

XIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA – CÓRDOBA 2000

SISTEMA DE SENSORES DE ULTRASONIDOS PARA LA MEDIDA DEL FONDO. APLICACIONES A PROCESOS DE EROSION LOCAL EN ESTRIBOS.

Roca M., Bateman A., Bounamous F. y Pérez C.
ETSECCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España
marta.roca-collel@upc.es, allen.bateman@upc.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta un sistema de medida de la variación del fondo en un canal mediante sensores de ultrasonidos. El sistema está constituido por varios sensores ultrasónicos conectados mediante un bus de comunicaciones bidireccional a un ordenador. El PC decide en qué instante deben realizarse las medidas y envía las ordenes de toma de datos a los sensores. Posteriormente pide la información obtenida a los distintos sensores que transmiten los datos requeridos.

La toma de medidas se basa en el principio de tiempo de vuelo: se emite un pulso ultrasónico, éste se refleja en el fondo y el eco es detectado y procesado de nuevo por el sensor. El tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción del eco permite determinar el nivel del fondo.

Como ejemplos de aplicación se presentan dos casos. En el primero se estudia la evolución de la erosión en los instantes iniciales al pie de un estribo con distintos ángulos de orientación respecto al flujo. El segundo ejemplo muestra las posibilidades de funcionamiento del sistema con 14 sondas conectadas al unísono controlando el desarrollo de la cavidad de erosión formada en el proceso constructivo de dos espigones enfrentados.

ABSTRACT

An ultrasonic sensor system for measuring bed changes is reported. The system is composed by several intelligent smart sensors connected to a PC with a communication bus. The computer decides when the measurements must be done and transmits the control command to the sensors. Afterwards interrogates the sensors with a data request command and each sensor replies with the transmission of the data obtained in the last measurement.

The measurement is based on the principle of the time of flight (TOF) counting. An ultrasonic pulse is emitted in a downward direction from emitter, after reflection the echo is detected and processed again by the smart sensor. The measured time interval between emission and reception allows determining the bed level at this point.

As examples two studies are reported. The first one presents the time evolution of local scour at bridge abutments with different alignment with respect to the flow. The second one explains how 14 sensors have been used to control erosion in the constructive process of two spur dikes.

INTRODUCCIÓN

La obtención sistemática de datos experimentales, tanto en cantidad como en calidad, es uno de los recursos utilizados para profundizar en el mayor conocimiento de los fenómenos de erosión estudiados en ingeniería civil.

En este trabajo se presenta un sistema de medida de la evolución del fondo de un lecho mediante sensores de ultrasonidos sumergidos. El sistema permite la adquisición de muchos datos, en pequeños intervalos de tiempo, de la posición de un fondo móvil. Su utilidad se refleja en dos ejemplos en los que se ha estudiado la evolución en el tiempo de cavidades de erosión local provocadas por estribos de puentes y espigones de material suelto (escollera).

SISTEMA DE SENSORES DE ULTRASONIDOS

El sistema de sensores de ultrasonidos (SSU) utilizado para determinar la posición de un fondo móvil se compone de varios sensores independientes conectados a un PC mediante un bus de comunicaciones bidireccional.

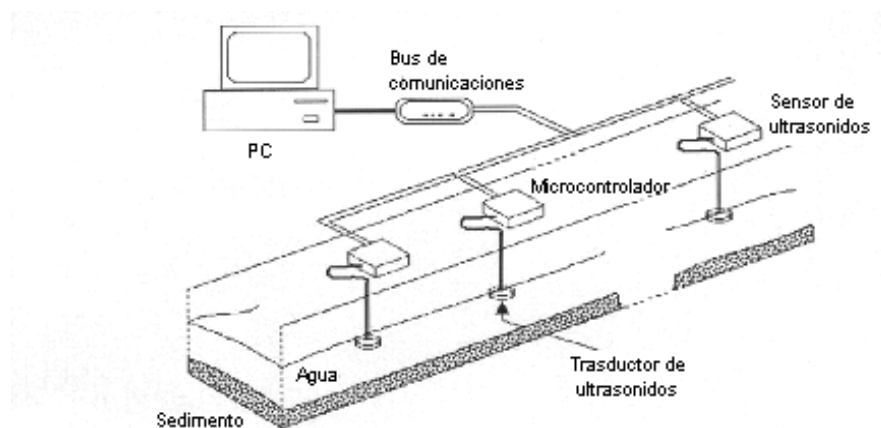


Figura 1. Esquema general del sistema de sensores ultrasónicos

La toma de medidas se basa en el principio de tiempo de vuelo (TOF en inglés): se emite un pulso ultrasónico que se refleja en el fondo y su eco es detectado y procesado de nuevo por el sensor. El tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción del eco permite determinar el nivel del fondo.

Este sistema de medida permite calcular variaciones del fondo de hasta 0.30 m con una precisión de 1.2 mm. El intervalo de tiempo entre toma de datos sucesivos puede ser inferior al segundo.

SENSORES DE ULTRASONIDOS

Cada sensor está formado por un transductor ultrasónico y un microcontrolador. El transductor emite y recibe los pulsos ultrasónicos que se generan con una frecuencia de 850 Hz. Cada señal tiene 10 V de amplitud, 125 ns de anchura y una frecuencia de 4MHz.

El microcontrolador se encarga de tomar 8 medidas consecutivas del tiempo de vuelo y guardarlas en memoria a la espera de recibir órdenes desde el PC.

Para obtener el nivel del fondo utilizando la técnica del TOF el microcontrolador dispone de un temporizador interno de 8 bits con un reloj de 20 MHz. La duración de un intervalo

de tiempo es por tanto de $4 \cdot 10^{-7}$ s. Sabiendo que la velocidad del sonido en el agua varía entre 1425 y 1475 m/s para temperaturas entre 10° y 20°, un intervalo de tiempo equivale a una distancia medida de 1.14 a 1.18 mm.

Los sensores han sido calibrados obteniéndose en todos los casos ajustes lineales de los valores medidos respecto los reales. Las medidas realizadas por los instrumentos son siempre superiores a los valores reales. Como ejemplo de curva de calibración se presenta la figura 2.

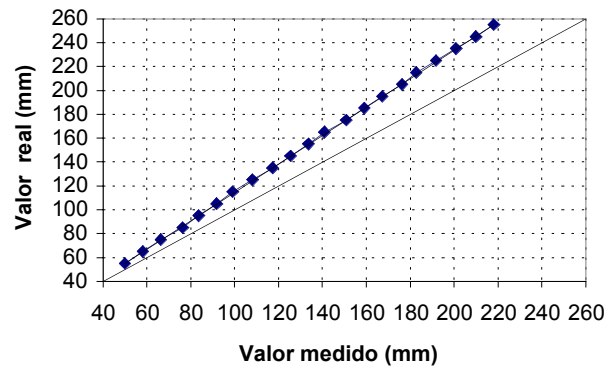


Figura 2. Curva tipo de calibración de una sonda

Pruebas realizadas en fondos con grandes pendientes demostraron que éstas no influyen en la correcta adquisición de datos, se realizaron ensayos hasta con 30° de pendiente del lecho.

En la figura 3 aparecen cuatro transductores ultrasónicos con los cabezales introducidos en el agua y un microcontrolador unido al transductor mediante el cable blanco. La barra metálica horizontal sirve de soporte para los sensores.



Figura 3. Sensores de ultrasonidos

BUS DE COMUNICACIONES

El bus transmite las órdenes del ordenador central hacia los sensores y los datos obtenidos por éstos hacia el PC. Cuando el origen de la transmisión es el PC la información se transmite mediante saltos de tensión que son interpretados por los sensores. En sentido contrario se producen cambios en el consumo de corriente que el PC asocia a niveles lógicos. El bus permite alimentar de forma remota a los distintos sensores con un consumo individual de 40 mA.

SISTEMA DE CONTROL DESDE EL PC

La gestión del SSU se realiza desde un PC en el entorno MS-DOS mediante el programa ECOSON escrito en lenguaje FORTRAN y C. El PC es el encargado de enviar las órdenes para determinar el instante en que las medidas deben ser hechas, pedir a los sensores los resultados y recibir la información que éstos transmiten.

El programa requiere de dos ficheros de datos. En el primero consta la velocidad del sonido en el agua y la identificación de los sensores utilizados en el ensayo (cada sensor dispone de una tarjeta de identificación propia). El segundo contiene los distintos intervalos de tiempo en los que se realizan las medidas.

El fichero de resultados presenta la siguiente estructura: la primera columna delimita el número de identificación del sensor, las cuatro siguientes el instante de medida y las ocho restantes los 8 datos de distancia al fondo tomadas por el sensor.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

La adquisición de datos de forma casi continua del nivel de fondo con el SSU permite estudiar la evolución en el tiempo de los procesos erosivos facilitando la comprensión de fenómenos relacionados con el desarrollo de fondos móviles.

Como ejemplos de aplicación se presentan dos casos. En el primero el conocimiento de la evolución de la erosión en los instantes iniciales al pie de un estribo permite clarificar algunos aspectos, contradictorios en la literatura científica, sobre la influencia del ángulo de orientación. El segundo ejemplo presentado muestra las posibilidades de funcionamiento del SSU con 14 sondas conectadas al unísono controlando el desarrollo de la cavidad de erosión formada en el proceso constructivo de dos espigones enfrentados.

ESTUDIO DE LA EROSIÓN LOCAL EN ESTRIBOS DE PUENTES

El estudio de la erosión local en pilas y estribos de puentes involucra fenómenos de gran complejidad y un gran número de parámetros. Uno de ellos, sobre el que existen ciertas contradicciones en la literatura científica, es la orientación del obstáculo respecto al flujo. Según algunos autores (Roca, 1999) el máximo valor de erosión local tiene lugar en estribos perpendiculares a la dirección del flujo (con un ángulo de orientación de 90°) contradiciendo los trabajos de autores precedentes (Cardoso, (2)) que afirman que la máxima erosión tiene lugar en estribos con ángulos de orientación grandes (orientados hacia aguas arriba). Estas diferencias de resultados han sido relacionadas con el tiempo de duración de los ensayos. Para ángulos mayores de 90° la erosión evoluciona más rápidamente que para ángulos inferiores, por tanto, para tiempos de ensayo cortos se pueden alcanzar valores de erosión mayores en los ángulos de más de 90°. Sin embargo, si se deja evolucionar el proceso la erosión en un estribo perpendicular supera cualquier

otro valor de erosión. Según este razonamiento los ensayos de los primeros autores no se habrían dejado evolucionar hasta el equilibrio.

Está aceptado de forma general que el desarrollo de la erosión a lo largo del tiempo puede dividirse en tres fases:

- inicial: empieza la erosión por aceleración del flujo al paso del estribo;
- principal: la cavidad de erosión se va desarrollando por acción del flujo descendente y del vórtice primario;
- de equilibrio: el aumento de la profundidad de erosión se convierte en insignificante;

Estas distintas fases pueden determinarse como rectas de distintas pendientes en un gráfico logarítmico del tiempo y la erosión.

El objetivo del trabajo realizado es estudiar de forma detallada la evolución de la erosión local en las fases inicial y principal en estribos con distintos ángulos de orientación.

El estudio experimental se lleva a cabo en una zanja de 2.5 m de anchura y 3 m de longitud rellena de material granular uniforme de diámetro medio 1.62 mm. El estribo se simula mediante una pared vertical de 1 cm de anchura que presenta una obstrucción perpendicular al flujo constante de 0.40 m. La longitud del estribo varía dependiendo del ángulo de orientación: 19°, 28°, 36°, 71°, 90° y sus suplementarios.

Las distintas posiciones del estribo se ensayan en régimen uniforme y bajo las mismas condiciones hidráulicas correspondientes al inicio del movimiento: caudal de 0.060 m³/s, calado de 0.07 m y pendiente del 0.2%.

La adquisición de datos se realiza mediante el SSU con 3 sensores conectados de forma simultánea. Su posicionamiento varía según la forma del foso de erosión y por tanto, de la orientación del estribo, tal y como puede observarse en la figura 4 donde la flecha marca la dirección del flujo. Las distancias entre sensores es de aproximadamente 15 cm.

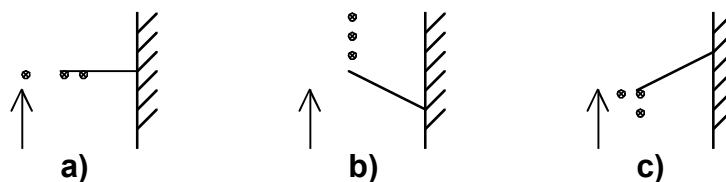


Figura 4. Posicionamiento de los sensores; a) $\theta=90^\circ$; b) $\theta<90^\circ$; c) $\theta >90^\circ$

Durante los 15 minutos iniciales del ensayo el SSU toma datos de la posición del fondo cada 30 segundos. A partir de ese instante y hasta el final del ensayo, de unas 4 horas de duración, las medidas del fondo son cada 3 minutos. Con estos datos pueden obtenerse gráficos de la evolución en el tiempo de la erosión (figura 5) y de su velocidad (figura 6).

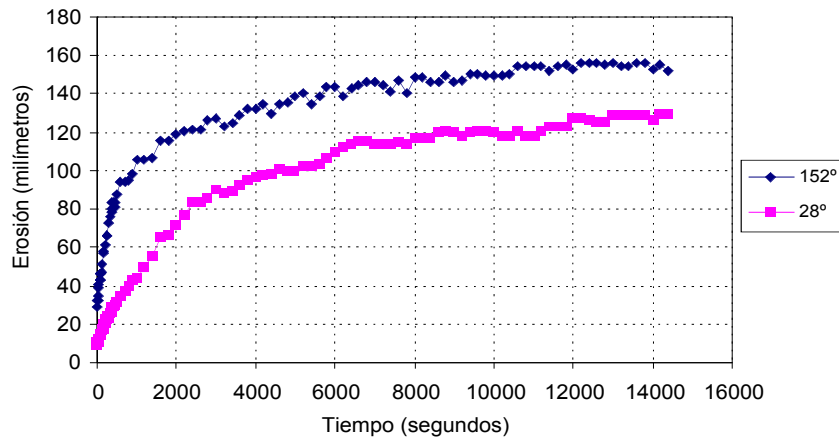


Figura 5. Evolución de la erosión con el tiempo para estribos con orientaciones de 152° y 28°

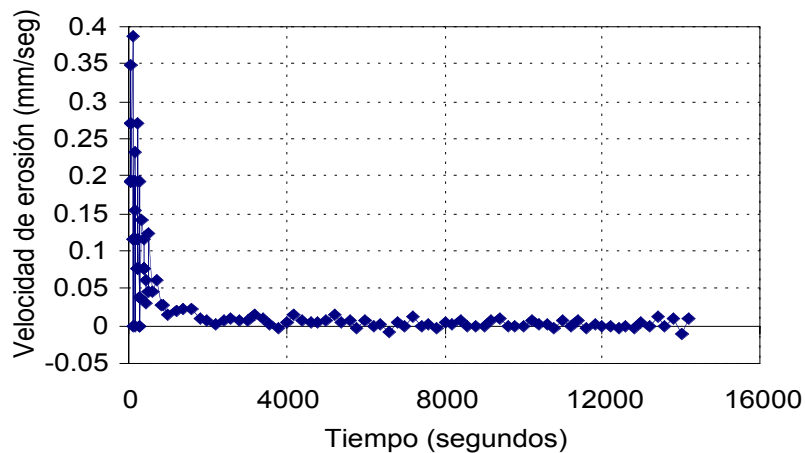


Figura 6. Evolución de la velocidad de erosión para un ángulo de 144°

El análisis de los datos obtenidos permite diferenciar claramente el comportamiento de la erosión para ángulos cercanos a 90°, ya sean mayores o menores, de la de los ángulos alejados de la perpendicularidad. La frontera entre un comportamiento y otro estaría marcada, según los resultados obtenidos, por los ángulos de 51° y 109°.

Ángulos alejados de 90° ($109^\circ < \theta < 51^\circ$):

- el valor máximo de erosión entre ángulos suplementarios corresponde a los estribos orientados hacia aguas arriba, es decir con ángulos mayores a 90°;
- la velocidad de erosión en los instantes iniciales de los ángulos $\theta > 109^\circ$ es muy grande comparada con la de sus suplementarios. Este gran desarrollo inicial de la erosión viene seguido de un rápido decaimiento, mientras que para ángulos $\theta < 51^\circ$ la velocidad inicial es menor pero su decrecimiento es más gradual;
- no está clara la diferenciación entre fases inicial y principal;

Para ángulos cercanos a 90° ($51^\circ < \theta < 109^\circ$):

- los comportamientos de la velocidad de erosión así como del valor máximo son muy parecidos entre estribos con ángulos suplementarios;
- la diferenciación entre fase inicial y principal es clara; como ejemplo véase la figura 7 donde las rectas prácticamente horizontales corresponden a la fase inicial;

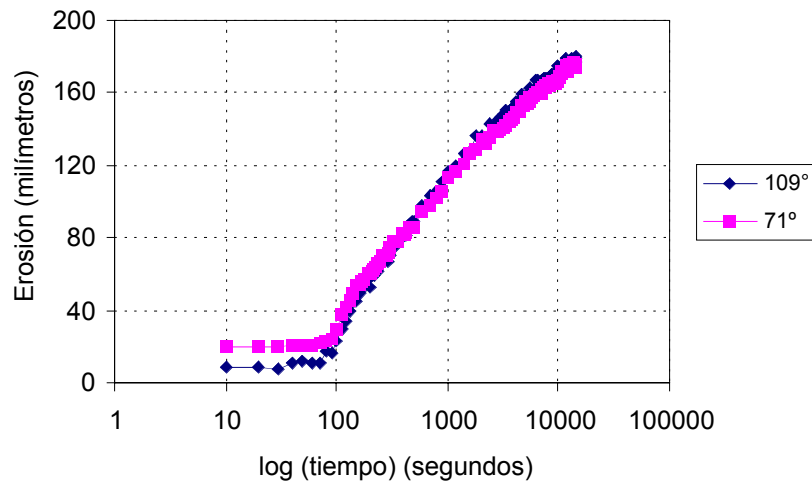


Figura 7. Erosión en función del logaritmo del tiempo para los ángulos de 71° y 109°

En los ensayos realizados, de 4 horas de duración, el máximo valor de erosión corresponde al estribo con un ángulo de 90°, confirmando los trabajos más recientes.

ESTUDIO DE LA EROSIÓN LOCAL DURANTE EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE ESPIGONES

El trabajo presentado como segundo ejemplo de utilización del SSU tiene un carácter más marcadamente ingenieríl. Su objetivo es estudiar la eficiencia del proceso de construcción de espigones de material suelto teniendo en cuenta los fenómenos de erosión local que se producen al verter el material.

El ensayo consiste en construir dos espigones enfrentados de igual longitud. El proceso constructivo de los ensayos difiere en su concepto: en tres de ellos (tipo A) se ha mantenido constante la velocidad de construcción del espigón emergente, mientras que en otros tres ensayos (tipo B) ha permanecido constante el volumen vertido por unidad de tiempo.

El ensayo se realiza en un canal de 1.80 m de anchura y 6 m de longitud relleno con una arena uniforme de diámetro medio 1.62 mm. Como material de espigón se utiliza una grava de diámetro medio 20 mm y la longitud final de cada espigón es de 0.45 m. Las condiciones hidráulicas son las mismas para todos los ensayos: régimen uniforme, caudal de 0.045 m³/s, calado de 0.075 m y pendiente del fondo de 0.2%. En esta situación se está en el inicio del movimiento para el material lecho.

El procedimiento de ensayo en los de tipo A consiste en verter material granular hasta conseguir la longitud de espigón marcada. En este caso se controla la cantidad de material aportado. En los ensayos tipo B se vierte una cantidad prefijada de material granular y se controla el incremento en la longitud del espigón que ha supuesto este vertido. En ambos ensayos la aportación de material se realiza cada 10 minutos con un intervalo de 3 minutos entre ambos espigones.

Cada uno de los ensayos tipo A y tipo B se ha realizado con un rendimiento constructivo distinto, es decir, con distintas longitudes de espigón o volúmenes de vertido por unidad de tiempo.

El estudio del desarrollo del fondo para conocer el avance de la erosión y la simetría del proceso se ha realizado mediante el SSU con 14 sondas conectadas cuya disposición se presenta en la figura 8.

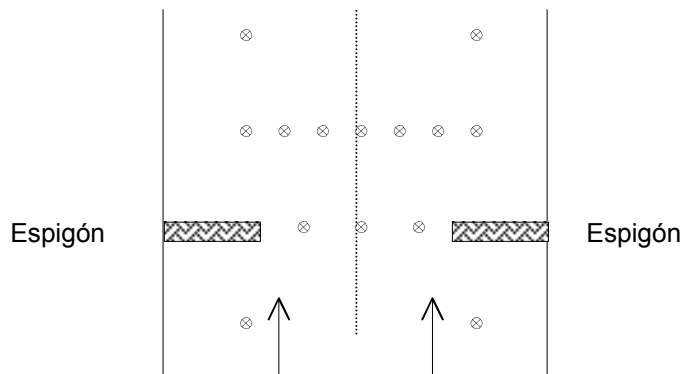


Figura 8. Posicionamiento de los sensores

Los datos obtenidos con los sensores han permitido elaborar gráficos de erosión respecto al tiempo. Como ejemplo se muestran en la figura 9 los resultados obtenidos con la sonda situada en el eje de simetría entre los dos espigones en un ensayo tipo B con distintos rendimientos. El análisis de estas gráficas permite extraer algunas conclusiones generales sobre el desarrollo de las cavidades de erosión formadas por los dos espigones.

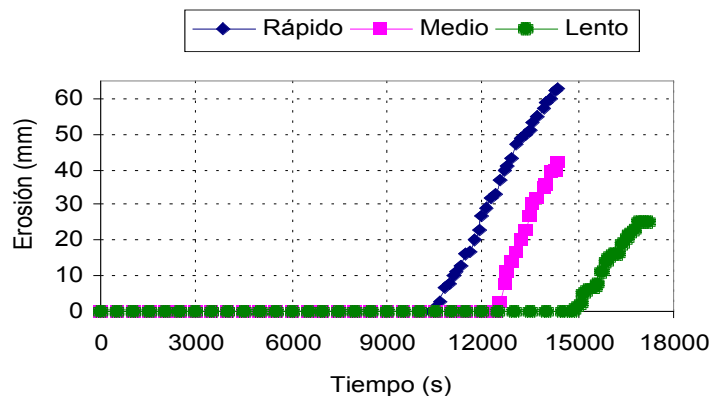


Figura 9. Evolución de la erosión en un ensayo tipo B para distintos rendimientos

Se observa claramente que los ensayos no alcanzan la fase de equilibrio ya que las gráficas de erosión respecto al tiempo no llegan a estabilizarse, por tanto la cavidad de erosión obtenida al final del ensayo no es la máxima. La mayoría de las gráficas presentan una relación lineal de la erosión respecto al tiempo.

Los sensores situados en el eje de simetría permiten determinar el instante en que las cavidades de erosión de cada espigón empiezan a interactuar. Aguas abajo de los espigones la interacción se produce ligeramente antes que en el punto medio de la sección donde éstos se ubican. En puntos situados simétricamente respecto al eje existe una cierta similitud de comportamiento en el proceso erosivo, especialmente respecto al instante de inicio de la erosión. Ver el final de un ensayo en la figura 10.

Mayores rendimientos en el proceso constructivo (mayor volumen vertido o longitud de estribo construida por unidad de tiempo) implican velocidades más altas en la formación de la cavidad de erosión.

En los ensayos realizados manteniendo constante el volumen de material vertido se observan mayores valores de la erosión que en los realizados manteniendo constante la longitud.



Figura 10. Configuración final del ensayo de la evolución de erosión en la construcción de espigones. Obsérvese la simetría del ensayo.

Las conclusiones generales del trabajo, íntimamente relacionadas con el desarrollo de la erosión local al pie del espigón, son dos (ver figura 11, y 12, respectivamente):

- El volumen acumulado necesario para conseguir una determinada longitud de avance aumenta con el cuadrado del tiempo. Esto implica que a partir de un cierto instante la eficiencia del proceso constructivo disminuye ya que para avanzar una determinada longitud de espigón el volumen de material vertido necesario es muy grande.
- La longitud de avance del espigón con un volumen de vertido constante sigue una relación logarítmica respecto al tiempo. A partir de cierto instante nuevos vertidos de material prácticamente no incrementan la longitud del espigón.

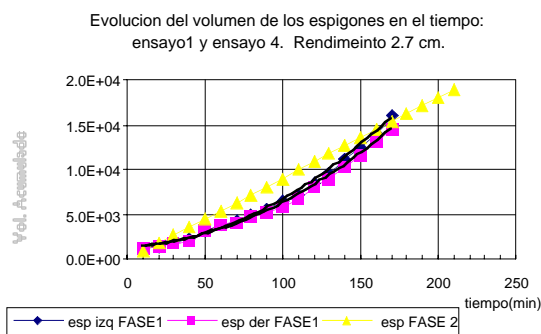


Figura 11

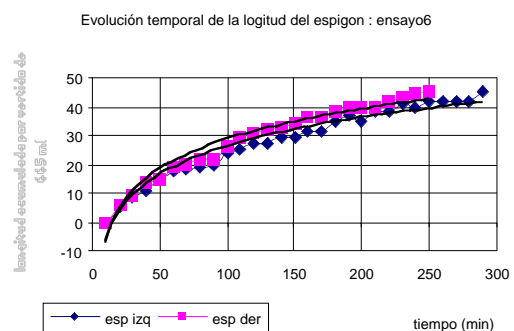


Figura 12

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un sistema desarrollado por el Grupo de Sistemas Sensores del Departamento de Ingeniería Electrónica de la UPC de medidores de fondo mediante sensores de ultrasonidos. Los resultados obtenidos con este sistema han sido satisfactorios a la hora de controlar la evolución temporal de la erosión local provocada por estribos y espigones.

Los sensores de ultrasonido no potencialmente utilizables cuando el sedimento esta en suspensión, pues ellos detectan las partículas como fondo. Así que en lechos donde el transporte sea por saltación y/o suspensión este sistema fallará.

El uso de los sensores en el estudio de la socavación al pie de un estribo ha permitido una descripción detallada de las primeras fases de la erosión observándose en orientaciones de estribos mayores de 90° grandes velocidades iniciales comparativamente a las de sus ángulos suplementarios. En ángulos cercanos a 90° las diferencias de comportamiento entre estribos con ángulos suplementarios son mínimas.

El uso de muchos sensores en un mismo ensayo ha permitido el control de la simetría de los fenómenos de erosión así como de las velocidades de avance de la cavidad formada en el proceso constructivo de dos espigones enfrentados. Se ha podido determinar la relación existente entre la velocidad de construcción y la cantidad de material aportado para mantenerla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Bounamous, F. (1999) *Estudio en modelo reducido de la erosión local durante el proceso constructivo de un espigón de materiales sueltos*, Tesina de Especialidad, UPC, Barcelona.
- (2) Cardoso, A.H. *Erosões localizadas junto de esporoes fluviais e de encontros e pilares de pontos*, Informe del CEHIDRO, Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa.
- (3) Cardoso, A.H., Bettés, R. (1999) "Effects on time and channel geometry on scour at bridge abutments", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 125, No. 4, April, pp. 388-399.
- (4) Pérez, C. (1999) *Estudio experimental de la erosión producida en los cimientos de los estribos de un puente*, Tesina de Especialidad, UPC, Barcelona.
- (5) Roca, M., Cardoso, A., Martín Vide, J.P., Bateman, A. (1999) "Influencia del ángulo de orientación de estribos y espigones en los procesos de erosión local", *Ingeniería del Agua* (pendiente de publicación)
- (6) Turó, A, Salazar, J., Espinosa, G., García, M. (1996) "Sensor inteligente para la detección de profundidad en un medio líquido", *Seminario Anual de Electrónica Industrial*, pp. 80-83