

## **Instalación de sistema de detección de fugas en el recrecimiento de Yesa mediante sensores distribuidos en fibra óptica**

O. Muñoz

*TECNALIA Research & Innovation  
Ronda San Juan Bosco, s/n, 50100, La Almunia de Doña Godina, Zaragoza*

R. Gómez

*Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE)  
Paseo Sagasta, 24-28, 50006, Zaragoza*

B. Russo, J. C. Sánchez

*Grupo de Investigación GIHA, EUPLA (Universidad de Zaragoza)  
Calle Mayor s/n, 5010 La Almunia de Doña Godina*

### **1. Introducción**

La seguridad de una infraestructura no depende exclusivamente de un proyecto adecuado y de una correcta construcción, sino también de la vigilancia de su comportamiento durante su explotación a lo largo de toda su vida útil. Todas las grandes infraestructuras se dotan de sistemas de auscultación que permiten la supervisión del estado estructural de las mismas.

Dentro de los parámetros de supervisión y mantenimiento de una presa, la detección de filtraciones a través del cuerpo de la propia infraestructura es vital para la integridad del propio elemento con lo que la detección temprana de dicha anomalía permite ejecutar acciones correctivas que pueden evitar situaciones catastróficas. Ejemplos muy conocidos son los casos de Baldwin Hills (USA, 1963), Teton (USA, 1975), Quail Creek (USA, 1989), Mosul (Irak, 1990), etc..

Tradicionalmente la instalación de los elementos de auscultación para la detección de filtraciones normalmente utilizados para el tipo de aplicación descrita adolece de dos inconvenientes principales (CICCP, 2004):

- *Medición puntual:* debido a la gran superficie a monitorizar, el uso extensivo de sensores de detección de filtraciones es inviables a nivel práctico y económico

con lo cual el despliegue de los elementos normalmente utilizados cubre zonas muy localizadas de la estructura.

- *Medición tardía*: en muchas ocasiones la detección aguas abajo de una filtración nos informa del problema pero no del origen real del mismo. En el caso de las presas de materiales sueltos el problema es aún mayor debido a que el flujo de la filtración puede haber acarreado ya una degradación del núcleo de la infraestructura.

Conociendo que existe la posibilidad de detección de flujo hidráulico mediante la implementación de sensores de temperatura y gracias a que el avance de la optoelectrónica actualmente permite integrar multitud de sensores de este tipo dentro de un único hilo de fibra óptica (FO), estamos en disposición de desplegar una red de sensores para la detección temprana de fugas en presa de materiales sueltos que apalíe las carencias descritas anteriormente (Aufleger *et al.*, 2007; Khan *et al.*, 2010; Nickles *et al.*, 2004).

El proyecto CHEDAM-YESA pretende implementar la tecnología descrita en el recrecimiento del embalse de Yesa con objeto de mejorar las capacidades de monitorización de la infraestructura. Debido a la peculiaridad del diseño de la presa y a la nueva tecnología a implementar, los puntos principales del proyecto se centran en la estrategia de implementación de la red de sensores ópticos para su adaptación a la estructura de la presa y en la caracterización de la fibra óptica utilizada junto con el establecimiento del método de medida óptimo.

Finalmente, en este trabajo, se proporciona un análisis comparativo de las instalaciones de los sistemas de detección de fugas basados en fibra óptica en las presas de Sototerroba (Munóz *et al.*, 2013) y en el recrecimiento de Yesa.

## **2. Sensores de Temperatura Distribuidos basado en FO. Características y problemáticas de instalación**

Gracias a los avances en optoelectrónica y al abaratamiento de dispositivos tradicionalmente de coste muy elevado, hoy es posible, mediante un equipo de interrogación, medir la temperatura a lo largo de toda la longitud de una FO. Esta tecnología nos permite implementar un sistema de medición distribuido de forma masiva capaz de monitorizar estructuras de grandes dimensiones. Una de las posibles aplicaciones de este tipo de tecnología es la detección de fugas en presas de materiales sueltos. Distribuyendo el elemento sensor FO por debajo de la capa impermeable es posible de detectar variaciones de temperatura provocadas por la filtración del agua a través de una fisura.

## 2.1 Efecto Raman

La tecnología basada en el efecto RAMAN se basa sobre la idea de aprovechar un pulso óptico generado por Laser y transmitido a lo largo de la fibra. La dispersión denominada como Raman es debida a la interacción de los fotones procedentes del láser con las vibraciones térmicas de las moléculas de silicio. Gracias a este efecto se pueden medir las fluctuaciones de temperatura en la propia fibra disponiendo así de una red de sensores cuyo número es dependiente de la longitud de la propia fibra. La localización del punto medida se realiza mediante el análisis del “tiempo de vuelo” de la señal LASER y su precisión de medida puede rondar entre 0,5 y 2 metros, o lo que es lo mismo para cada 100 metros de fibra óptica se dispondría como máximo de 200 “sensores” o “puntos de medida” de temperatura.

## 2.2 Interrogadores de fibra óptica

Se denomina como “interrogador de efecto RAMAN” al equipo capaz de extraer la temperatura a lo largo de un hilo de fibra óptica haciendo uso del efecto descrito en el apartado anterior. Para la correcta selección del equipo a implementar se deben de tener en cuenta las siguientes características:

**Rango de medida.** Distancia máxima de FO que el equipo es capaz de consultar. Por norma general las unidades se aportan en Km con lo que para infraestructuras de relativas bajas dimensiones tales como presas o diques dicho parámetro suele cumplir con los requerimientos holgadamente. Dicho parámetro es de especial importancia en el caso de supervisión de líneas de transporte hídricas.

**Tipo de fibra.** Características físicas de fibra a instalar (multi-modo/mono-modo).

**Número Canales.** Cantidad de hilos de fibra que se pueden conectar al equipo. Este parámetro es de relevancia puesto que dependiendo de la tipología de instalación de los sensores es necesario instalar más de una fibra óptica (monitorización por niveles).

**Resolución Espacial.** Longitud de fibra óptica a la cual el interrogador asocia una lectura de temperatura, dicha resolución suele oscilar entre 0,5 y 2 metros dependiendo del equipo.

**Resolución de Temperatura.** Precisión en décimas de grado de la medida de temperatura obtenida.

**Tiempo de medida.** Duración del ciclo de medida de temperatura. Este parámetro suele ser variable y afecta directamente a la resolución de temperatura, en caso de que el tiempo de medida no sea crítico se recomienda usar el máximo tiempo de lectura permitido al obtenerse una mejor resolución de la temperatura. Por norma general en los equipos multicanales el tiempo de medida es dado por canal con lo que el tiempo de lectura total se deberá de multiplicar por el número de canales habilitados.

Se han expuesto los parámetros más relevantes que caracterizan a un interrogador de efecto RAMAN, no obstante para una implementación práctica se debe de tener en consideración otros parámetros como temperatura de funcionamiento, alimentación del dispositivo, conectividad, etc. de suma importancia para el correcto funcionamiento del interrogador y del sistema en general.

## 2.3 Cable DTS

El cable de DTS es el elemento fundamental del sistema ya que éste no sólo integra la fibra óptica necesaria para las lecturas de temperatura sino que además incorpora el par de cobre necesario para la realización de las lecturas mediante la técnica de impulso térmico.

En adición a lo anterior también se debe de tener en cuenta que las condiciones de instalación del elemento, (trabajos de obra civil), pueden hacer peligrar la integridad del cable con lo que es necesario asegurar que el elemento posea las pertinentes protecciones mecánicas necesarias para que durante la ejecución de la obra se reduzca el peligro de la rotura del cable. Aun con estas precauciones es altamente recomendable la realización de un plan de contingencia que permita solventar o atenuar posibles roturas totales o parciales del cable DTS, dicho plan vendrá condicionado por la propia infraestructura a monitorizar con lo que es necesario un estudio previo de la disposición del cable, los accesos al mismo y los recursos disponibles para las posibles medidas correctoras.

## 2.4 Técnica de medida

La identificación de una fuga en la presa requiere de un procedimiento de medida basado en stress térmico del cable DTS, también denominado "Heat Pulse Method". En una primera fase se somete el elemento sensor a un ciclo de calentamiento a través del par de cobre integrado en el propio cable mientras que la segunda fase corresponde a la fase de retorno a la temperatura inicial de la fibra una vez cortado el aporte de calor.

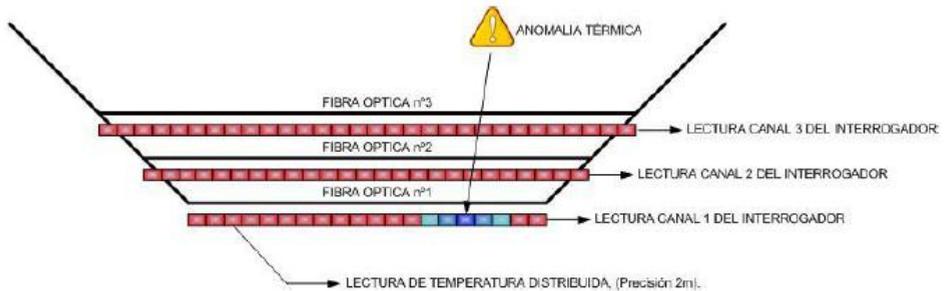
Siguiendo el procedimiento de medida anteriormente indicado se definen tres parámetros básicos a través de los cuales se puede identificar una filtración de agua en la infraestructura:

**$\Delta T$ .** *Gradiente de Temperatura.* Diferencia entre la temperatura inicial del test y la temperatura máxima alcanzada en el punto de medida.

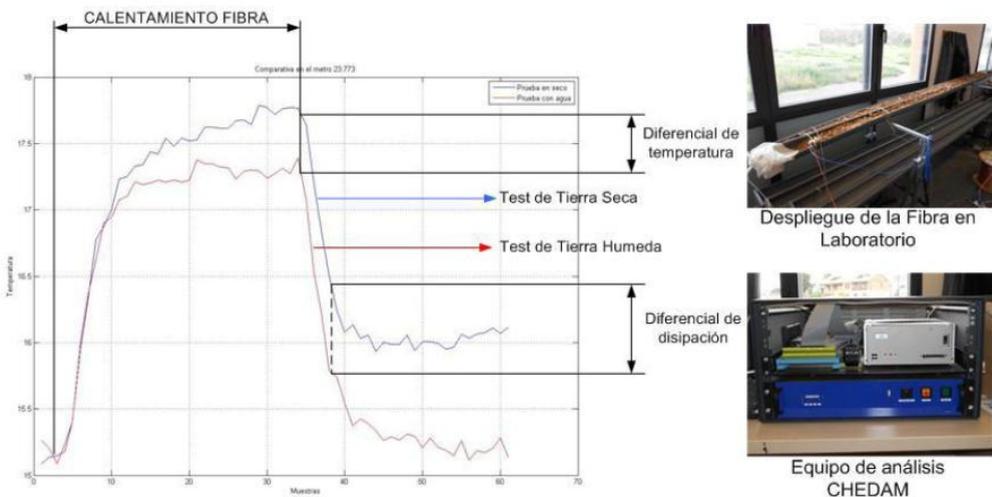
**$\Delta H$ .** *Gradiente de Disipación.* Correspondiente al tiempo que la FO tarda en volver, de la máxima temperatura alcanzada en la fase de calentamiento, a la temperatura inicial del ensayo.

**D. Posición del punto de medida.** Nos indica la localización del punto de medida dentro de la FO. Relacionando este punto con las coordenadas de instalación de la misma es posible localizar con precisión la situación de la fuga de agua.

Para determinar la detección de una fuga dentro de la presa es necesario relacionar los parámetros de cada punto de medida con los de sus vecinos. No es posible fijar un umbral específico para todos los puntos de medida puesto que están distribuidos a lo largo de una gran infraestructura con lo que la mejor manera de abordar la identificación de una fuga es utilizando un algoritmo de detección de anomalías acotado a las zonas de interés.



**Figura 1.** Ejemplo de detección de anomalía térmica.



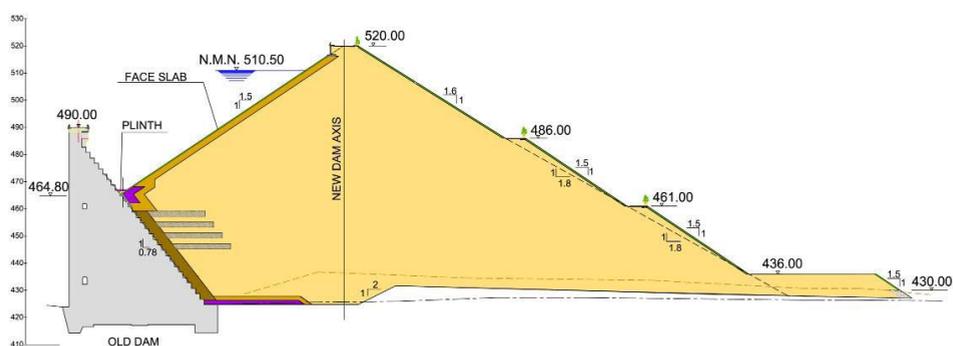
**Figura 2.** Respuesta de punto de medida ante pulso térmico. Pruebas de laboratorio.

### 3. Presentación del caso de estudio: el recrecimiento del embalse de Yesa

#### 3.1 Contexto actual

La actual presa de Yesa (Navarra) fue puesta en servicio en el año 1959, su tipología es de gravedad de hormigón con paramento vertical aguas arriba y escalonado con talud equivalente 0.78H:1V. Tiene 78 m de altura, 398 m de longitud de coronación y 447 hm<sup>3</sup> de capacidad, estando situada sobre el río Aragón, afluente del Ebro, en el norte de España.

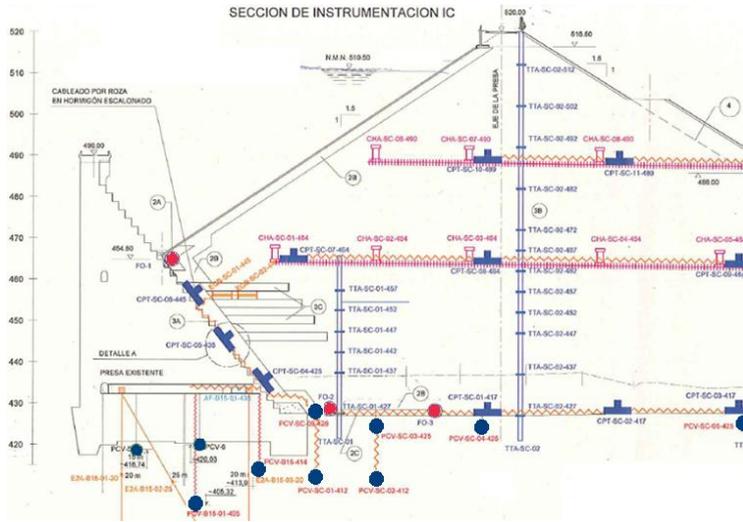
Esta presa se ha comportado satisfactoriamente durante los 56 años que lleva en explotación, pero como consecuencia de los cambios de cultivo (inicialmente cereal y en la actualidad diversificada con alfalfa, maíz, hortalizas, arroz, etc.) en la zona regable de Bardenas con 110.000 hectáreas y el nuevo suministro de agua de calidad a la ciudad de Zaragoza y su entorno (con más de 800.000 habitantes), se ha hecho necesario proceder a su recrecimiento para disponer de 1.079 hm<sup>3</sup> de capacidad sin afectar a la explotación de la presa existente. Este recrecimiento se está ejecutando mediante la construcción de una presa de materiales sueltos situada aguas abajo de la existente, con una pantalla de hormigón en su talud de aguas arriba, hasta conseguir una altura de 108 m. Los datos significativos del recrecimiento de la presa, así como del cuerpo original se representan en la siguiente figura.



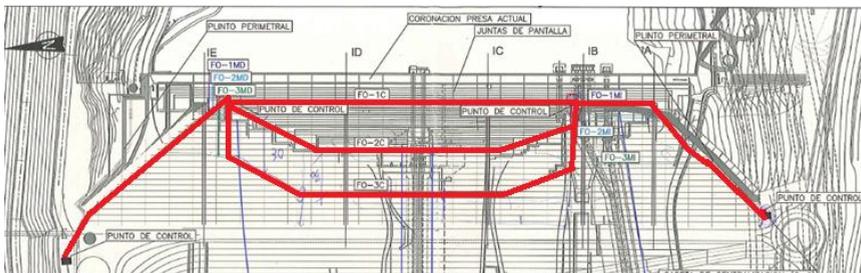
**Figura 3.** Representación del recrecimiento de la presa de Yesa y del cuerpo de gravedad original.

#### 3.2 Descripción de la instalación

La distribución del cable DTS en la presa de YESA se conforma con el tendido de tres líneas principales para la medición de temperatura a lo largo de las zonas críticas de la propia infraestructura. A nivel práctico se definen cuatro puntos de control en donde se concentrarán los terminales del cable cuyos ramales se irán implementando conforme la infraestructura se vaya elevando (Figuras 4, 5 y 8).



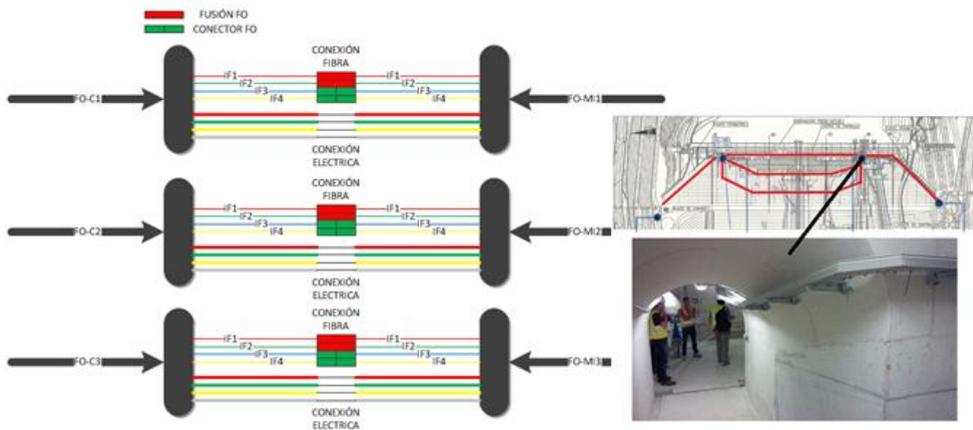
**Figura 3.** Cuerpo de la presa y detalle del sistema de auscultación. En rojo se representan los tres cables DTS distribuidos por las zonas más críticas de la infraestructura.



**Figura 4.** Distribución del cable DTS en la presa de YESA.

Por cuestiones prácticas en la construcción de la presa la instalación del cable debe realizarse de manera seccionada con lo que el uso de los puntos de control descritos permitirá realizar las fusiones y uniones de los distintos ramales del cable DTS para conformar el total de las tres líneas de medición del sistema CHEDAM en la presa de YESA (Figura 5).

Durante la construcción del recrecimiento de la presa de YESA y conforme se vayan añadiendo los distintos ramales de cable DTS se realizarán inspecciones periódicas en donde se supervisará la integridad del elemento instalado según el protocolo de inspección de cable DTS diseñado para la instalación del sistema CHEDAM en el recrecimiento de la presa de YESA. Dicho procedimiento integra además los planes de contingencia ante rotura parcial o total de los ramales.

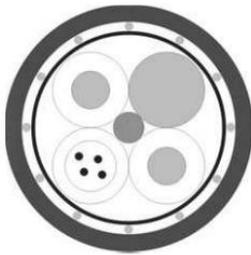


**Figura 5.** Unión de los ramales en punto de control 3.

### 3.3 Análisis comparativo del sistema de monitorización de Yesa con el sistema de monitorización diseñado para la presa de Sototerroba

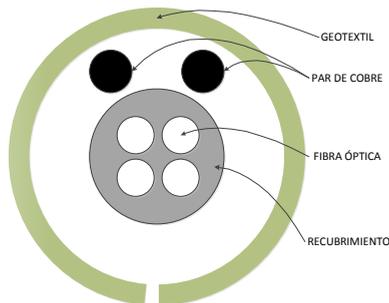
#### Diferencia entre los cables de FO utilizados

El cable híbrido de fibra óptica del sistema CHEDAM incorporado en la presa de YESA se compone de tres partes principales, la primera la conforma el elemento principal de sensado, (FO), compuesto por cuatro núcleos de fibra multimodo, la segunda integra dos pares de cobre utilizados para la implementación del método de pulso térmico y la tercera consiste en el recubrimiento especial que permite la instalación del cable en entornos de obra civil



**Figura 6.** Sección del cable DTS.

Al contrario que la instalación del sistema CHEDAM en la presa de Soto-Terroba (Rioja) (Muñoz *et al.*, 2013), en donde la instalación del cable de fibra óptica se realizó en paralelo con el par de cobre, la implementación de un cable híbrido con las características descritas anteriormente nos permite simplificar la instalación del elemento añadiendo además una mayor protección mecánica. Además, la uniformidad en la transmisión térmica entre el par de cobre y la fibra óptica permitirá obtener una mejor lectura de las temperaturas a lo largo del cable.



**Figura 7.** Sección del elemento sensor instalado en la presa de Soto Terroba (Rioja).

## 4. Conclusiones

El recrecimiento de la presa de Yesa se encuentra en fase de construcción y por lo tanto todavía no se ha podido proceder al llenado hasta la nueva cota de máximo nivel de explotación y comprobar la eficacia del sistema de auscultación instalado.

Los análisis realizados en el laboratorio con la FO han podido registrar niveles de detección lo suficientemente sensibles como para realizar la fase de instalación definitiva con la

suficiente confianza y confirman la viabilidad técnica del sistema de detección de fugas mediante FO para las presas de materiales sueltos.

En esta fase de desarrollo de la metodología la medición de las filtraciones es cualitativa no obstante, en fase de explotación de la presa, será posible estimar la gravedad de la fuga en base a la magnitud de los gradientes térmicos detectados y a la longitud de fibra afectada por la detección de la fuga.

Con respecto a otras experiencias similares llevadas a cabo por los autores de este trabajo, hay que destacar las mejoras introducidas por una nueva tipología de cable de FO

## Referencias

*Aufleger M., Conrad M., Goltz M., Perzmaier S., Pablo Porras. 2007. Innovative Dam Monitoring Tools Based on Distributed Temperature Measurement . Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 1, No. 1, 2007*

*Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (CICCP) 2004. Auscultación de las presas y sus cimientos. Guías Técnicas de Seguridad de Presas. Comité Español de Grandes Presas. Servicios de Publicaciones del CICCP. ISBN 84-380-0277-3.*

*Khan A. A., Cunat P., Beck Y. L., Mars J. I., Vraibe V., Fabre J-P. 2010. Distributed fiber optic temperature sensors for leakage detection in hydraulic structures. Proceedings 5th World Conference on Structural Control and Monitoring. Shinjuku, Tokio, Japón.*

*Muñoz O., Gómez R., Russo B., Sánchez J. C. (2013). Detección de fugas en presas de materiales sueltos mediante sensores distribuidos en fibra óptica. III Jornadas de Ingeniería del Agua. Valencia, octubre 2013.*

*Nikles M., Vogel B. Briffod F., Grosswig S., Sauser F., Luebbecke S., Bals A., Pfeiffer T. 2004. Proceeding of the 11th SPIE Annual International Conference Symposium on Smart Structures and Materials. San Diego, California, EE.UU.*