

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## NUEVAS TECNOLOGÍAS DE AUSCULTACIÓN

Jürgen Fleitz<sup>1</sup>

Stefan Hoppe<sup>2</sup>

*RESUMEN: A lo largo de los últimos 20 años se han realizado muchos trabajos de investigación en el campo de auscultación de presas con el fin de desarrollar métodos complementarios a los convencionales. Hay varios ejemplos de sistemas y equipos novedosos, que ya se aplican con éxito en varios países, especialmente para el control de filtraciones, como los métodos de medición de temperatura, resistividad y autopotencial.*

*En este artículo se presenta el método de medición de temperatura para el control de filtraciones. Se trata de detectar de una forma indirecta la presencia de filtraciones en el cuerpo de la presa y sus cimientos, localizarlas y cuantificar caudales.*

*También se describe un nuevo enfoque en el ámbito de sistemas de auscultación. En la mayoría de las presas se realizan controles puntuales en secciones y cotas determinadas, que en algunos casos no aportan información suficiente para evaluar el comportamiento global de la estructura. El uso de sistemas distribuidos permite obtener información no sólo en puntos aislados sino en una red o una línea continua que cubre la presa entera. Como ejemplo, se describe el funcionamiento de fibra óptica que permite medir temperaturas y deformaciones. De este modo, el propio cable actúa como sensor, facilitando datos a lo largo del desarrollo del cable.*

---

<sup>1</sup> Ingeniero de Caminos. OFITECO

<sup>2</sup> Ingeniero de Caminos. OFITECO

# 1. INTRODUCCIÓN

Muchos tipos de los sensores que se desarrollaron hace más de 30 años se suelen usar todavía, tanto en estructuras antiguas como en obras nuevas. Con la experiencia obtenida con estos aparatos se pudo optimizar su funcionamiento y fiabilidad, mejorando los materiales de fabricación y el método de instalación. La experiencia muestra que la mayoría de los aparatos funciona bien, siempre que esté instalado correctamente y mantenido con periodicidad adecuada.

Durante los últimos 10 años, los avances más destacables en sistemas de auscultación de presas se hicieron en el campo de la automatización, mientras que la tecnología de los sensores para el control de las variables como temperatura, movimientos, presiones, deformaciones y filtraciones que se instalaron en las presas no ha cambiado significativamente. El progreso en la tecnología de información y telecomunicación permitió la automatización de los datos de auscultación y el acceso a los datos en tiempo real, no sólo en la misma presa o en una oficina central, sino también vía Internet desde cualquier ordenador.

A pesar de los progresos alcanzados durante las últimas décadas, todavía existe la necesidad de optimizar la auscultación de presas con el fin de obtener más información sobre el comportamiento de las mismas. Especialmente son las nuevas tecnologías aplicadas con éxito en otros campos de la industria, las que ofrecen posibilidades adicionales para la auscultación de presas.

En este artículo se presentan las características de una “auscultación distribuida” y como ejemplo se describe el funcionamiento y las posibilidades de aplicación de los sensores de fibra óptica. También se presentan los métodos de detección de filtraciones a través de la medición de temperatura y resistividad.

No se trata de ofrecer un estado del arte en los campos presentados, ni una recomendación de una tecnología en particular, sino de mostrar nuevas ideas y posibilidades en el campo de auscultación.

## 2. AUSCULTACIÓN DISTRIBUIDA

### 2.1. GENERALIDADES

El proyecto de auscultación define magnitudes y parámetros a controlar y la ubicación exacta de los sensores. El diseño del sistema de auscultación requiere amplios conocimientos de las características de la presa y su cimentación y debe estar orientado a la detección temprana de los potenciales mecanismos de fallo. Con los sistemas convencionales de auscultación se suele controlar el comportamiento de una presa en ubicaciones precisas en secciones transversales determinadas. La información proporcionada es de carácter puntual o en algunos casos acumulada (por ejemplo en el caso de las filtraciones).

Este hecho condiciona la representatividad de la información obtenida y limita la detección temprana de posibles anomalías. Por estos motivos se presenta un nuevo concepto de una auscultación distribuida.

El tipo de auscultación distribuida más simple es la inspección visual, ya que permite obtener información sobre la presa en todas sus zonas visibles, especialmente paramentos y galerías. Sin embargo, la información obtenida es sobre todo cualitativa y no cuantitativa.

Con los sensores tradicionales es casi imposible establecer una auscultación distribuida porque no sólo los costes serían desproporcionadamente altos, sino que también existen factores prácticos, como un impacto grave en el avance de las obras, el tendido de cables y un posterior trabajo excesivo en la evaluación de los datos.

Para auscultar movimientos de forma distribuida, se puede utilizar la tecnología de láser scanning, fotogrametría y radar. Estos métodos son muy eficaces para detectar movimientos en laderas y anomalías en presas de materiales sueltos, pero todavía no tienen la precisión suficiente para controlar los movimientos habituales de una presa de hormigón a lo largo del año. Si se usa el láser scanning o la fotogrametría de forma terrestre, se puede alcanzar una mayor precisión. También una combinación de ambos métodos aporta mejores resultados.

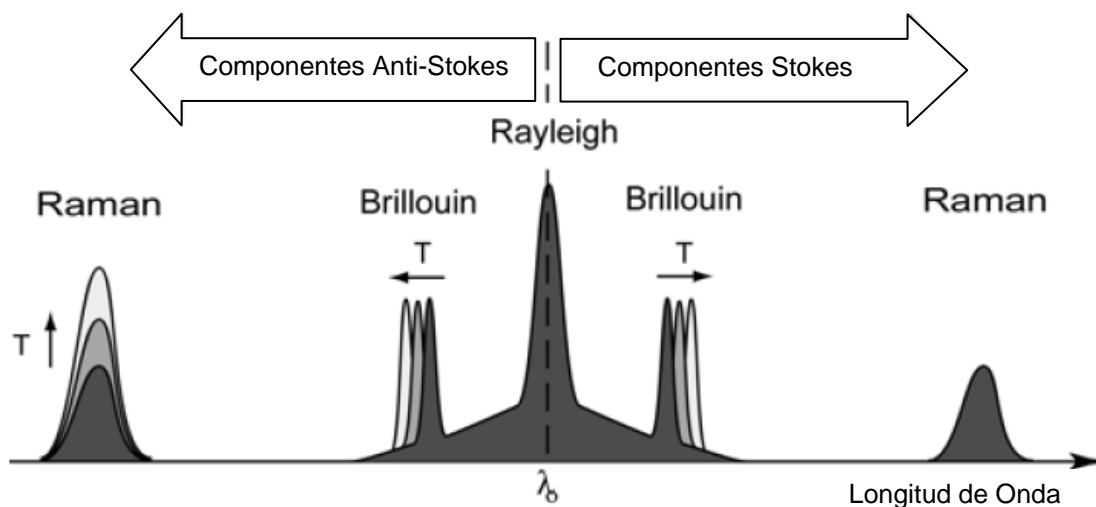
Otra tecnología es la aplicación de la fibra óptica como sensor, que permite la medición de deformaciones y temperaturas y la detección de filtraciones. Esta tecnología se presenta con más detalle en el capítulo a continuación.

## 2.2. APLICACIONES DE FIBRA ÓPTICA A LA AUSCULTACIÓN DE PRESAS

El uso habitual de la fibra óptica en presas es para la transmisión de datos, especialmente en sistemas automatizados. Aunque, las propiedades de la fibra permiten usarla también como sensor, facilitando datos a lo largo del desarrollo del cable. La medición se realiza mediante un impulso óptico en la fibra que se genera con un láser y la espectrografía de la retrodispersión. Las propiedades de la luz reflectada cambian en función de la temperatura y la deformación de la fibra óptica en el punto de dispersión.

En la luz reflectada se encuentra, aparte de la luz Rayleigh, que forma la mayor parte, la luz Raman y Brillouin. El desfase y la intensidad de la retrodispersión de la luz Brillouin dependen de la temperatura y la deformación, mientras que la intensidad de la luz Raman sólo de la temperatura. Calculando el coeficiente de las intensidades Stokes y Antistokes se obtiene la temperatura en la fibra. En la figura 1 se muestra un esquema del espectro de la dispersión de luz de una longitud de onda en una fibra óptica. Un aumento de la temperatura tiene un efecto tanto en los componentes Raman como Brillouin.

Figura 1. Representación esquemática del espectro de la dispersión de luz en una fibra óptica.



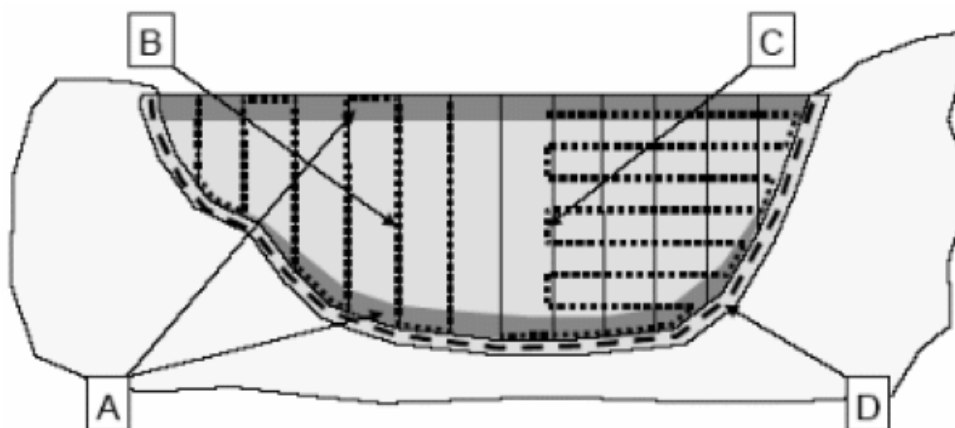
En general, se obtienen datos de lectura de cada 1 a 2 m, pero se puede alcanzar una resolución de hasta 0,5 m. La exactitud de la lectura depende del método aplicado, la duración de la lectura y la distancia del punto de medición al aparato de lectura, alcanzando precisiones de 0,05 °C (temperatura) o 10  $\mu\text{e}$  (deformación). Con el efecto Raman es posible obtener datos hasta una longitud de 10 km, mientras con la tecnología basada en Brillouin serían de más de 50 km.

La tecnología no sólo se ha aplicado con éxito en campos de la ingeniería civil, como por ejemplo la detección de incendios en túneles o el control de deformaciones en puentes, sino también en el campo de las presas. Es un método muy útil para el control de temperaturas en presas de hormigón.

El enfoque actual de los esfuerzos de investigación se centra en el control de deformaciones y la detección y control de fisuras y grietas. Se han instalado sensores de fibra óptica en varias presas de materiales sueltos para medir deformaciones y en presas de hormigón compactado por rodillo para la detección de grietas.

Otro campo de aplicación importante es la detección de filtraciones a través de la medición de temperatura (véase cap.3.1). De esta manera se puede controlar la estanqueidad de juntas y sistemas de impermeabilización como núcleos de arcilla, geomembranas o pantallas de hormigón. La figura 2 muestra posibles ubicaciones del cable para una presa de escollera con pantalla de hormigón.

Figura 2: Tendido de cable en una presa de escollera con pantalla de hormigón



A – zona de tensión

C – control de losas de la pantalla de hormigón

B – control de juntas verticales

D – control de la junta perimetral

### 3. DETECCIÓN DE FILTRACIONES

#### 3.1. MEDICIÓN DE TEMPERATURA

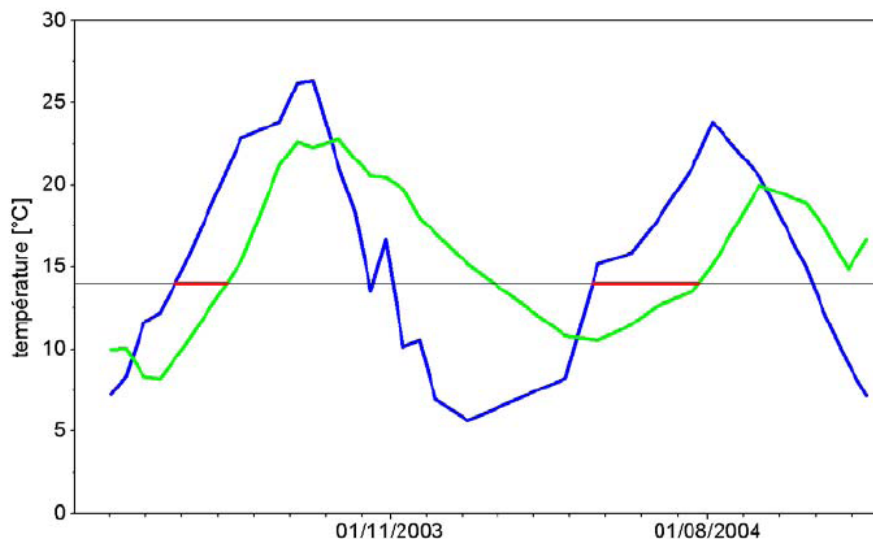
La temperatura en el cuerpo y la cimentación de una presa suele ser distinta a la del embalse. En el caso de que se produzca una filtración desde el embalse, no sólo se efectúa un transporte del agua sino también una transmisión de calor por convección del agua a la presa. A partir de una velocidad de flujo de desde  $10^{-6}$  m/s hasta  $10^{-7}$  m/s, el transporte térmico advectivo sobrepasa el porcentaje conductivo. De esta manera, la distribución de temperatura en la zona de la filtración se adapta a la del agua. A través de la medición de este cambio térmico se pueden detectar las filtraciones usando el agua como trazador.

El método clásico es la instalación de termómetros convencionales. En función del tamaño de la zona a controlar, es necesario instalar una gran cantidad de termómetros para poder detectar cambios locales en el comportamiento térmico de una estructura. Esta solución puede resultar muy costosa y laboriosa. Por ello, se ha desarrollado el método de control distribuido de temperatura mediante fibra óptica.

La evaluación de las temperaturas medidas se puede hacer de dos formas distintas: Temporalmente y localmente. Si se dispone de muchos datos de varios años, se puede controlar la evolución temporal de la temperatura, teniendo en cuenta los cambios térmicos estacionales en el cuerpo de la presa. De esta manera se pueden identificar anomalías en el comportamiento térmico habitual en todos los puntos controlados. Un aumento de las filtraciones se refleja por un lado en un aumento de la variación estacional y por otro, en una disminución del desfase temporal entre la temperatura en la presa y el embalse. Este tipo de análisis se puede hacer con un sistema compuesto tanto por termómetros convencionales como con fibra óptica.

En la figura 3 se muestra la variación anual de temperaturas medidas en un dique. Se puede observar un aumento del desfase (línea roja) y una disminución de la variación estacional que indican una disminución de las filtraciones.

Figura 3: Temperaturas medidas en el dique (verde) y el agua (azul)



En el caso de que se controlen las temperaturas con fibra óptica, la información se obtiene de forma distribuida a lo largo de todo el tendido de cable. Se han desarrollado dos métodos para medir con fibra óptica: el método de gradiente y el método de calentamiento (heat-pulse).

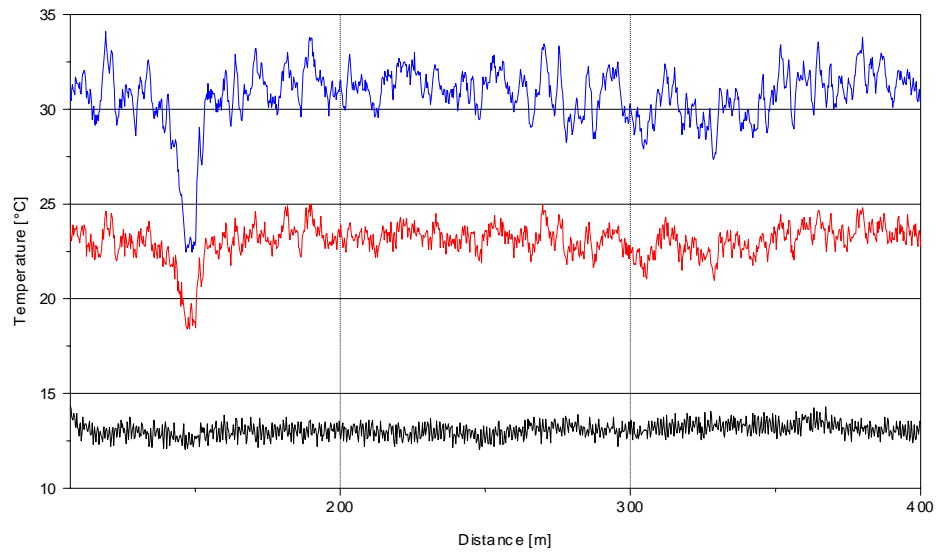
El método de gradiente se usa si hay un gradiente térmico suficientemente alto entre el punto de medida y el embalse. Para garantizar esto, es necesario mantener una distancia mínima entre la fibra óptica y el embalse.

Si el gradiente es muy pequeño, como suele ocurrir en zonas que están muy cerca al embalse (como por ejemplo directamente detrás de una geomembrana o una losa de hormigón), se usa un cable híbrido compuesto por la fibra óptica y un conductor. Mediante corriente eléctrica se puede calentar la zona cerca del cable a través del conductor. De esta manera se crea un gradiente térmico artificial entre la zona controlada y el embalse. Si existe un flujo de agua que conlleve un transporte térmico convectivo más alto que el transporte térmico conductivo ( $v > 10^{-7}$  m/s aprox.), se puede localizar la filtración durante el proceso de calentamiento o enfriamiento.

El método de calentamiento se usa especialmente para controlar la estanqueidad de juntas y sistemas de impermeabilización que tienen un contacto directo con el embalse. Además, también en zonas con un gradiente suficientemente alto, se pueden obtener datos más exactos que con el método de gradiente.

En la figura 4 se muestra la distribución de temperaturas a lo largo de un dique de materiales sueltos con una pantalla superficial de impermeabilización de asfalto antes y durante el proceso de calentamiento. A una distancia de aproximadamente 100 m se observa una anomalía en el comportamiento térmico, que indica la existencia de una fuga.

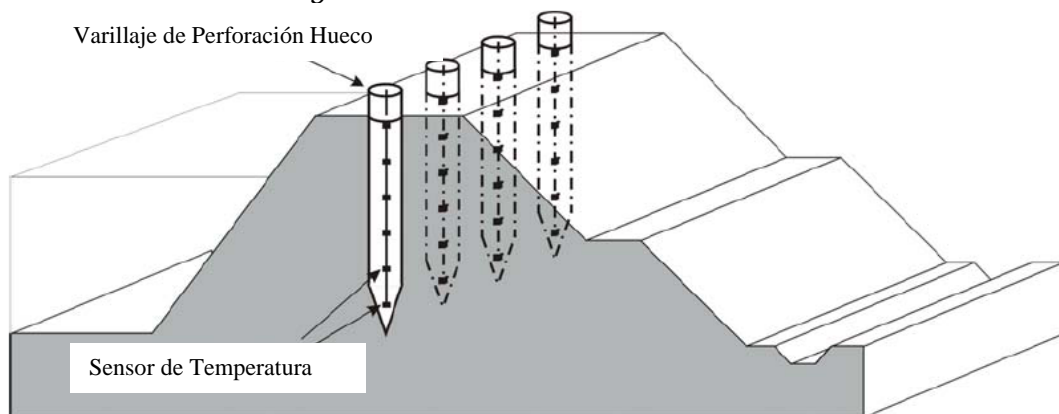
Figura 4: Distribución de temperatura a lo largo del cable de fibra óptica antes del calentamiento (línea negra) y durante 2 diferentes momentos durante el calentamiento (línea roja y azul).



Una alternativa, especialmente indicada en presas existentes donde una colocación posterior de un cable de fibra óptica resulta ser difícil, es el método convencional de la medición de temperatura en situ. Aparte de la instalación de sensores en pozos o sondeos convencionales, se ha desarrollado la técnica del sondeo térmico que permite medir temperaturas en presas de materiales sueltos hasta una profundidad de 30 m (véase figura 5).

Para colocar los sensores de medición se encaja primero un varillaje de perforación hueco y con rosca hasta la profundidad en la que se desea medir. A continuación se introduce un cable en el varillaje que contiene varios sensores térmicos. Después de un breve momento de asimilación se miden simultáneamente las temperaturas del suelo en diferentes profundidades con un aparato de precisión portátil. Este sistema facilita poder detectar tanto los límites horizontales como los verticales de las infiltraciones.

Figura 5: Método del sondeo térmico



### 3.2. RESISTIVIDAD

El método de resistividad es un método geofísico para analizar las propiedades del subsuelo a través de la medición de su resistividad eléctrica. El campo de aplicación es muy amplio pero se utiliza básicamente en la hidrogeología para la delimitación de aguas subterráneas y en la ingeniería civil para estudios del subsuelo. Su aplicación a la auscultación de presas es poco frecuente pero podría ser de utilidad especialmente en las presas de materiales sueltos.

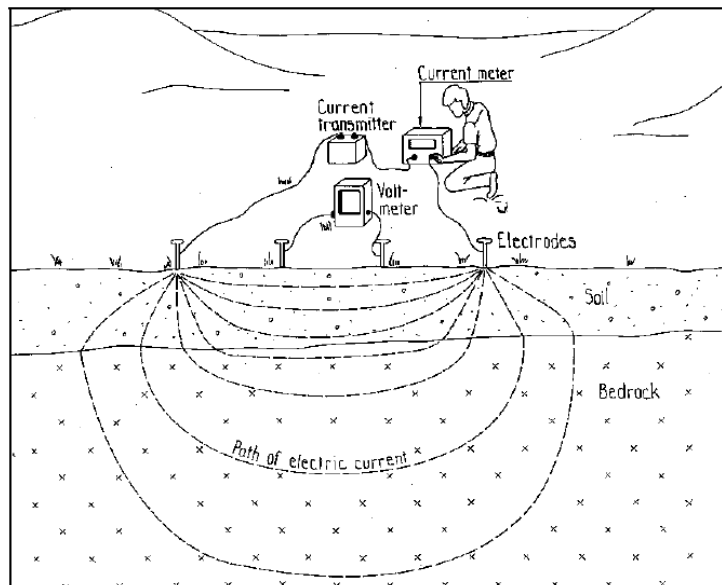
La conducción eléctrica en materiales geológicos es principalmente electro-lítico, con lo cual la cantidad y las propiedades del agua determinan básicamente la resistividad. Por lo tanto, la porosidad del material y la resistividad del agua son los factores más importantes. Además, la existencia de materiales arcillosos juega un papel importante.

Cambios de resistividad en presas de materiales sueltos dependen básicamente de la variación estacional provocada por filtraciones y el cambio de las características eléctricas del suelo que puedan ser causadas por erosión interna.

La resistividad cambia de una forma muy parecida a la de las variaciones estacionales de temperatura en el cuerpo de una presa. La temperatura es el factor más importante en los cambios estacionales de resistividad, pero también influye la cantidad de sólidos disueltos en las filtraciones. Asimismo, en el caso de que se produzca una erosión interna, el cambio local de la granulometría y porosidad del material altera la resistividad.

La configuración de un sistema de medición sencillo con 4 electrodos se muestra en el croquis de la figura 6. Básicamente, se usa un par de electrodos de acero para inyectar una corriente en el suelo y otro par para medir el potencial.

Figura 6: Croquis de un sistema de medición de resistividad en la superficie con 4 electrodos.





El valor medido se puede interpretar como una media ponderada de las conductividades de todos los trayectos de la corriente entre los electrodos. Cambiando las distancias entre los electrodos y manteniendo el mismo centro, se obtiene información sobre las conductividades a distintas profundidades. Con una alteración del punto central entre dos electrodos se obtiene información a lo largo de una línea horizontal. Sin embargo, de esta manera no se puede obtener directamente la resistencia de una capa determinada, porque la corriente se canaliza en regiones de menor resistencia.

Para el análisis de la resistividad en presas de materiales sueltos, se suelen examinar zonas en diferentes profundidades a lo largo del eje de la presa. Para ello, se pueden instalar varios electrodos usando un sistema automático multi-electrodo.

En función del grado de las instalaciones permanentes se distinguen entre varios sistemas. El sistema permanente incluye la instalación permanente de cables y electrodos y, si conviene, también la del sistema de medición. Un sistema semi-permanente incluye solamente la instalación de electrodos. Para hacer mediciones con un sistema móvil es necesario llevar e instalar todos los componentes necesarios a la zona de estudio.

Para obtener datos más exactos es conveniente hacer varias medidas en los mismos puntos. Esto se puede garantizar con un sistema permanente o semi-permanente. Además, la evaluación de datos de resistividad se basa principalmente en su variación con el tiempo, lo que requiere medidas durante varios años. Con una sola medida se puede detectar anomalías locales, pero con una auscultación a largo plazo se pueden encontrar anomalías en el tiempo.

Una gran ventaja del sistema es que es no destructivo, es decir, que no hace falta hacer perforaciones en la presa. Sin embargo, la instalación de electrodos en la parte baja de una presa dará información más exacta sobre la resistencia en zonas más profundas.

## 4. CONCLUSIÓN

La aplicación de tecnologías innovadoras en el campo de auscultación de presas ofrece nuevas posibilidades para mejorar el conocimiento sobre su comportamiento y garantizar su seguridad. Ampliando un control puntual por un sistema de control distribuido hace anticipar la detección de anomalías y no cuando se agraven y extienden tanto para poder ser detectadas con un sensor de control puntual. De esta forma se obtiene un mayor margen de maniobra para la evaluación y determinación de medidas correctoras, lo que redundará finalmente en un mayor nivel de seguridad y eventualmente una reducción de costes de posibles reparaciones.

Las filtraciones son los indicadores más importantes de una anomalía en una presa. A través de la medición de temperatura con fibra óptica y el método de resistividad se pueden detectar y ubicar filtraciones puntuales que no se podrían encontrar con un método convencional.

La experiencia obtenida en varias presas confirma la utilidad y efectividad de fibra óptica para el control de temperaturas y filtraciones, tanto en presas de hormigón como de materiales sueltos. Las investigaciones para el uso de

cables de fibra óptica para el control distribuido de deformaciones y detección de grietas dan buenos resultados y representan otro campo de aplicación de la fibra óptica prometedor.

## REFERENCIAS

Jürgen Dornstädter, "Investigating internal erosion - Different methods = Different results?", ICOLD workshop on internal erosion 2006

Jürgen Dornstädter, "Temperaturmessung im Wasserbau – Damminspektion und Bauwerksüberwachung", BAW Kolloquium 2003

Sam Johansson, Dan Watley, "Optical Allusions", International Water Power and Dam Construction, 2004

Mark Nikles, Bernhard Vogel, Fabien Briffod, Stephan Grosswig, Florian Sauser, Steffen Luebbecke, André Bals, Thomas Pfeiffer, "Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring", 11<sup>th</sup> SPIE Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 2004

Patrick Schäfer; Sebastián Perzlmaier, Marco Conrad, Theodor Strobl, Markus Aufleger, "Rehabilitation of dam facings monitored by an advanced technology for leakage detection", 2004

Pontus Sjødahl, "Resistivity investigation and monitoring for detection of internal erosion and anomalous seepage in embankment dams", Doctoral Thesis 2006