

Sistema de detección de fugas en tiempo real en presas de materiales sueltos mediante sensores distribuidos en fibra óptica

Real time leak detection system in earth dams using distributed sensors based on optic fiber

Muñoz, O.^{a1}, Gómez, R.^b, Russo, B.^{c1}, Sánchez, J. C.^{a2,c2}

^aTecnalia Research & Innovation, Ronda de San Juan Bosco, s/n, 50100, La Almunia de Doña Godina, Zaragoza, España. E-mail: ^{a1} oscar.munoz@tecnalia.com, ^{a2} jcarlos.sanchez@tecnalia.com.

^bConfederación Hidrográfica del Ebro (CHE), Paseo Sagasta, 24-28, 50006, Zaragoza, España. E-mail: rgomez@chebro.es.

^cGrupo de Investigación de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GIHA), Escuela Politécnica de La Almunia (EUPLA) (Universidad de Zaragoza), Calle Mayor s/n, 50100, La Almunia de Doña Godina, Zaragoza, España. E-mail: ^{c1} brusso@unizar.es, ^{c2} jucasan@unizar.es

Recibido: 17/12/2015

Aceptado: 28/03/2016

Publicado: 29/04/2016

RESUMEN

El presente trabajo pretende analizar el uso de fibra óptica como sensor de temperatura distribuido para la detección de posibles fugas en presas de materiales sueltos. El uso de esta técnica permite complementar los sistemas de auscultación normalmente utilizados mejorando la monitorización de las zonas críticas de la infraestructura. Este tipo de sistema de monitorización en tiempo real ha sido implementado en dos casos reales, (presa de Soto-Terroba y recrecimiento de la presa de Yesa). Finalmente este trabajo quiere proporcionar una visión práctica sobre esta nueva técnica implementada y en particular sobre los criterios de selección de materiales y las precauciones necesarias a la hora del despliegue del elemento sensor.

Palabras clave | Auscultación de presas; Sensores de temperatura distribuidos en fibra óptica, (DTS); cable DTS; detección de fugas en presas.

ABSTRACT

The present paper examines the use of optic fiber as a distributed temperature sensor to leakage detection on earth dams. This technique allows complement the current auscultation systems improving the way of monitoring of this kind of critical infrastructures. This type of real time monitoring system has been implemented on two real cases (Soto-Terroba and Yesa earth dams). The aim of this work is to provide a practical vision about this novel and promising technique, and particularly on the criteria to select the adequate materials and the precautions to be taken into account in order to deploy correctly the sensor element.

Key words | Dams auscultation; Distributed temperature sensor, (DTS); DTS Cable; Leakage detection.

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 inviable 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 palie las carencias descritas anteriormente (Nickles *et al.*, 2004; Aufleger *et al.*, 2007; Khan *et al.*, 2010).

Esta técnica ha sido implementada en la presa de Soto-Terroba en la Rioja y en el recrecimiento del embalse de Yesa en Navarra con objeto de mejorar las capacidades de monitorización de la infraestructura. Debido a la peculiaridad del diseño del recrecimiento de la presa de Yesa y a la nueva tecnología a implementar, los puntos principales de esta implementación se han centrado en la estrategia de localización 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 Soto-Terroba (Muñoz *et al.*, 2013) y en el recrecimiento de Yesa.

La finalidad de este apartado es suministrar suficientes antecedentes para que se presenten los conocimientos alcanzados en este ámbito, se puedan comprender los objetivos del estudio y se puedan evaluar sus resultados.

SISTEMA DISTRIBUIDO DE SENSORES BASADO EN FIBRA ÓPTICA

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 detectar variaciones de temperatura provocadas por la filtración del agua a través de una fisura. Esta aplicación se basa en lo que se conoce como efecto RAMAN y necesita de un interrogador de fibra óptica para extraer la señal de la misma.

Efecto RAMAN

La tecnología basada en el efecto RAMAN se basa sobre la idea de aprovechar un pulso óptico generado por láser 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 de medida se realiza mediante el análisis del “tiempo de vuelo” de la señal láser y su precisión de medida puede rondar entre 0.5 y 2 m, o lo que es lo mismo para cada 100 m de fibra óptica se dispondría como máximo de 200 “sensores” o “puntos de medida” de temperatura.

La luz generada por el emisor láser, cuya longitud de onda es única, se propaga por la fibra óptica provocando dos efectos de retorno denominados reflexión y dispersión, (comúnmente llamado “scattering”). El primero de los efectos denominado Rayleigh posee una longitud de onda igual que la propagada por el láser y su amplitud de señal está muy por encima de los efectos de dispersión. Por otra parte, el efecto “scattering” retorna al inicio de la fibra óptica diferentes componentes en longitud de onda (ver Figura 1), los cuales proporcionan información susceptible de analizar para el cálculo de magnitudes a aplicar. Dichas componentes son:

- *Bandas de Brillouin.* Muy cercanas a la longitud de onda Rayleigh y por consecuencia muy difíciles de filtrar. Estas bandas aportan información no sólo de temperatura sino que además son sensibles a la deformación de la propia fibra óptica. Aunque existen equipos que trabajan en estas bandas su coste de implementación es muy superior a su equivalente RAMAN.
- *Bandas de RAMAN.* Denominadas “Strokes” y “Anti-Strokes”, sus longitudes de onda están lo suficientemente separadas de la banda Rayleigh como para que la implementación física de los filtros sea mucho más factible que los necesarios para las bandas de Brillouin. De estos dos tipos de banda, la denominada como “Anti-Strokes” es muy dependiente de la temperatura y por defecto es la referencia a través de la cual se calcula la temperatura de la fibra óptica.

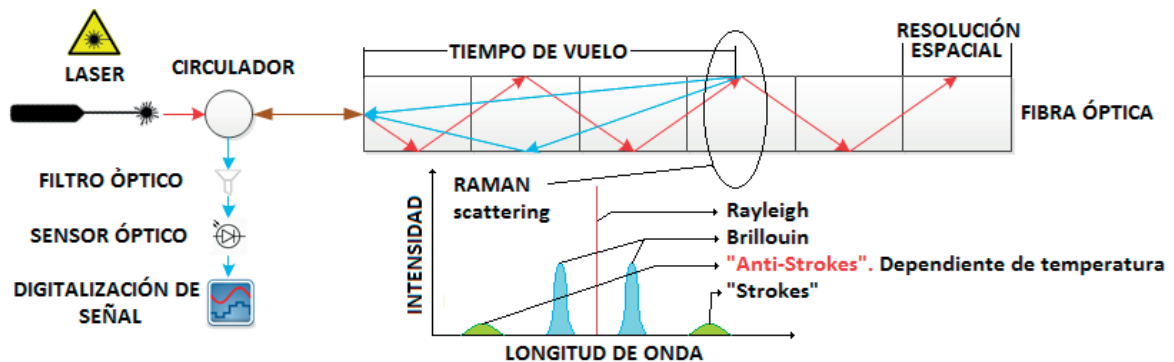


Figura 1 | Topología de lectura basado en el efecto RAMAN.

El método más común para la transformación de longitud de onda a medida de temperatura es el consistente en la utilización de las magnitudes de ambas bandas RAMAN, (Strokes y Anti-Strokes), siendo este procedimiento el más preciso y estable pero más costoso de implementar debido a la necesidad de implementación de filtros por cada banda RAMAN. Otros procedimientos abarcan la medida con únicamente la medida de Anti-Strokes ó conjugando Anti-Strokes con Rayleigh mejorando el coste del equipo pero restando capacidades de medición respecto a la otra opción comentada.

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 m 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 deben 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.

Cable DTS

El cable de sensor distribuido de temperatura (conocido como *Distributed Temperature Sensor*, 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.

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” (ver Figura 3). 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:

AT. Gradiente de Temperatura. Diferencia entre la temperatura inicial del test y la temperatura máxima alcanzada en el punto de medida.

ΔH . *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 (ver Figura 2).

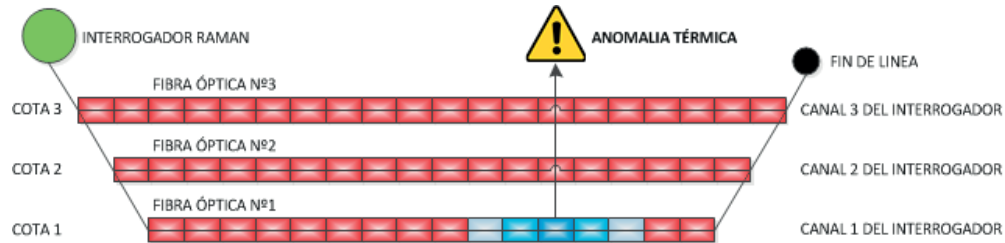


Figura 2 | Ejemplo de detección de anomalía térmica.

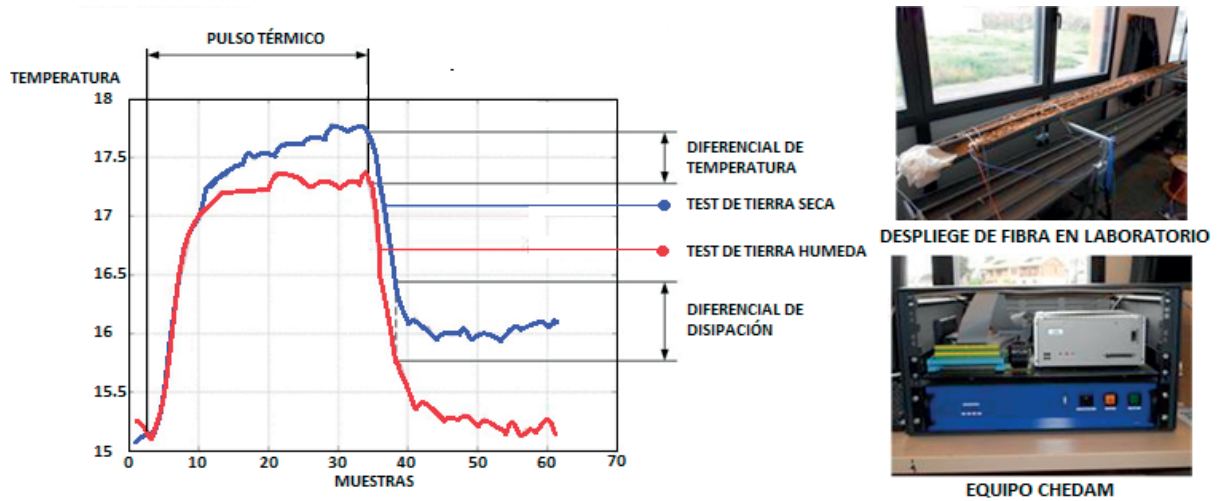


Figura 3 | Respuesta de punto de medida ante pulso térmico. Pruebas de laboratorio.

CASO DE ESTUDIO I: PRESA DE SOTO-TERROBA

Contexto actual

La presa de Soto-Terroba (ver Figura 4) es una presa de materiales sueltos homogénea con pantalla asfáltica de 45.6 m de altura y 356 m de longitud de coronación, que se ha construido en la Rioja sobre el Río Leza con una capacidad de almacenamiento de 8.14 hm³.

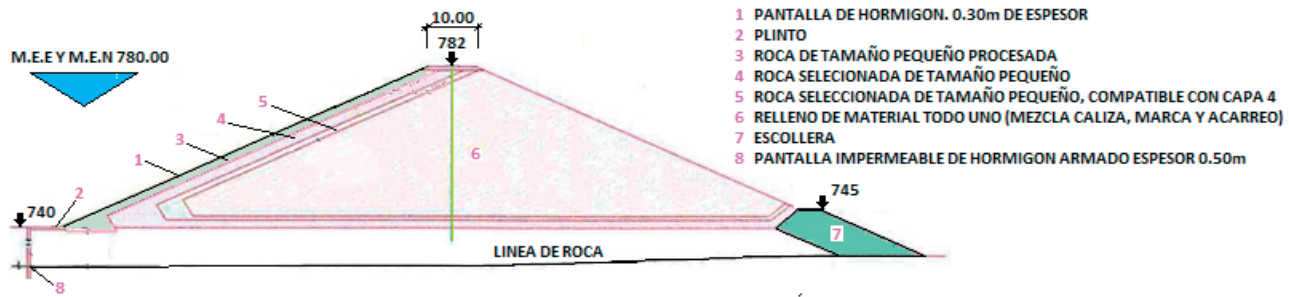


Figura 4 | Presa de Soto-Terroba.

Descripción de la instalación

La distribución de la monitorización de las posibles filtraciones en el cuerpo de la presa de Soto-Terroba se ha realizado mediante el despliegue de tres ramales de fibra óptica junto con un par de cobre de manera que en su conjunto forma el sistema de monitorización. Debido a que los elementos instalados carecen de protección mecánica suficiente ante los posibles esfuerzos a los que pueden ser sometidos en su instalación, se procedió a envolver los mencionados cables con fibra geotextil (ver Figura 5).

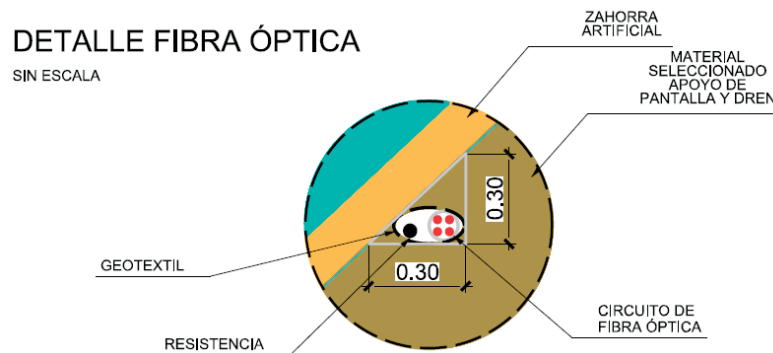


Figura 5 | Detalle de la instalación del cable DTS en la presa de Soto-Terroba.

Los ramales se disponen a diferentes cotas dentro de la infraestructura estando el primero de los mismos en una cota próxima a la base de la presa. La situación de los siguientes tendidos del cable DTS se encuentra a cotas superiores con una separación aproximada de 5 metros.

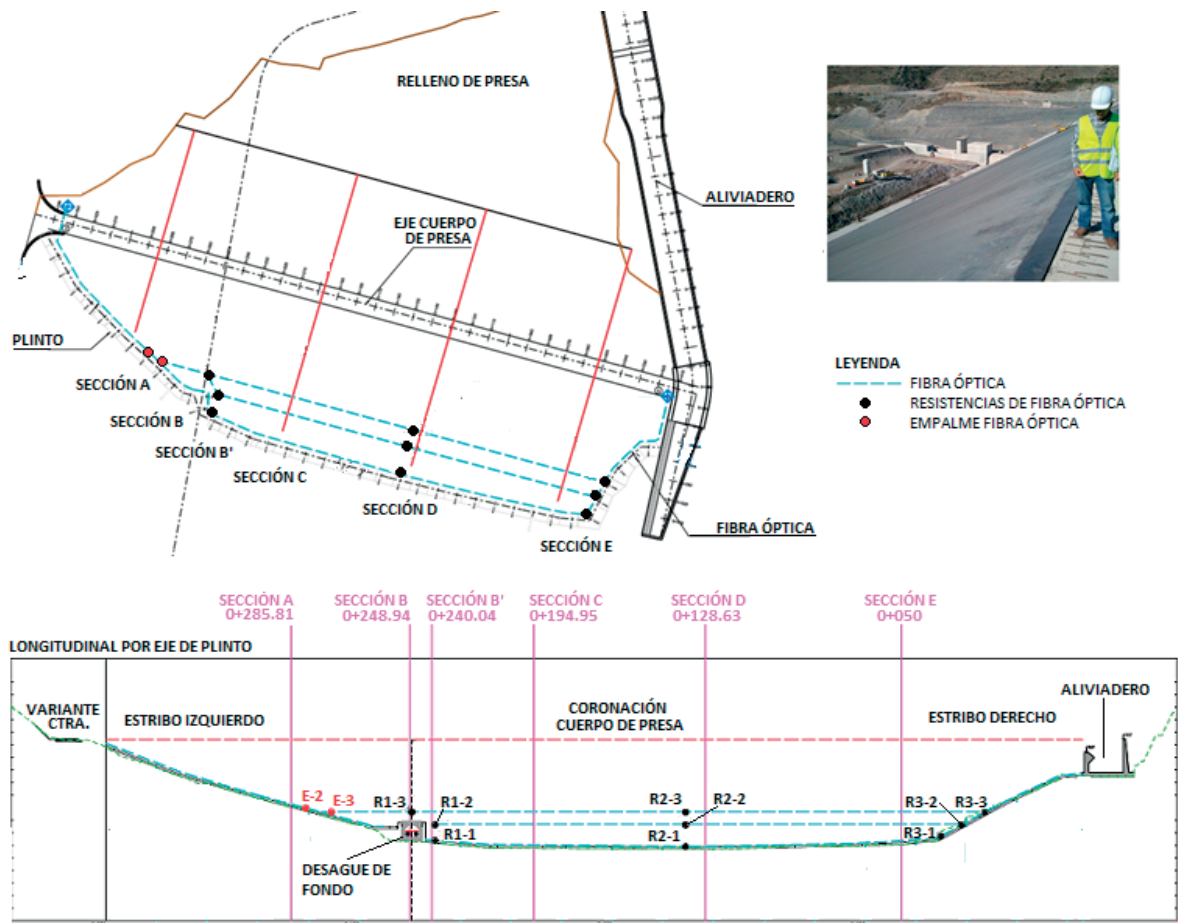


Figura 6 | Distribución del cable DTS en el cuerpo de la presa.

A pesar de las precauciones en el montaje del cable DTS durante el ciclo de instalación y posterior recubrimiento, el elemento sufrió una rotura por causas de movimiento de la maquinaria de obra (ver Figura 6). Al detectarse de manera temprana se pudo proceder al empalme de los elementos siendo estos verificados una vez se completó el recubrimiento de la capa asfáltica.

También se puede apreciar la instalación de punto caliente, “resistencias de fibra óptica” (ver leyenda en Figura 6), en donde se reforzó el par de cobre con objeto de aportar un mayor gradiente térmico en dichos puntos. El objetivo de dichos puntos calientes es acotar, en las lecturas del sistema, el posicionamiento exacto de la fibra óptica a lo largo del cuerpo de la presa.

CASO DE ESTUDIO II: EL RECRECIMIENTO DE YESA

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 hm³ 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 $1.1 \cdot 10^5$ hectáreas y el nuevo suministro de agua de calidad a la ciudad de Zaragoza y su entorno (con más de $8 \cdot 10^5$ habitantes), se ha hecho necesario proceder a su recrecimiento para disponer de 1079 hm^3 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 (ver Figura 7), 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.

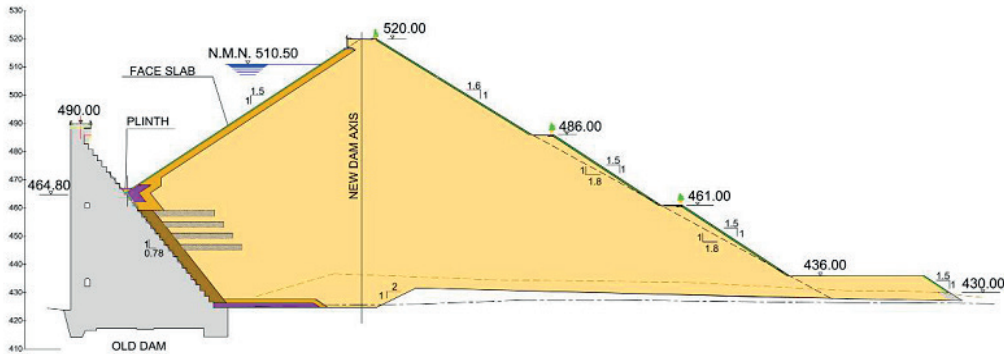


Figura 7 | Representación del recrecimiento de la presa de Yesa y del cuerpo de gravedad original.

Descripción de la instalación

La distribución del cable DTS en la presa de Yesa (ver Figura 8 y 9) 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 7, 8 y 9).

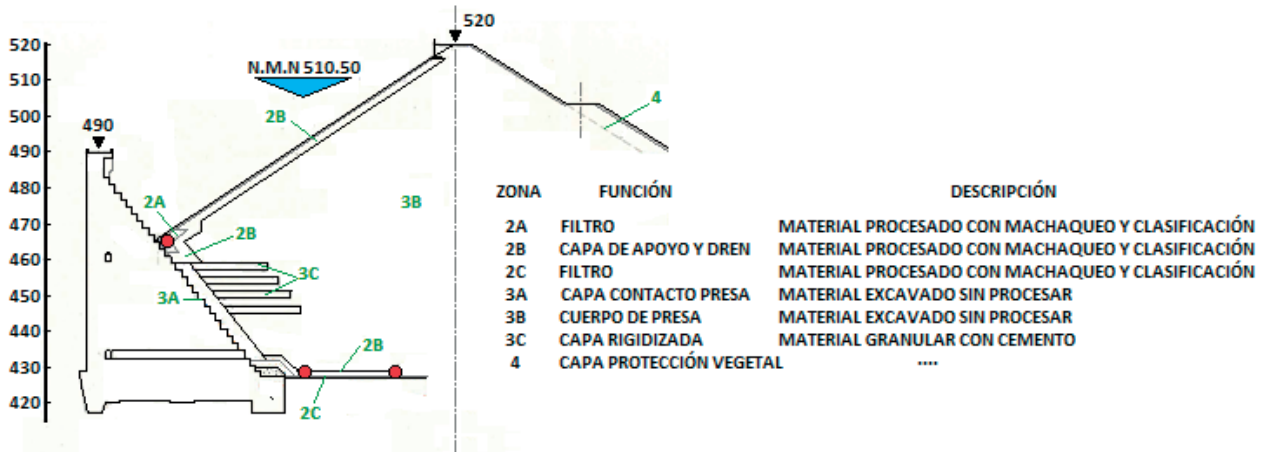


Figura 8 | Cuerpo de la presa y detalle del sistema de auscultación. En rojo se representan los tres cables DTS distribuidos por las zonas más críticas de la infraestructura.

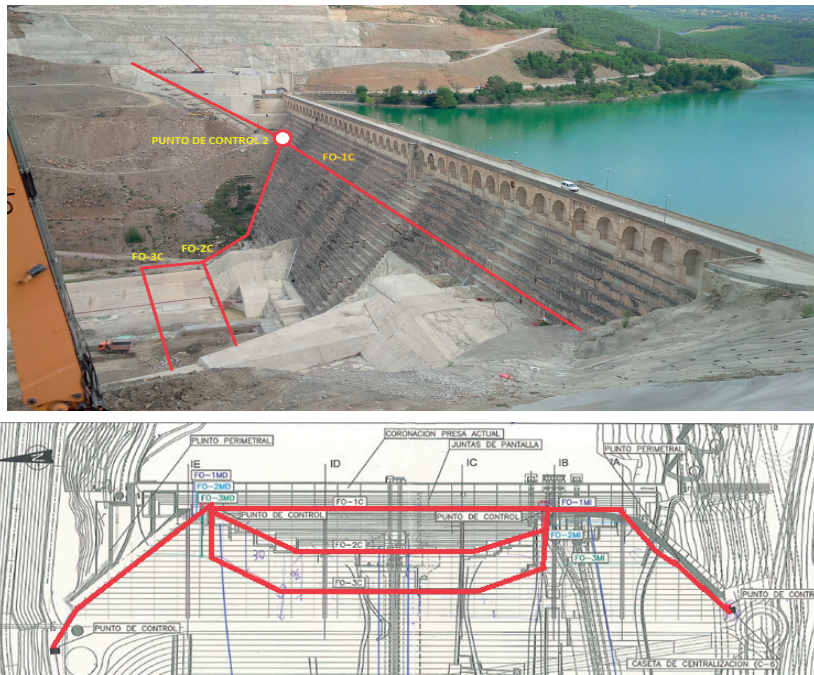


Figura 9 | Distribución del cable DTS en la presa de Yesa.

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 en la presa de Yesa (ver Figuras 9 y 10).

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 en el recrecimiento de la presa de Yesa. Dicho procedimiento integra además los planes de contingencia ante rotura parcial o total de los ramales.

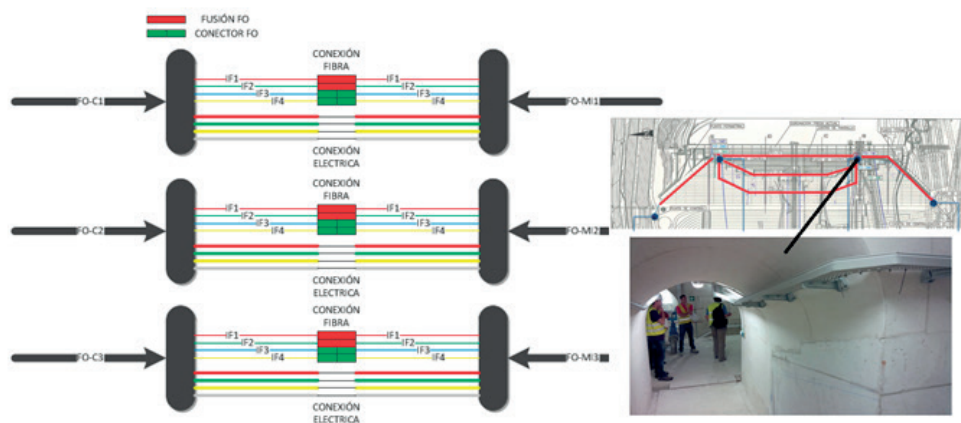


Figura 10 | Unión de los ramales en punto de control 3.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Cable DTS

El cable híbrido de fibra óptica del sistema incorporado en la presa de Yesa (ver Figura 11) se compone de tres partes principales: la primera la conforma el elemento principal del sensor de FO, compuesto por 4 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 11 | Sección del cable DTS.

Al contrario que la instalación del sistema 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 (ver Figura 12), 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.

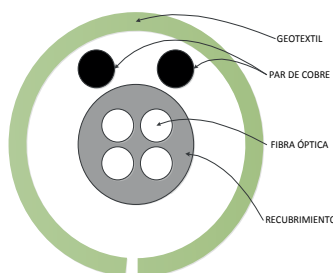


Figura 12 | Sección del elemento sensor instalado en la presa de Soto Terroba.

Instalación

Debido a que el diseño de las infraestructuras de los casos de estudio mencionados son diferentes, la instalación del sistema dentro de las mismas también difiere en lo relativo a la disposición e instalación del cable DTS. La principal diferencia entre ambas reside en que en Soto-Terroba la instalación del elemento pudo ser completada en una única fase evitando así la realización de empalmes del cable, en Yesa sin embargo es necesario el uso de puntos de control a través de los cuales se instala la fibra progresivamente según la construcción de la presa se vaya elevando.

Por consiguiente se puede afirmar que la instalación de un sistema de estas características depende, en gran medida, del emplazamiento deseado del cable DTS (buscando siempre las áreas más vulnerables a filtraciones en la infraestructura), y sobre todo del proceso de construcción de la misma. Así pues se considera necesaria la elaboración de un plan detallado de la instalación del sistema así como un plan de contingencia ante cualquier contratiempo que puede surgir.

Incidencias

En ambos casos de estudio se han producido incidencias en la instalación del sistema en lo relativo al emplazamiento de elemento DTS. Afortunadamente todas las roturas de cable se han detectado al instante y han podido ser reparadas *in situ*.

Análisis de la medida

Tal y como se ha comentado en el apartado sobre la instalación, las infraestructuras son completamente diferentes entre sí y la disposición de los elementos de monitorización está situada en áreas distintas con lo que el tratamiento de los datos generados por el sistema deberá de ser diferente según la instalación en donde se emplace el sistema.

En un primer nivel de procesamiento de datos, la única diferencia del procesado de dichos datos en ambas infraestructuras será lógicamente la distribución de los puntos de medida. De esta manera consideraremos como fuga dentro de una de estas infraestructuras la localización de un punto en donde el gradiente térmico generado por la lectura sea inferior a la de sus puntos vecinos más próximos.

La instalación del sistema abre un abanico de posibilidades en lo referido a la evolución del estado de la infraestructura a lo largo del tiempo. Como se ha comentado en el párrafo anterior, la medida principal se basa en un análisis diferencial de temperatura entre puntos colindantes evitando la medida absoluta de las temperaturas propias de la fibra, las cuales puede variar considerablemente según el elemento sensor se encuentre por ejemplo por debajo del nivel de agua o por encima soportando un impacto a la luz solar indirecto. El análisis no diferencial no está contemplado en este estudio, no obstante podría ser de interés el análisis temporal de evolución de las temperaturas absolutas a lo largo de toda la fibra con objeto de extraer patrones de comportamiento de las infraestructuras según se vayan dando condiciones externas diferentes como por ejemplo ciclos de temperatura diurnos o estacionales.

CONCLUSIONES

Este trabajo proporciona datos relativos a dos sistemas de monitorización en tiempo real de fuga en presas de materiales sueltos basados en fibra óptica (FO).

La FO asociada a un interrogador permite disponer de un sensor de detección de fugas distribuido. La técnica empleada se basa en el efecto conocido en optoelectrónica como RAMAN.

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 longitud de fibra afectada por la detección de la fuga.

REFERENCIAS

- Aufleger M., Conrad M., Goltz M., Perzlmaier S., Pablo Porras. (2007). Innovative Dam Monitoring Tools Based on Distributed Temperature Measurement. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 1(1), 29-37.
- 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., Sausser 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.