Time Signal Processing». New York: John-Wiley.

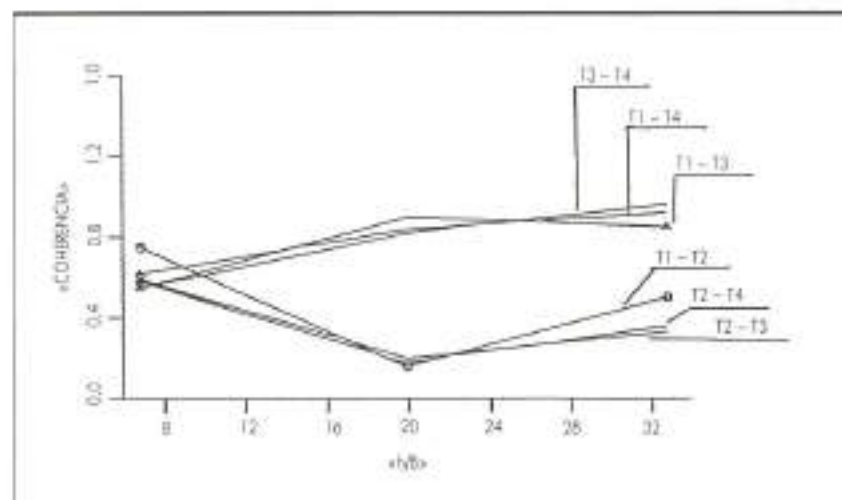


FIGURA 14. Evolución de las coherencias en función del parámetro  $\langle \eta/\delta \rangle$ , para los diferentes puntos en la solera del cuenco disipador de energía.