

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

TÉCNICAS DE ENSAYO DE ROTURA DE PRESAS DE ESCOLLERA POR SOBREVERTIDO

Hibber Campos Espinoza¹

Jaime García Palacios²

Andrés Díez Galilea³

Julián Aguirre de Mata⁴

Miguel Ángel Toledo Municio⁵

RESUMEN: En este artículo se describen las técnicas que se están utilizando en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Politécnica de Madrid (ETS de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos) para estudiar el proceso de rotura de las presas de escollera y desarrollar criterios de diseño de protecciones eficaces. Con este objetivo se ha construido un recinto de grandes dimensiones instrumentado con equipos que permiten medir caudales, niveles de carga hidráulica aguas arriba y aguas abajo de la presa y presiones en el cuerpo de la presa. El avance de la rotura de la presa se registra mediante técnicas fotogramétricas que permiten obtener planos detallados del modelo a lo largo del ensayo.

¹ Investigador Ingeniero en Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Madrid.

² Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

³ Profesor Titular de EU, Universidad Politécnica de Madrid.

⁴ Profesor Titular de EU, Universidad Politécnica de Madrid.

⁵ Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

Las presas de escollera tienen como causa más frecuente de rotura el sobrevertido. Por ello resulta indispensable profundizar en la investigación de este fenómeno para mejorar la seguridad de las presas de escollera optimizando el binomio seguridad-economía. Este trabajo se enmarca en el proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D 2007-2011 denominado XPRES. En él participan de manera coordinada el CEDEX y el CIMNE, además de la UPM. El subproyecto desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y energética de la UPM lleva por título “Caracterización de la rotura de las presas de escollera por sobrevertido y desarrollo de criterios para evaluar la seguridad del conjunto presa-área afectada durante una avenida”.

2. RECINTO DE ENSAYO

Las dimensiones del recinto de ensayo son 2,5m ancho x 1,3m alto x 13,5m de largo. Se seleccionaron estas medidas para mantener una relación entre la altura y el ancho de la presa de 1:2,5 con objeto de mantener el efecto pared dentro de límites aceptables, y poder ensayar modelos con taludes aguas abajo desde 1,5 hasta 3,5.

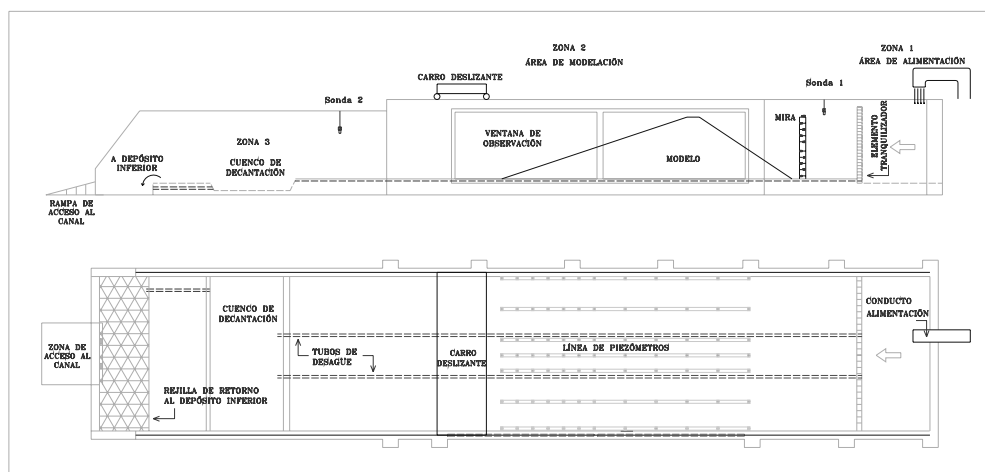


Fig. N°1 Detalles del recinto de ensayo

El recinto está dividido en tres zonas: a) La zona de llegada y disipación de energía del agua, que ocupa 1,2m del canal. En ella se recibe el agua del depósito de nivel constante, se disipa parte de la energía con la que llega y se conduce el agua a través de un elemento tranquilizador a la zona del modelo; b) La zona del modelo, tiene una longitud de 10,50m, en ella se ubica el modelo. En esta zona del canal se ha instalado una red de piezómetros que están colocados en el interior de la solera, distribuidos en 7 ejes paralelos al eje del canal con 12 puntos de lectura por eje. Se ha instalado una mira graduada en cm para un control visual del nivel del agua en la presa. El cajero de la margen izquierda del canal tiene un cristal de 1,10m de alto x 4,70m de largo, es el área de observación directa de la línea de saturación en el cuerpo de la presa y facilita la observación de la evolución de la rotura. Un carro deslizable

sobre guías en la parte superior del canal permite colocar instrumentación de medida para los parámetros de deformación de la presa; c) En la parte final se tiene un cuenco de decantación de 1,35 m de largo, que evita que cualquier material que haya sido arrastrado de la presa llegue al depósito inferior de almacenamiento. Con el mismo fin se dispone una rejilla que sirve como filtro de partículas gruesas en el área final de caída del agua al depósito inferior.

La alimentación al recinto se realiza en circuito cerrado. El agua se bombea desde el depósito inferior de almacenamiento hasta el depósito de nivel constante, desde el cual se conduce el agua hasta el recinto de ensayo. A la salida del recinto el agua cae nuevamente al depósito inferior a través de una rejilla dispuesta en la solera. El caudal máximo de alimentación es de 93 l/s.



Foto N°1 Recinto de ensayos



Foto N°2 Modelo Hidráulico

3. MODELO FÍSICO

Los modelos físicos representan presas de escollera con un talud aguas arriba de 1,5 y una variación de taludes aguas abajo entre 1,5 y 3,5. Esto permite observar los dos mecanismos básicos de rotura de una presa de escollera: el arrastre de partículas (Foto n°3) y el deslizamiento en masa (Foto n°4). La altura máxima de la presa a modelar será de $H=1,0\text{m}$ por las limitaciones del recinto.



Foto N°3 Rotura por arrastre de partículas
Talud 2,5

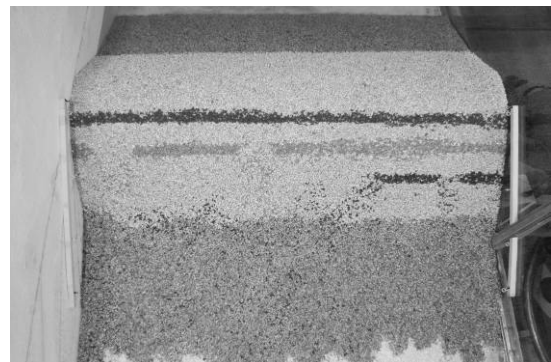


Foto N°4 Rotura por deslizamiento en masa
Talud 1,5

Para cada material utilizado en la presa se prevé realizar los siguientes ensayos : análisis granulométrico por tamizado, peso específico de las partículas,

densidad seca de la muestra, absorción, alterabilidad, resistencia a la compresión simple, ensayo de corte directo en gravas en equipo de 30x30 cm² (para tamaños de grava de hasta 30 mm), ensayo de corte directo en escolleras en equipo de 1x1 m² (para tamaños de escollera superiores a 30 mm), ensayo de permeabilidad en célula triaxial de 9 pulgadas (para tamaños de grava de hasta 30 mm), coeficiente de forma y coeficiente de los Ángulos. Actualmente solo se están realizando los análisis de granulometría por tamizado.

La manipulación de materiales en el laboratorio, se realiza en sacos grandes, de 1 m³, de material plástico con tejido resistente, con asas que permiten su izado con gancho y dispuestas sobre palés del tipo europeo. El lugar de acopio está protegido para que el material se conserve limpio.

Los modelos realizados hasta el momento se han ejecutado con materiales sin compactar, si bien la campaña de ensayos prevé también la utilización de material compactado.

4. CONTROL, INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Para cada uno de los ensayos que se programan en el laboratorio se realiza una estimación previa del caudal de rotura en función de las características del modelo. Partiendo de esa estimación se establecen una serie de escalones de ensayo. Los escalones pueden establecerse bien como alturas de lámina libre conocidas aguas arriba de la presa, o bien como intervalos de caudal constante de alimentación. En cada escalón es necesario mantener el caudal de ensayo el tiempo suficiente para poder considerar que los movimientos que se generan se han estabilizado, no produciéndose nuevos desplazamientos.

El control de la estabilización se realiza mediante observación visual del ensayo, teniendo que superarse un tiempo previamente establecido, en función de las características de la presa, en el cual no debe haber movimiento visible de ninguna piedra.

Para poder llevar a cabo este proceso se ha instalado un sistema de control formado por (1) un caudalímetro de ultrasonido instalado en la tubería de toma, (2) una sonda de ultrasonidos en el vertedero rectangular situado en el canal de salida del ensayo, (3) otra sonda de ultrasonidos aguas arriba de la presa, (4) otra sonda más de ultrasonidos aguas abajo de la presa, y (5) una electroválvula controlada por ordenador en la tubería de toma del canal de ensayo.

Tanto el control de niveles como de caudales se realiza regulando la apertura de la electroválvula. En el caso de que se quieran controlar los niveles aguas arriba de la presa, lo que se utiliza para realimentar el sistema de control es la lectura de la sonda de nivel (3) situada aguas arriba de la presa. En el caso de que los escalones previos sean en caudales, se utiliza el caudal proporcionado por el caudalímetro de ultrasonido como parámetro para la realimentación del sistema de control. El caudal medido en el vertedero se utiliza de dos formas: en primer lugar como parámetro de evaluación del error en el ensayo a lo largo de toda la duración del mismo y en segundo lugar para asegurar que se cum-

ple la hipótesis de estabilidad del escalón ensayado, ya que se debe cumplir la hipótesis de continuidad de caudales entre la entrada y la salida en el modelo para poder asegurar el régimen estacionario.

La retroalimentación del sistema no requiere de tratamientos especiales de la señal, ya que la variación del sistema es lo suficientemente lenta para poder intervenir sobre el mismo sin provocar perturbaciones apreciables.

Todas las señales de control se realizan mediante entradas y salidas de 4-20 mA adquiridas a través de una tarjeta de adquisición de datos conectado a un ordenador portátil con el programa Labview. El sistema de control se ha programado a medida sobre esta plataforma.

Adicionalmente a estas medidas se realiza una medida visual de niveles diferenciales en el tubo de venturi conectado en el mismo tubo de alimentación sobre el que se sitúa el caudalímetro electromagnético, apuntando el tiempo de toma de la lectura. Esta medida se utiliza como contraste posterior del desarrollo del ensayo.

4.1. CAUDALES

El registro de caudales se realiza a través de un caudalímetro de ultrasonido FLUXUS ADM 7407. Este dispositivo funciona según el principio de correlación de retardo de propagación. Como el ultrasonido atraviesa también los cuerpos sólidos, los sensores pueden montarse sobre la pared exterior de la tubería. Para la medición se emite un impulso ultrasónico en la dirección de la corriente del fluido y un segundo impulso en contra de la corriente. Los sensores actúan alternativamente como emisores y receptores. El tiempo de propagación de las señales acústicas a favor de la corriente es más corto que el de las señales que se emiten en contra de la corriente. Se mide la diferencia o retardo entre las señales (Δt). Sobre esta base se puede hallar la velocidad media del fluido en el paso que atraviesa la señal acústica. Mediante una correlación del perfil se calcula la velocidad de flujos sobre toda la sección de la tubería, la cual es proporcional al caudal volumétrico. Estas lecturas se contrastan con las lecturas de un medidor venturi y un vertedero rectangular de pared delgada ubicado aguas abajo de la presa.

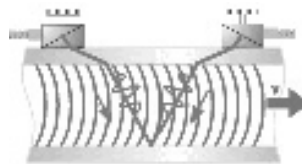


Fig. N°2 Caudalímetro de ultrasonido

4.2. NIVELES

Para la lectura de niveles se usan las sondas del tipo UAS de ultrasonido basadas en el método impulso-eco. La distancia a un objeto se determina en función del tiempo de ida y vuelta empleado por un impulso acústico en viajar entre el sensor y el objeto reflectante y su eco de vuelta hacia el sensor. Un generador de impulsos produce un corto transitorio que se traduce en una oscilación mecánica del electrodo elástico del sensor, y así transmite un corto tren de ondas sónicas enfocadas al medio adyacente en la dirección perpendicular a éste.

La reflexión sónica que se produce en la superficie de un objeto devuelve a su vez otro tren de ondas eco que puede alcanzar de nuevo el electrodo elástico del sensor. Si la intensidad es suficiente, se detecta y se convierte en impulso eléctrico y se amplifica. La distancia es calculada teniendo en cuenta la diferencia de tiempo entre el flanco del impulso emitido y la señal del eco recibido.



Foto N°5 Sonda de ultrasonido del tipo UAS

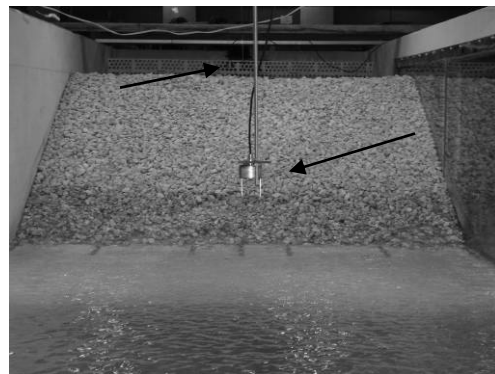


Foto N°6 Posición de las sondas en los ensayos

4.3. LÍNEA DE SATURACIÓN

La línea de saturación se observa directamente sobre el cristal del recinto de ensayo, se registran los datos para compararlos con las formulas teóricas.

4.4. PRESIONES INTERSTICIALES

El campo de presiones intersticiales se obtiene mediante la red de piezómetros instalada en la solera del recinto de ensayo. Hasta el momento por facilidad de construcción de los modelos se han tomado medidas de presiones únicamente en la base de la presa, pero la red de piezómetros permitiría obtener la presión en cualquier punto de la misma.

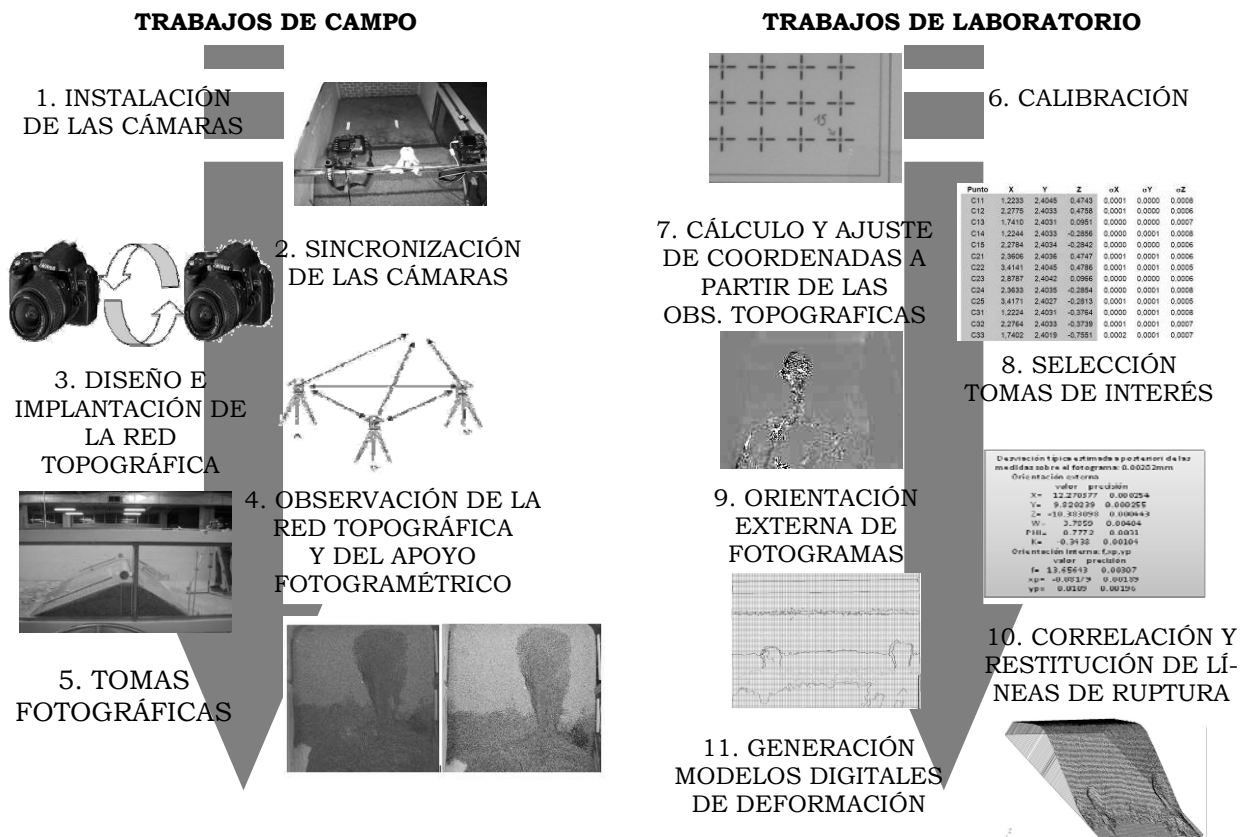
4.5. VARIACIÓN GEOMÉTRICA DEL MODELO

Se ha empleado la técnica de fotogrametría de objeto cercano. En el caso de los procesos dinámicos de rotura, esto se decanta como el método óptimo por su característica de poder obtener “instantáneas” de toda la superficie a estudio a intervalos de tiempo muy cortos. El estudio se basa en la detección y cuantificación de las variaciones de geometría sufridas por la presa, con distintas configuraciones de pendiente, altura y tamaño del material, al aplicarles distintos caudales. Por lo tanto, una parte fundamental en el proceso es la realización de medidas de precisión sin interferir en el transcurso natural del proceso.

4.5.1. Proceso de obtención y proceso de la información

Se han elegido cámaras réflex digitales no profesionales (Nikon D50 y Olympus E500), que ofrecen la posibilidad de emplear gran variedad de ópticas, y la captura de imágenes directamente en un ordenador. Estas cámaras presentan distintas resoluciones, siendo necesario estudiar de forma concisa las características de toma de cada cámara a fin de obtener modelos estereoscópicos homogéneos así como, las focales a emplear en cada cámara para dotar de la cobertura necesaria a la escena y compensar las diferencias de resolución de las mismas.

A continuación, es necesario definir una metodología que permita cumplir los objetivos del proyecto. Para ello se han seguido los siguientes pasos:



4.5.2. Presentación de resultados

A la hora de presentar los datos se ha pensado en las necesidades de análisis del proyecto de investigación. Se pretende detectar y poder cuantificar numéricamente las variaciones entre dos tomas concretas.

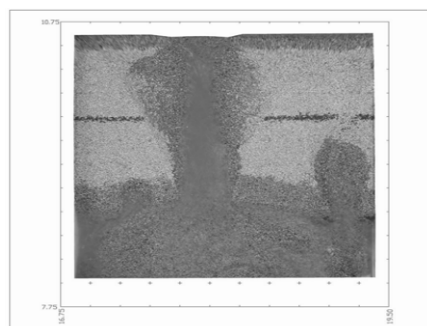
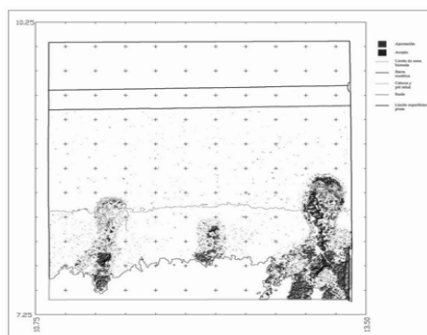
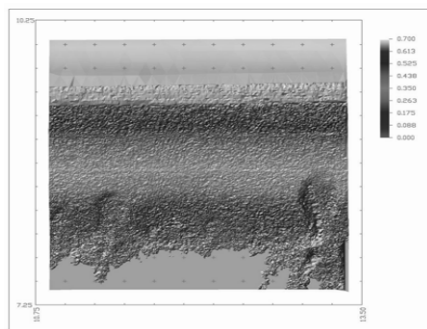
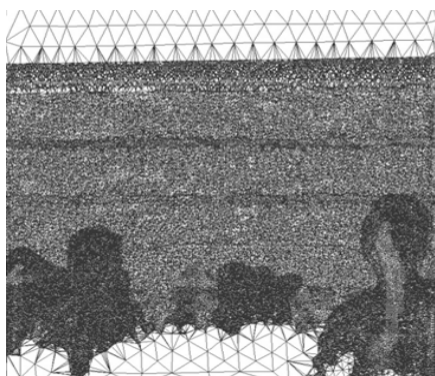


Fig. N°3 De arriba abajo: modelo TIN, mapa de tintas, mapa de variaciones y ortofoto.

Por un lado se dispone del modelo digital del terreno, con el cual se puede realizar cualquier tipo de consulta altimétrica y comparación de modelos. Dado que no siempre se dispone de un software específico que permita la lectura de modelos digitales, se ha utilizado además otro formato para el modelo de datos. Se genera una malla de perfiles de dos centímetros de paso. La información altimétrica a lo largo de cada perfil es continua, no limitándose a los cortes entre perfiles. Con este método se puede consultar la posición y cota de cualquier punto, con una pequeña interpolación. Como la malla en sí no da información visual de la posición de los elementos estructurales, éstos se han incorporado al documento. Esta malla está realizada en el sistema de coordenadas del proyecto, con lo que se han generado una serie de productos temáticos que se pueden georreferenciar sobre la malla, a fin de localizar, e incluso cuantificar, las variaciones.

El primer producto temático es la generación de mapas de tintas hipsométricas, que dan información altimétrica de forma visual. Por comparación de mapas se pueden ver las variaciones de cota entre dos instantes.

El siguiente producto temático son los mapas de variaciones. Se trata de un modelo generado por comparación de los modelos digitales de dos instantes determinados, obteniendo un modelo digital en el que las cotas son la representación de las diferencias de cota de un punto concreto. Se genera un mapa de tintas hipsométricas en el que se aplica el color rojo para las cotas positivas, que es donde se produce la deposición de material, y color azul para las cotas negativas, que es donde se produce el arrastre de material.

El tercer producto temático es la generación de ortofotos, que al estar georreferenciadas, son el fondo ideal para las mallas de perfiles, dado que ayudan a localizar planimétricamente la zona a consultar.

4.6. INFORMACIÓN AUDIOVISUAL

Se guardan registros de vídeo y fotografías de todos los ensayos, para poder analizar cada ensayo y comparar las distintas configuraciones a través de sus variables fundamentales. Las fotografías y los vídeos tienen posiciones y orientaciones definidas previamente para poder establecer comparaciones entre ensayos.

5. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Los ensayos están sujetos a un protocolo de ensayos previamente establecido. El ensayo se inicia con la construcción del modelo con las características predefinidas por el equipo de investigación. A partir de esto, se realiza el cebado de los piezómetros. A continuación el equipo de topografía establece puntos de referencia para generar el patrón de calibración de las cámaras fotográficas. Las coordenadas del patrón se obtienen realizando observaciones angulares por el método de multisección desde tres teodolitos Wild T2. Se estudia la ubicación de los teodolitos a fin de que las intersecciones dos a dos de las visuales se realicen lo más próximas posible a 90° . La escala se obtiene mediante observaciones a una barra de calibración. Una vez calibradas las posiciones de las cámaras se posicionan las sondas de nivel y se enciende el caudalímetro. Es en este momento cuando se abren las válvulas y el agua comienza a llenar el recinto. Cada escalón de caudal se mantiene hasta que la presa no presente más movimientos. Entonces se toman lecturas de los niveles y caudales y se registran los datos de los piezómetros. El paso siguiente es incrementar el caudal y repetir los pasos previos hasta llegar al caudal de rotura de la presa. Se filma cada nuevo caudal y se hacen registros fotográficos de cada estado parcial de la presa.

6. TRATAMIENTO DE DATOS Y ELABORACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

Para el tratamiento de datos y elaboración de informes se ha creado una hoja Excel con macros en Visual Basic para Aplicaciones (VBA). En ella, y a modo de base de datos, es necesario especificar los datos conocidos del ensayo previamente a la elaboración del mismo, geometría, materiales con su granulometría, escalones previsibles y otros datos de interés. Asimismo deben especificarse cuáles son los sistemas de medida a utilizar. Con todo ello se generan los vínculos necesarios a los archivos de resultados, incluidas las fotografías, para generar un informe automatizado de acuerdo al estándar que se ha aprobado para estos ensayos. En este informe aparece la geometría de la presa, la descripción de los materiales, así como las duraciones del ensayo y las medidas que se han llevado a cabo.

Adicionalmente, se cargan las fotografías que se hayan tomado para este ensayo de manera automatizada y se incluyen dentro del propio informe con su correspondiente pie de foto.

La totalidad de los ensayos se almacena en un único libro, con referencias en cada uno de ellos a los distintos ficheros de resultados. De esta forma, se puede elaborar un informe final en el que se relacionen de manera conjunta los distintos ensayos en una nueva serie de gráficos, algunos de los cuales están aún por determinar en función de los resultados y conclusiones que se vayan obteniendo.

7. MEJORAS PREVISTAS

Se prevé realizar algunas actuaciones en las instalaciones del laboratorio. La primera es ampliar la capacidad de alimentación al recinto de ensayo hasta al menos 250 l/s.

Se prevé la implantación de un sistema de control para el llenado del depósito de nivel constante y la alimentación al recinto de ensayo.

También se está estudiando la posibilidad de registrar las lecturas piezométricas mediante la edición de fotogramas con el programa MatLab.

En cualquier caso, la mejora de las instalaciones y técnicas de ensayo es continua a medida que avanza el proyecto de investigación.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Educación y Ciencia, cuyo proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D 2007 2011 con código de identificación BIA2007 68120 C03 021 y titulado “Caracterización de la rotura de las presas de escollera por sobrevertido y desarrollo de criterios para evaluar la seguridad del conjunto presa-área afectada durante una avenida” es el marco de actuación para este trabajo de investigación.

Al personal del laboratorio de hidráulica de la ETS de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la UPM.

Al laboratorio de puertos de la ETS de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la UPM, en la persona de Vicente Negro, por facilitarnos parte de sus instalaciones para el acopio de material de ensayo.