

## **“MONITOREO DEL TERRENO Y LAS INFRAESTRUCTURAS MEDIANTE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CASOS PRÁCTICOS.”**

**Teoría: Ing. Alicia Alpízar Barquero (1), Casos: Ing. César Sanz Bermejo (2)**

*IIG CONSULTORES, Costa Rica (1) – EPTISA IIC, España (2)*

[aalpizar@iigconsultores.com](mailto:aalpizar@iigconsultores.com); [csanz@eptisa.com](mailto:csanz@eptisa.com)

### **Resumen**

El área de la geotecnia ha tenido un gran desarrollo en el panorama mundial. Los desafíos por desarrollar obras de ingeniería cada vez más ambiciosas han forzado el avance de investigaciones y la creación de nuevas técnicas y tecnologías que atiendan las demandas del mundo moderno.

La instrumentación geotécnica es parte de estas nuevas tecnologías; y su objetivo, es monitorear el comportamiento del terreno o de obras civiles a lo largo del tiempo. Las tecnologías empleadas, permiten obtener información del comportamiento del terreno o de la estructura, y medir algunos parámetros geotécnicos que controlan el mecanismo de falla de los mismos.

Asimismo, los avances tecnológicos actuales permiten implantar sistemas de instrumentación que se pueden gestionar en remoto, permitiendo un seguimiento en tiempo real de los datos del monitoreo y la emisión de alarmas a los interlocutores seleccionados, de forma que se puedan adoptar soluciones de forma rápida y precisa.

Este tipo de sistema de investigación es el medio más eficiente para que el ingeniero encargado vigile el comportamiento de una obra y evalúe su seguridad.

Las aplicaciones más habituales serían las siguientes:

- Monitoreo de obras lineales o puntuales en entorno urbano.
- Monitoreo de obras lineales en entorno interurbano.
- Monitoreo de Estructuras de Obra hidráulica.
- Monitoreo de Estructuras de la red de Transporte.
- Monitoreo de Obras Portuarias.

## **Introducción**

El área de la geotecnia ha tenido un gran desarrollo en el panorama mundial. Los desafíos por desarrollar obras de ingeniería cada vez más ambiciosas han forzado el avance de investigaciones y la creación de nuevas técnicas y tecnologías que atiendan las demandas del mundo moderno.

La instrumentación geotécnica es parte de estas nuevas tecnologías; y su objetivo, es monitorear el comportamiento del terreno a lo largo del tiempo. Las tecnologías empleadas, permiten obtener información del comportamiento del talud y medir algunos parámetros geotécnicos que controlan el mecanismo de falla del mismo.

Para obtener un mejor aprovechamiento de estas tecnologías, se debe tener presente que como punto de partida, es necesario contar con información previa, tal como:

- Levantamiento topográfico
- Geología de detalle
- Perfil estratigráfico
- Condiciones hidrogeológicas

Algunos métodos complementarios, que brindan información al análisis, son los métodos geofísicos y principalmente la tomografía eléctrica, que ofrece mayores posibilidades de información, economía y rapidez de ejecución.

Dado todo este proceso innovador, es de nuestro interés, enfocar esta presentación en una descripción breve y concisa de los diferentes métodos que existen para llevar a cabo el monitoreo de terrenos de potencial inestabilidad, y con ello dar a conocer opciones de control, aplicables a proyectos que vayan desde simples muros de contención, hasta complejos controles de monitoreo en obras de gran escala como las presas hidroeléctricas o túneles.

## **Objetivos de la Instrumentación**

El uso de la instrumentación geotécnica, en terrenos o estructuras geotécnicas que evidencian problemas de inestabilidad, o que puedan verse afectados como consecuencia de la construcción de una obra civil; permite obtener información del comportamiento y características del terreno; además, recordemos que en la geotecnia, el desarrollo de un proyecto no puede agotarse en la fase de diseño, ya que este se define por hipótesis más o menos fiables. De allí es importante que se pueda controlar la obra mediante la:

- Determinación de la profundidad y forma de la superficie de falla en un deslizamiento activo.
- Determinación de los movimientos laterales y verticales dentro de la masa deslizada.
- Determinación de la velocidad de deslizamiento y el establecimiento de mecanismos de alarma.
- Monitoreo de la actividad de cortes o rellenos e identificación de los efectos de una determinada construcción.
- Monitoreo de los niveles de agua subterránea o presiones de poros y su correlación con la actividad del deslizamiento.
- Monitoreo y evaluación de la efectividad de los diferentes sistemas de estabilización o control.

Para que a partir de la instrumentación se pueda conocer realmente el comportamiento de una ladera u obra y se obtenga información valiosa, es necesario que el diseño contemple la medición no solo de los efectos tales como los desplazamientos, sino también las causas a través de la medición de las variables internas o causales de dicho comportamiento.

### **Requerimientos de la Instrumentación Geotécnica**

La instrumentación de terrenos u obras geotécnicas requiere de una planificación cuidadosa; enfocada siempre a brindar respuestas específicas a aspectos o preguntas concretas a cerca de las variables de potencialidad y de sus efectos.

La planificación y diseño de una instrumentación requiere de conocimiento, buen juicio, comprensión de los problemas geotécnicos, paciencia e imaginación. Es indispensable realizar un análisis del comportamiento de la ladera u obra, y de la posible falla a la cual puede estar expuesta; ya que solo así se podrá seleccionar adecuadamente, las características, tipos de instrumentos y posición de ubicación.

### **Magnitudes usualmente sujetas a control**

Los sistemas de monitoreo del terreno, permiten llevar un control de magnitudes tales como:

- Movimientos superficiales (Control topográfico).
- Movimientos horizontales y verticales en el interior del terreno. (Equipos instalados en sondeos que permiten definir la profundidad de la zona afectada, tipo Inclínómetros, Increx, Sliding, Extensómetros, etc).

- Movimientos de apertura de grietas y movimientos entre bloques de macizos rocosos.
- Presiones intersticiales y registro de sus variaciones (niveles freáticos y piezométricos).
- Fuerzas de anclaje (células de carga).

### **Métodos y Equipos de Instrumentación**

Olalla (2007), menciona que la instrumentación de terrenos y obras, se puede realizar por dos métodos:

- Método Clásico
- Sistemas de Auscultación Automática

**Método Clásico:** Son técnicas tradicionales de control, que se realizan de manera conjunta a un buen reconocimiento litológico y geológico. Estos métodos se han venido utilizando con éxito y son todavía válidos en los sistemas de monitoreo actual.

De acuerdo a Olalla (2007), una lista de los equipos que se aplican en el método clásico son:

- Inspección visual directa
- Pares de estereofotos y su interpretación
- Adquisición manual de topografía
- Inclínometría manual
- Medición manual de giros en superficie
- Equipos de Extensometría de control manual
- Piezometría manual
- Aparatos para medir la evolución de fisuras
- Controles meteorológicos, en particular temperatura, viento y precipitaciones
- Otros

Seguidamente se brinda una descripción rápida de cada uno de ellos.

*Inspección Visual Directa:* En ella se observan todas las anomalías topográficas que se puedan detectar, así como grietas, signos de rotura o desgarre, las discontinuidades que puedan ser favorables al movimiento, afloramientos de aguas subterráneas, entre otros.

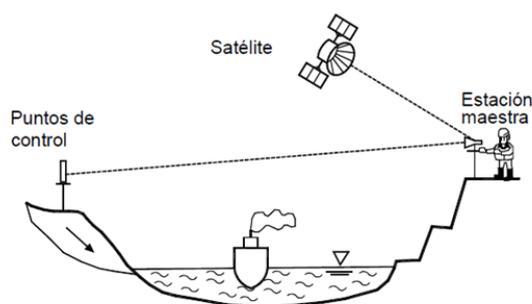
Todas estas observaciones se deben vincular a los mapas geológicos, con el fin de definir un primer esquema del movimiento.

*Pares de estereofotos y su interpretación:* La estereofotografía implica el análisis de dos imágenes similares, tomadas desde el mismo lugar y por el mismo procedimiento (tipo de cámara, escala de trabajo), en un corto intervalo de tiempo.

Estas imágenes proporcionan mapas topográficos, y varias series de ellas permiten visualizar en tres dimensiones el desarrollo del movimiento que se está produciendo a lo largo del tiempo.

*Topografía:* Este se puede realizar por medio de equipos geodésicos y ópticos, y presentan la ventaja de su sencillez de operación, versatilidad y economía.

La Topografía Convencional: Es uno de los sistemas más comunes de instrumentación, para determinar los movimientos laterales y verticales de los taludes. Para ello, se colocan BMs en sitios estables y una serie de puntos de medición en la zona deslizada. En la figura N°1, se muestra un esquema representativo de este tipo de sistema.



**Figura 1.** - Esquema general de monitoreo topográfico (Suárez, 2012)

De acuerdo a Suarez (2012), con este sistema se pueden realizar mediciones diarias empleando tubos que se insertan dentro del deslizamiento; de esta forma, se pueden medir las deformaciones relativas, movimientos de grietas, etc.

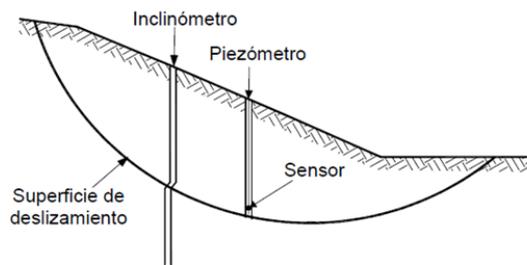
Las medidas son referenciadas a un BM fijo. Los movimientos absolutos de una serie de puntos se pueden obtener repitiendo las mediciones por determinados períodos de tiempo; y es muy importante que la medición sea precisa, por lo que es importante que las medidas se repitan siempre con el mismo equipo y con los mismos topógrafos, para evitar errores de precisión. Adicionalmente, es importante asegurarse que el BM se encuentre sobre un área estable y en lo posible, sobre afloramientos de roca.

GPS Diferencial (DGPS): El DGPS se está utilizando con frecuencia para monitorear los movimientos superficiales de deslizamientos. Una estación base, en un sitio conocido, se utiliza para hacer las correcciones y refinamientos de una o varias estaciones móviles. Todas las estaciones emplean el mismo sistema satelital.

En condiciones favorables, este sistema consigue una precisión mejor que un centímetro; sin embargo, la precisión de DGPS puede deteriorarse considerablemente donde la superficie del terreno está cubierta de árboles o en épocas de condiciones climáticas desfavorables.

*Inclinometría Manual*: Inclinómetro vertical operado manualmente, que ofrece información precisa y de indudable valor al identificar la masa deslizante.

Este equipo mide el cambio de inclinación de un tubo que se coloca en una perforación dentro del talud y de esta manera, se calcula la distribución de los movimientos laterales. En la figura N°2, se muestra un esquema general de ubicación en una zona de potencial inestabilidad.



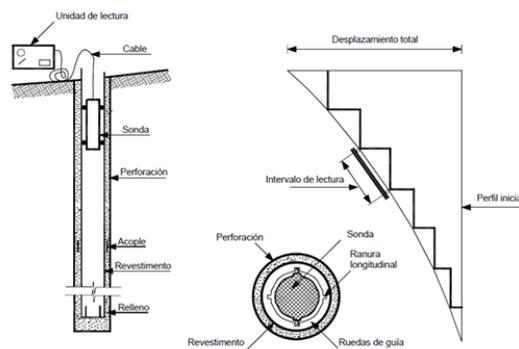
**Figura 2.** - Esquema general de ubicación de inclinómetro (Suárez, 2012)

Un sistema de inclinómetro está compuesto por cuatro componentes principales:

- Un tubo guía de ABS o aluminio anodizado, instalado dentro de una perforación.
- Un sensor portátil montado sobre un sistema de ruedas que se mueven sobre la guía del tubo.
- Un cable de control que baja y sube el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie.

- Un equipo de lectura en la superficie (que sirve de proveedor de energía) recibe las señales eléctricas, presenta las lecturas y en ocasiones, puede guardar y procesar los datos.

En la figura N°3, se muestra un esquema general de un inclinómetro,



**Figura 3.** - Esquema de inclinómetro (Suárez, 2012)

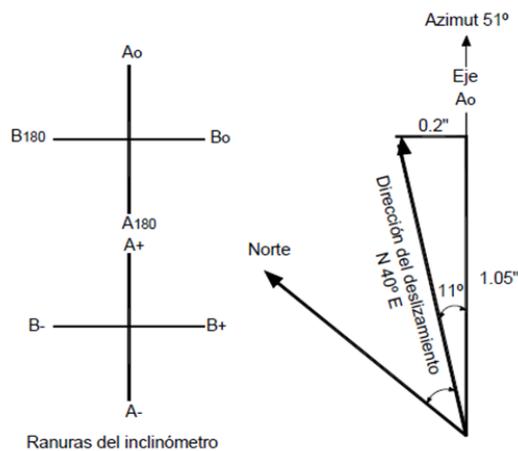
Suarez (2012), menciona las siguientes recomendaciones a tener en cuenta:

- El torpedo no debe golpearse contra superficies duras para evitar que se dañen los sensores. Si accidentalmente se golpea el torpedo, éste debe revisarse realizando las mediciones de comprobación.
- No permita que le entre humedad a las conexiones eléctricas. Nunca deben conectarse los cables al torpedo, en presencia de lluvias o de humedad excesiva.
- El cable debe transportarse de forma que no se doble.
- El torpedo debe limpiarse, secarse y aceitarse suavemente, antes de colocarlo en su caja. La caja debe colocarse sobre la silla de un vehículo y nunca sobre las áreas duras.
- Siga las recomendaciones para el cuidado y mantenimiento de los fabricantes.

El equipo de inclinómetro permite controlar los desplazamientos horizontales en profundidad, tomando lectura cada 0.5 m a lo largo de todo el recorrido de la tubería. Tras la toma de una lectura inicial o lectura de referencia, se tomarán lecturas posteriores con la periodicidad que se estime oportuno. La comparación de dichas lecturas de seguimiento, con la lectura de referencia, permite controlar los desplazamientos horizontales que se hayan producido a lo largo de la misma. Partiendo del punto más profundo de la tubería, se acumulan dichos desplazamientos hasta la superficie, para obtener el desplazamiento horizontal acumulado en cabeza de la

tubería. Es importante resaltar que para que dichos desplazamientos se puedan considerar absolutos, es imprescindible que el tramo más profundo de la tubería se encuentre localizado en zona estable.

Tal y como se muestra en la figura N°4, la ranura que se encuentra, en dirección ladera abajo, se marca como A0 y la ranura opuesta, se marca como A180. Las otras dos ranuras se marcan como B0 y B180.

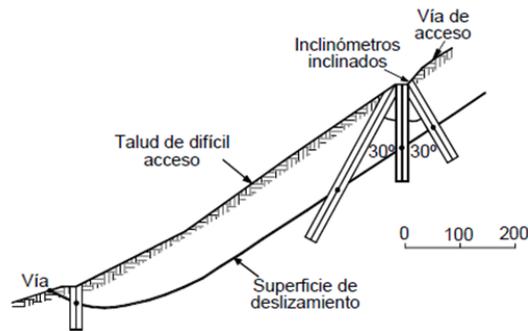


**Figura 4.** – Definición de dirección de ranuras inclinómetro (Suárez, 2012)

Si las ranuras A se han alineado perfectamente con la dirección principal del movimiento, se mostrará todo el movimiento en el eje A y ningún movimiento en el eje B.

Los inclinómetros se utilizan principalmente para detectar la superficie de falla o para detectar movimientos en las excavaciones.

Otra aplicación a este tipo de instrumentación, es instalar inclinómetros dentro o junto a pilotes para medir la deflexión de éstos por acción de los deslizamientos. Este sistema de instalación permite determinar los momentos de flexión a que están sometidos los pilotes.



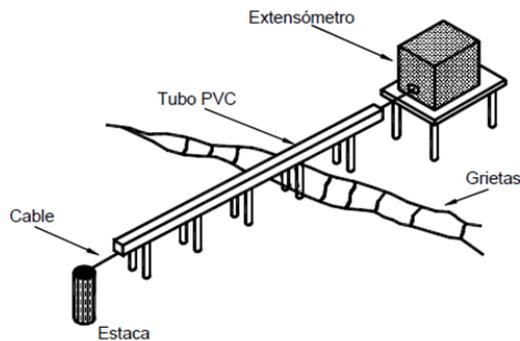
**Figura 5.** - Esquema colocación inclinómetros en perforaciones inclinadas (Suarez, 2012)

En la interpretación de datos de estos equipos, se debe tener cuidado al interpretar la información obtenida. Uno de los errores más comunes es la utilización de una escala exagerada. Por otro lado, la sonda inclinométrica es de una elevada precisión ( $\pm 0,025$  mm/500 mm), por lo que es necesario que la tubería inclinométrica sea instalada por personal experimentado, asegurando la correcta solidarización de la tubería con el terreno. Asimismo se ha de cuidar el proceso de lectura para asegurar la obtención de datos válidos.

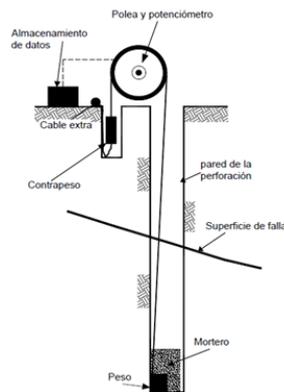
*Medición Manual de giros en superficie:* esta permite controlar giros cuando hay una componente rotacional en la inestabilidad. Se pueden utilizar sensores electrolíticos o servoacelerómetros.

*Extensómetro de control manual:* mediante un simple extensómetro manual, se registran los desplazamientos que se producen en las distancias entre dos puntos, tanto en sentido vertical u horizontal.

Las mediciones deben tener una precisión mínima de 0.2 mm y deben relacionarse con los datos de lluvia diaria. En la figura N°6, se muestra un esquema de ubicación de extensómetros horizontales, y en la figura N°7, se muestra un esquema de colocación de un extensómetro vertical de cable.



**Figura 6.** - Diagrama de ubicación de extensómetros horizontales (Suárez, 2012)



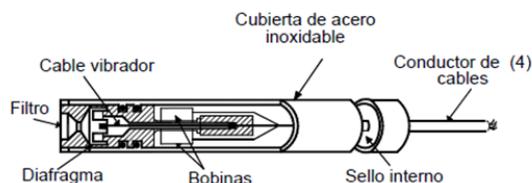
**Figura 7.** - Diagrama de ubicación de extensómetros verticales de cable (Suárez, 2012)

El extensómetro vertical de cable es un dispositivo muy útil cuando los desplazamientos horizontales esperados son de gran magnitud, sin embargo, presenta el inconveniente de que no determina la profundidad a la que se está produciendo el movimiento. Por este motivo, en aquellos casos en que no se tenga detectada la zona activa, es recomendable iniciar los trabajos de auscultación, instalando una tubería inclinométrica. Mediante este dispositivo tomaremos las primeras lecturas y detectaremos la profundidad a la que se localiza el deslizamiento. Una vez que este dispositivo se quede sin rango, instalaremos un extensómetro de cable, que nos permitirá controlar el movimiento, asumiendo que dicho movimiento se está produciendo a la profundidad que previamente detectamos con la tubería inclinométrica.

*Piezometría manual:* Son equipos bien conocidos, que permiten proporcionar de manera automática o manual, información de la presión del agua en los poros. Pueden ser abiertos, de cuerda vibrante o eléctrica y se pueden instalar a distintas profundidades dentro de un mismo sondeo.

El tipo de piezómetro a seleccionar para cada estudio específico depende de las características de funcionamiento del piezómetro y de su precisión.

El piezómetro abierto únicamente permite controlar las variaciones que se produzcan en el nivel freático. En el caso de que se quiera obtener información sobre la presión intersticial o detectar niveles colgados, se suelen emplear piezómetros cerrados de cuerda vibrante o eléctricos. Asimismo, la señal de estos piezómetros cerrados, se puede guiar, mediante cableado, a armarios de conexión localizados fuera de la zona de trabajo, o en zonas protegidas de posible vandalismo. En caso de instalarse en el cimientado de un relleno o en la contrabóveda de un túnel, se pueden instalar previamente al inicio de los trabajos, guiando la señal fuera de la zona de trabajo. En el caso de las tuberías abiertas sería necesario ir las recreciendo a medida que se levante el relleno o la contrabóveda, lo que supone una interferencia con los trabajos constructivos. Por estos motivos, suele ser más habitual la instalación de piezómetros de tipo cerrado.



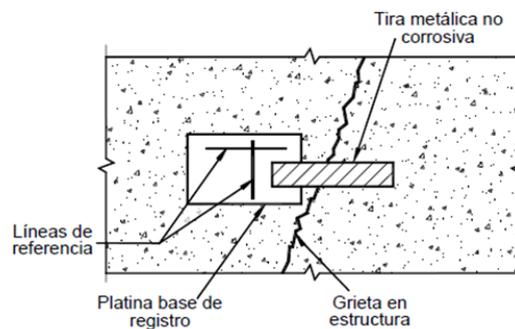
**Figura 8.** - Vista de Sensor de Cuerda Vibrante (Suarez, 2012)

Tal y como menciona Suarez (2012), los piezómetros generalmente se instalan como parte de las investigaciones del sitio y en ocasiones, antes de que se tenga información sobre la localización de la superficie de falla; sin embargo, es muy importante que la punta de los piezómetros se encuentre muy cerca o en la superficie de falla. Igualmente, es importante que se puedan medir las presiones del agua subterránea durante largos periodos de tiempo.

Es importante que el sensor, propiamente dicho, se instale por encima de la superficie de falla para que no se dañe en el proceso de movimiento del terreno, o en caso de que sea necesaria su instalación por debajo de la zona activa, asegurar las correspondientes cocas de cableado que puedan absorber el deslizamiento.

*Fisurómetros:* los fisurómetros (extensómetros horizontales) tienen una precisión inferior a  $\pm 0,01\text{mm}$  y pueden abarcar un rango de control de 5 a 10cm entre ambos extremos. Pueden adaptarse al entorno mediante bases cortas o largas.

Se pueden emplear láminas plásticas transparentes montadas a lado y lado de la grieta, o placas metálicas. Los movimientos pueden medirse en tres direcciones; dos sobre la lámina y un tercero que mide la separación entre la lámina y la tira metálica, es decir, la separación entre los dos elementos. En la figura N°9, se muestra un esquema de un tipo de fisurómetro.



**Figura 9.** - Esquema de fisurómetro medidor de tira metálica (Suarez, 2012)

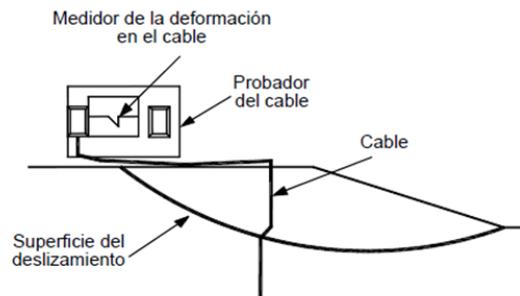
*Control de variables atmosféricas:* suministran datos de temperatura (termómetros), humedad (higrómetros), precipitaciones (pluviómetros), viento (anemómetros), etc.

*Otros:* otros procedimientos de control que permiten conocer la evolución de algunos de los parámetros que rigen los movimientos en el terreno, tales como:

- Cambios que se producen en una fibra óptica alojada en el interior del terreno.
- Mediciones de las energías sonoras a lo largo de una superficie del deslizamiento, o a lo largo de una banda deslizante.
- Control de las presiones de succión.

*TDR (Reflectometría de ondas eléctricas):* este método consiste en colocar un cable coaxial dentro del deslizamiento y ensayarlo enviando pulsos de voltaje en forma de ondas, las cuales se reflejan. La medición de la reflexión permite identificar roturas o esfuerzos en el cable.

En la figura N°10, se muestra un esquema del sistema.



**Figura 10.** - Esquema de sistema TDR (Suarez, 2012)

Entre las desventajas del sistema TDR se encuentra que no es posible determinar la dirección y la magnitud de los movimientos.

**Sistemas de auscultación automática:** la combinación de instrumentos electrónicos y las técnicas de telecomunicación hacen hoy día posible la auscultación automática de laderas y el envío de la correspondiente información por medio de control remoto.

Los sistemas de auscultación automático, junto con los instrumentos de control, en superficie o profundidad, se pueden utilizar para controlar, conocer y hasta predecir un deslizamiento.

De acuerdo a Olalla (2007), la transmisión automática y remota de datos, se puede hacer mediante:

- Líneas telefónicas fijas
- Líneas telefónicas móviles
- Fibras ópticas
- Radio
- Satélites

El control de laderas potencialmente inestables, también se puede realizar en:

- Parámetros representativos de parámetros superficiales, cuya información puede ser integrada en modelos de terreno en 3D con control superficial (girómetros, fisurómetros y hasta extensómetros).
- Parámetros de variables en profundidad (piezómetros, inclinómetros y hasta extensómetros).

Los sistemas automáticos de control, deben llevar incorporadas las siguientes características:

- Operación totalmente automática, con la posibilidad de interferir automáticamente cuando se desee.
- Operación de manera continua
- Programación periódica de medidas, orden de los puntos de medida, número de medidas por unidad de tiempo y de aparato.
- Configuración de la transferencia de datos.
- Presentación unificada final.

Los sistemas automáticos de recolección de datos tienen los siguientes inconvenientes de manejo:

- Requieren el reemplazo de baterías o la implantación de sistemas complementarios de aporte de energía eléctrica (como paneles solares)
- Es necesario que las unidades de adquisición automática, se instalen en zonas protegidas para evitar la aparición de desperfectos, consecuencia de la acción de animales, del vandalismo y del clima.

Sin embargo, la mayor ventaja de la recolección automática de datos es la eliminación de errores humanos y que la información se obtiene en tiempo real, lo cual genera mayor confiabilidad para los sistemas de alarma.

Por otro lado, cuando se requiere una frecuencia de lecturas muy elevada, el coste que supone la instalación de un sistema automatizado, acaba siendo inferior que el coste que puede suponer la presencia continua de un equipo humano, realizando la lectura de los sensores.

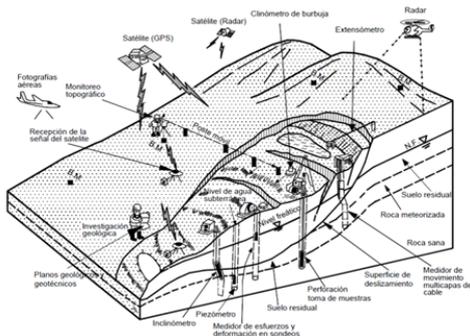
### **Programa de Monitoreo**

Para definir un Programa de Monitoreo, es necesario tener conocimiento de la geología del sitio, una evaluación preliminar sobre las causas del deslizamiento y los límites probables del movimiento en cuanto a profundidad y extensión en planta; a partir de esta información se deberán definir una serie de criterios específicos, como los indicados a continuación:

- Qué tipo de medición se requiere.
- Definir el instrumento que mejor se adapte a las necesidades del talud a estudiar.

- Establecer la ubicación, número y profundidad de instalación de la instrumentación.
- Seleccionar la frecuencia de lectura de las mediciones.
- Definir el manejo y la presentación de los datos obtenidos.
- Establecer los valores límite que generen la activación de alarmas.

Las opciones de instrumentación son muy variadas, las tecnologías que se han desarrollado en este campo, permite el uso de un sin número de equipos que facilitan desde lecturas manuales hasta remotas, así como registros puntuales de información como continuos. La siguiente figura muestra varias de las posibilidades de equipos y dispositivos que se pueden utilizar, y cuyas descripciones y funcionalidad se indicó en el apartado anterior.



**Figura 11.-** Esquema general de instrumentación geotécnica (Suárez, 2012)

### Sistemas de Alarma

La construcción y puesta en práctica de sistemas de alarma para deslizamientos, corresponde a un trabajo rutinario en algunos países, sin embargo en otros, como es el caso de Costa Rica, es poco utilizado, a pesar de poseer zonas de alta actividad en procesos de deslizamientos.

Según Suarez (2012), los sistemas de alarma generalmente constan de tres elementos básicos:

- Un sistema de instrumentación del talud.
- Un computador que recibe la información de los instrumentos y la analiza.
- Un sistema de alarma que avisa la inminencia de un deslizamiento.

Estos sistemas permiten un registro continuo de información, utilizando elementos electrónicos, tales como estaciones automáticas climáticas, sistemas de GPS y medidores de inclinación.

Además, la red telefónica es utilizada para informar a un computador remoto, la situación de amenaza inminente.

### Caracterización de un Deslizamiento utilizando la instrumentación geotécnica

En el momento en que ocurre un deslizamiento, es necesario determinar las causas y mecanismos de falla que rigen el movimiento detectado, y a partir de allí determinar las medidas correctivas que se deben implementar para controlar el fenómeno.

Para ello es necesario planificar un estudio detallado del deslizamiento, definiendo en detalle los parámetros y fenómenos que caracterizan el problema.

Las fases de este proceso de caracterización contemplan las siguientes actividades:

- *Reconocimiento del Tipo y Características del Movimiento:* puede determinarse por el estudio de los sistemas de agrietamiento, sistema de aguas subterráneas, visión general del sitio.
- *Localización de la Superficie de Falla:* puede determinarse por:
  - Geométricamente; por evidencias topográficas
  - Ensayos de Penetración: perforación SPT
  - Inclínómetros: en el caso de movimientos lentos
  - Geofísica: para determinar la masa en movimiento
- *Diseño de programa de instrumentación y monitoreo:* mediante estudios previos

### **Aplicaciones**

El monitoreo geotécnico posee un gran número de aplicaciones en proyectos de obra civil de diferente índole, permitiendo establecer un control, no sólo de la propia obra en ejecución, sino también de las posibles alteraciones que dicha ejecución pueda estar motivando en el entorno de la misma.

Las aplicaciones más habituales serían las siguientes:

**Monitoreo de obras lineales o puntuales en entorno urbano:** túneles carreteros o ferroviarios, excavaciones entre pantallas, recintos apantallados.

**Monitoreo de obras lineales en entorno interurbano:** túneles carreteros o ferroviarios, control de laderas inestables, terraplenes y desmontes.

**Monitoreo de Estructuras de Obra hidráulica:** presas de materiales sueltos y presas de hormigón.

**Monitoreo de Estructuras de la red de Transporte:** viaductos, puentes, pasos superiores e inferiores.

**Monitoreo de Obras Portuarias:** puertos, diques escolleras.

Es importante resaltar que los diferentes sistemas de monitoreo se pueden diseñar con el objetivo de que su vida útil finalice una vez ejecutada la construcción o, de forma que dichos sistemas permanezcan operativos durante la fase de explotación o servicio de la estructura en cuestión.

Asimismo, los avances tecnológicos actuales permiten implantar sistemas de instrumentación que se pueden gestionar en remoto, permitiendo un seguimiento en tiempo real de los datos del monitoreo y la emisión de alarmas a los interlocutores seleccionados, de forma que se puedan adoptar soluciones de forma rápida y precisa.

**Casos prácticos.**

**Caso práctico 1: Sistemas de monitoreo, implantados por EPTISA IIC, para el control de taludes y terraplenes inestables, a lo largo de la red ferroviaria convencional de ADIF, en España.**

### **Introducción**

La Administración de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) es la responsable entre otras actividades, del mantenimiento de las líneas que componen la Red Ferroviaria de Interés General (REFIG), recayendo dichas tareas en la Dirección Ejecutiva de Red Convencional.

Dentro de los diferentes Procedimientos de Negocio que la Dirección Ejecutiva de Red Convencional (DERCO) tiene en su Manual de Gestión del Mantenimiento, está el relacionado con el Mantenimiento Preventivo, además del Mantenimiento Correctivo y las Actuaciones de Mejora.

Como el ánimo de optimizar estas labores de mantenimiento y mejora, se ha implantado un procedimiento de monitoreo a lo largo de la red ferroviaria de línea convencional, que abarca un total de 17.823 km de vía. Entre los años 1991 y 2010 EPTISA IIC se ha encargado de llevar a cabo dicho monitoreo

### Zonas Controladas

El sistema de auscultación empleado permite controlar los posibles movimientos que puedan producirse en las zonas donde se detecten inestabilidades, dando lugar a la programación de actuaciones de mejora o controles más exhaustivos, en función de los desplazamientos registrados.

Durante el periodo de monitoreo, el número de zonas auscultadas se fue incrementando hasta alcanzar la cuantía de 29 puntos de control. La identificación de los mismos y su ubicación en plano, se puede observar en la tabla 1 y la figura 12, que se incluyen a continuación:

**Tabla 1. - Zonas inestables de la red**

<b>Punto</b>	<b>P.K.</b>	<b>Línea</b>	<b>Localidad (Provincia)</b>
Ladera	36/200	Bobadilla -	Almargen (Málaga)
Ladera	40/300	Algeciras	
Ladera	19/500	Córdoba - Málaga	Torres Cabrera (Córdoba)
Terraplén	30/400		Ferrán Núñez (Córdoba)
Ladera	153/600		Álora (Málaga)
Terraplén	16/400	Linares - Almería	Linares (Jaén)
Terraplén	9/000	Sevilla - Huelva	Santiponce (Sevilla)
Ladera	547/200	Madrid- Hendaya	Zegama (Guipuzcoa)
Terraplén	549/800		Ormaiztegi (Guipuzcoa)
Terraplén	575/900		Inoso (Álava)
Ladera	185/200	Castejon de Ebro- Bilbao	Oiardo (Álava)
Ladera	184/455		Aloria (Álava)
Túnel	200/462		Lekamaña(Alava)
Ladera	197/410	Bilbao - Miranda de Ebro	
Ladera	25/050	Monforte - Orense	Os Peares (Orense)
Ladera	277/300	Palencia - A Coruña	Túnel 40. Villar de Silva (Orense)
Ladera	63/714	León - Gijón	Busdongo (León)
Ladera	439/953	Ventas de Baños - Santander	Pesquera (Cantabria)
Terraplén	28/050	Zamora - A Coruña	Carvajales de Alba (Zamora)
Terraplén	56/970	Tarragona	Lavern (Barcelona)
Ladera	61/100	- Barcelona	San Sadurní d'Anoia (Barcelona)
Ladera	11/125	Ripoll-	Ribes de Freser (Girona)

<b>Punto</b>	<b>P.K.</b>	<b>Línea</b>	<b>Localidad (Provincia)</b>
Ladera	16/150	Puigcerdá	
Ladera	386/460	Madrid - Barcelona por Caspe	Gelsa (Zaragoza)
Terraplén	159/850	Zaragoza - Barcelona por Lleida	Almacelles (Lleida)
Terraplén	173/300		Montagut (Lleida)
Túnel	181/330		Lleida
Estación Prat	0/188	Aeropuerto - Barcelona	Barcelona
Terraplén	150/820	Madrid - Sevilla	Alcázar de San Juan (Ciudad Real)



**Figura 12. - Zonas inestables controladas en el año 2009**

Como se puede apreciar en el anterior cuadro, la gran mayoría de puntos inestables se localizan en Andalucía, País Vasco, Cataluña y en provincias del Noroeste peninsular (Orense, Zamora, León y Cantabria).

A continuación se incluye un resumen fotográfico relativo a algunas de las zonas controladas.



**Figura 13.** - . Ladera Túnel 40 (Orense).



**Figura 14.** - Ladera de Busdongo (León).



**Figura 15.** - Ladera de Pesqueira (Cantabria).



Figura 16. - Ladera y Viaducto de San Sadurní d'Anoia (Barcelona).

### **Sistemas de instrumentación empleados**

La instrumentación y seguimiento de estas zonas se podría agrupar en tres grandes grupos, dependiendo del tipo de comportamiento que se persiga controlar:

- Grupo 1: control del terreno en profundidad, localizando el origen de la inestabilidad.
- Grupo 2: control del terreno en superficie, cuantificando su efecto exterior.
- Grupo 3: control de estructuras, edificios y servicios posiblemente afectados por el fenómeno de inestabilidad.

En el primer grupo se incluyen aquellos sistemas y dispositivos de instrumentación, cuya instalación requiere de la ejecución de un sondeo, y que permiten el control de desplazamientos del terreno en profundidad, ya sean horizontales ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) y/o verticales ( $\Delta z$ ), así como la variación de presiones intersticiales ( $\Delta u$ ).

Pertenecientes al primer grupo se instalaron los siguientes dispositivos de instrumentación.

**Sistema Inclinométrico:** permite el control de movimientos horizontales ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) en profundidad mediante el empleo de una sonda biaxial, equipada con dos servoacelerómetros, introducida por una tubería, instalada en el sondeo, de ABS o aluminio anodizado, que dispone de cuatro acanaladuras, que sirven de guía a las ruedas del aparato de medida. La lectura de los inclinómetros se realiza cada 0,50 m. con una sonda con un rango de  $\pm 53^\circ$  y precisión de  $\pm 0,025$  mm/500 mm.



**Figura 17.** - Inclinómetros en terraplén de Zegama. Guipuzcoa

Como equipo complementario a la tubería inclinométrica, ante la previsión de posibles desplazamientos que superen los rangos de medida de los dispositivos inclinométricos, se emplea el *Extensómetro de Cable* que registra el movimiento total acumulado en superficie entre el anclaje, situado por debajo del plano de deslizamiento, y la cabeza extensométrica.. Este dispositivo presenta un rango de 400 mm y una apreciación de 1 mm (cabeza analógica) o 0,1 mm (cabeza digital),

**Sistemas Extensométricos:** permiten el control de movimientos verticales, asientos ( $\Delta z$ ) en profundidad. Entre estos sistemas, se han empleado los siguientes:

*Extensómetro de Varillas:* permite determinar el movimiento existente entre el anclaje y la cabeza instalada en superficie sobre la misma vertical, equipada con transductores de tipo potenciómetro lineal o comparadores digitales, permitiendo medidas con precisiones de 0,01 mm.

*Extensómetro Incremental (INCREX):* permite la medida, metro a metro, del desplazamiento, en el sentido uniaxial de la tubería, equipada con anillos metálicos exteriores, empleando una sonda inductiva con rango igual a  $\pm 20$  mm/m y precisión  $\pm 0,01$  mm/m.

*Sistema de anillos magnéticos:* especialmente indicado en aquellos casos donde los desplazamientos esperados son de gran rango (superiores a 20 mm por metro de profundidad) y no se requieren precisiones elevadas en la medida.

**Sistema TRIVEC:** combina, en un único sondeo y con una sola sonda, la posibilidad de obtener los movimientos en las tres direcciones ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ), con altas precisiones para desplazamientos de pequeña magnitud: en vertical (micrómetro) rango:  $\pm 10$  mm/m, precisión  $\pm 0,003$  mm/m; en horizontal (clinómetros) rango:  $\pm 15^{\circ}$  mm/m, precisión  $\pm 0,05$  mm/m.

**Columnas piezométricas:** controlan la evolución de la presión intersticial ( $\Delta u$ ) del terreno a distintas profundidades, mediante la instalación en un sondeo de uno o varios piezómetros de cuerda vibrante, protegidos con cápsulas anti-obturación.

En el segundo grupo se encuadran aquellos controles que permiten la cuantificación de los movimientos en la superficie del terreno, resueltos principalmente por métodos topográficos. Así, el control de asentos ( $\Delta z$ ) se realiza mediante **nivelación topográfica de alta precisión**, empleando niveles digitales y miras invar situadas sobre los puntos de control, materializados con hitos o clavos de nivelación, y procediendo a la toma de lecturas mediante doble nivelación geométrica (ida y vuelta), empleándose el método del punto medio, para asegurar precisiones de 0,3 mm (desviación estándar en 1 km de doble nivelación).

Por otro lado, el control de movimientos horizontales ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) se realiza mediante **colimación lineal o triangulación geodésica o trilateración**, empleando estaciones totales o taquímetros y prismas de reflexión, en los puntos a controlar, consiguiendo precisiones de 1,0 mm.



**Figura 18.** - Control topográfico en la ladera de Pesquera. (Cantabria).

Por último, en el grupo, de los sistemas empleados para el control de estructuras, edificios y servicios afectados, cabe destacar los siguientes:

- **Control de grietas y fisuras**, mediante ternas de base para la medida con defórmetro y fisurómetros tridimensionales con transductores potenciométricos lineales (precisión 0,01 mm).
- **Control de convergencias**, mediante la instalación de pernos y medida con cinta extensométrica o con métodos topográficos como los descritos anteriormente.
- **Control de carga en anclajes**, mediante células de carga de cuerda vibrante.

### Frecuencia del monitoreo

A la hora de establecer una frecuencia en la toma de lecturas de los dispositivos, son varios los factores que han de considerarse.

Es fundamental observar los datos de instrumentación recogidos en la última campaña de lectura, contrastando dichos valores con el histórico de resultados anterior y mostrando especial atención a los posibles incrementos en la velocidad de desplazamiento, con respecto a las velocidades registradas en campañas anteriores.

Es frecuente que la activación de movimientos se produzca en los periodos de lluvias, por este motivo, la frecuencia e intensidad de las precipitaciones en la zona objeto de control, también es un factor determinante.

Asimismo, la propia naturaleza de los materiales que constituyen dicha ladera o terraplén, el método constructivo empleado, la presencia de vegetación o las alteraciones realizadas por el ser humano, en el propio entorno de la zona a controlar, también influyen en la estabilidad del elemento objeto de control. Finalmente no debemos olvidar la existencia de sismicidad en el entorno, dado que puntos controlados que no muestren ningún tipo de alteración puede ver modificadas sus condiciones de estabilidad tras un proceso sísmico.

Por este motivo, la frecuencia de lecturas a establecer en cada zona de control ha de estudiarse de forma particularizada, atendiendo a todos los factores indicados anteriormente.

Como media estimativa, la frecuencia de lecturas aplicada en los puntos controlados a lo largo de la red ferroviaria convencional implantada en España, se estableció en cuatro campañas de lectura al año, con una cadencia aproximada trimestral.

### **Ventajas de la implantación del sistema de monitoreo.**

A la hora de ejecutar cualquier tipo de obra civil, es primordial preservar la seguridad física de las personas y asegurar la integridad estructural de las construcciones ejecutadas.

La implantación de un sistema de monitoreo como el que se realizó en este caso práctico, no sólo permite asegurar las premisas indicadas en el párrafo anterior, sino que, mediante el volumen de información obtenida, a partir de cada campaña de lectura realizada, se pueden establecer procedimientos de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo, con un grado de detalle, que de otra forma no sería posible.

Por este motivo, el coste económico de las actuaciones que haya que llevar a cabo en una zona previamente controlada, en la que se detecten anomalías, serán de una cuantía considerablemente inferior, a aquellos casos en los que al no haberse implantado un sistema de monitoreo, se desconozca la causa u origen de la anomalía.

Asimismo, tener conocimiento del origen de un problema, permite actuar desde el inicio sobre el mismo, aplicando soluciones definitivas que resuelvan dicho origen, en vez de aplicar soluciones temporales para solventar el problema.

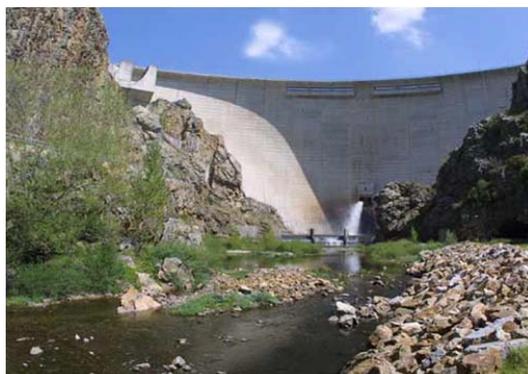
**Caso práctico 2:** Sistema integral de monitoreo implantado por EPTISA IIC, en la presa de Riaño, localizada en la provincia de León. (España).

### Introducción

La presa Riaño está situada sobre el río Esla en el término municipal de Crémenes, provincia de León.

La tipología de la presa es de hormigón, **bóveda de doble curvatura**, con una altura sobre cimientos de 101 m y cota de coronación a 1.102,6 m.s.n.m. El desarrollo en coronación es de 337 m y el espesor en la ménsula central variable entre un máximo de 16,5 m y un mínimo de 4,2 m.

Cuenta con un aliviadero central de labio fijo, sobre coronación, con seis vanos y capacidad de desagüe de 530 m<sup>3</sup>/s, y un aliviadero lateral en el estribo derecho con dos canales de lanzamiento regulados por compuertas y capacidad de desagüe de 1.000 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 19.** - Vistas panorámicas de la presa



**Figura 20.** - Vistas panorámicas de la presa

### **Sistemas de control instalados**

Entre los años 1968 y 1975, durante las obras de construcción de la Presa de Riaño, se procedió a la instalación de una serie de dispositivos de instrumentación que se instalaron embebidos en el hormigón. Los dispositivos instalados fueron los siguientes:

- 1) **Termómetros:** permiten establecer un control de las temperaturas del agua del embalse y del aire en el paramento de aguas abajo. Se instalaron 8 uds.
- 2) **Termorresistencias** para el control térmico en el interior de los bloques y paramentos: se encuentra encapsuladas, para su protección, en una vaina de acero inoxidable relleno de resina, con una rango de medida entre -50 y +150 °C y una precisión de +/- 0,3 °C. Se instalaron un total de 97 uds.
- 3) **Flexímetros electroacústicos**, para controlar el movimiento en juntas en el interior de los bloques. Se instalaron 35 uds.
- 4) **Cápsulas tensiométricas:** que permiten controlar las presiones en el cuerpo de presa y en el contacto bóveda - cimiento. Se instalaron 17 uds.

Entre 1988 y 1990 se desarrolla el “*Proyecto de Obras complementarias para la auscultación de la Presa de Riaño*”, que incluía la revisión y puesta a punto de los equipos instalados en fase de construcción y la instalación de una serie de nuevos dispositivos de instrumentación. Estas tareas son encomendadas a EPTISA IIC, que procede a la instalación de los dispositivos descritos a continuación:

- 5) **Balanzas hidrostáticas:** para controlar el nivel del embalse. Se instalaron 2 uds.
- 6) **1 Estación meteorológica** para registrar las acciones climáticas.

- 7) **Péndulos invertidos:** permite medir movimientos respecto a su punto inferior. Consta de un hilo de acero inoxidable cuyo extremo inferior está unido a un anclaje ubicado en el interior de un sondeo vertical, y cuyo extremo superior se fija una unidad de flotación solidaria a la estructura. La unidad de flotación está formada por un recipiente con un flotador en baño de aceite y está diseñada, de tal forma, que permite mantener el hilo en tensión, sin que el movimiento de la estructura altere su posición.
- 8) **Péndulos directos** permite medir movimientos horizontales de la estructura relativos a su punto superior. Consta de un hilo de acero situado en un pozo vertical, anclado en su extremo superior a la estructura y en su extremo inferior, a un peso con aletas inmerso en un depósito relleno de aceite. Esta disposición asegura la verticalidad del hilo.

La combinación de un péndulo directo e invertido en una misma vertical permite medir los movimientos relativos de la estructura, respecto al punto inferior del péndulo invertido. Cuando dicho punto inferior se encuentra localizado en una zona estable, los movimientos medidos serán absolutos.

Se instalaron un total de 7 Péndulos invertidos y 6 péndulos directos.



**Figura 21.** - Péndulos directo e inverso

- 9) **Medidores de juntas tridimensionales** en las galerías: consisten en un conjunto de dos piezas localizadas una a cada lado de la junta, que se anclan al hormigón de las paredes, mediante tacos metálicos. Posteriormente mediante la lectura de un comparador digital, se registran los posibles movimientos en tres direcciones: apertura o cierre, deslizamiento y cizallamiento. El comparador digital tiene un rango de hasta 50 mm y una precisión de 0.03 mm. Asimismo, estos dispositivos se pueden automatizar, instalando medidores tridimensionales, que llevan acoplados transductores de tipo potenciométrico. Se instalaron un total de 60 uds.
- 10) **Bases para posicionamiento de clinómetro portátil**, con el objetivo de controlar los giros de la estructura. Estas bases están construidas en acero inoxidable y su superficie horizontal muestra unos pivotes de fijación, en los que se acopla el clinómetro portátil con el que el técnico toma la lectura. Dicho clinómetro portátil presenta un rango de hasta 100 mm/m y una resolución de 0.005 mm/m. Se instalaron 24 uds.
- 11) **4 Acelerómetros** para controlar las vibraciones.
- 12) **Aforadores para el control de filtraciones**: el equipo consta de un vertedero triangular de pared delgada, tipo Thomson, construido en acero inoxidable, con las dimensiones adecuadas para su instalación en la zanja o canaleta de recogida de filtraciones totales y una reglilla graduada de acero inoxidable sobre una placa de metacrilato, para lectura directa de la lámina de agua. El equipo presenta un rango de 20 cm y una apreciación de 1 mm, Se instalaron 10 uds.
- 13) También se procedió a la instalación de una extensa **red de topografía, 6 tuberías Increx, 8 extensómetros de varillas y 39 piezómetros de cuerda vibrante.**<sup>(1)</sup>

Sumando los dispositivos de instrumentación recuperados de la fase de construcción, así como los nuevos dispositivos instalados en este segundo periodo. El número total de dispositivos de control de la presa supera las 600 uds.

### **Automatización del sistema de control**

Finalmente, EPTISA IIC, procedió a la centralización y automatización de todos los sensores de tipo eléctrico, así como a la posterior instalación de los sistemas

---

<sup>1</sup> La descripción de estos sensores se incluye en el **caso práctico 1**: Sistema de monitoreo para el control de taludes y terraplenes inestables de la red ferroviaria convencional

informáticos y de comunicaciones, que gestionan el sistema de recogida, tratamiento y presentación de datos de auscultación de la presa.

En la propia presa se instalaron 7 Estaciones de Adquisición Automática de Datos y 1 Estación Central de Control. En las oficinas de la Confederación de León se instaló otra Estación de Control.



**Figura 22.** - Unidad de adquisición automática de datos

Para la gestión de todo el Sistema Integral de Auscultación se ha implantado un software (**SAYTL**) mediante el que se puede realizar la supervisión constante y en tiempo real de los dispositivos de instrumentación instalados, advirtiendo de cambios significativos en el sistema, así como generando y enviando mensajes de avisos, alertas y/o alarmas, de acuerdo con las instrucciones configuradas por el usuario.

El software se ha diseñado conforme a las necesidades y peticiones de la *Confederación Hidrográfica del Duero*, programándolo por módulos. De esta forma, el proceso de gestión no está cerrado y permite la posibilidad de ir incorporando nuevos módulos, a medida que el cliente considere necesario incorporar nuevos procesos de gestión o mejorar los existentes.

La novedad más destacable de este software, consistió en su integración con el modelo matemático de comportamiento de la presa.

Para llevar a cabo dicha integración, el software incorpora un módulo a modo de Asistente, de forma que el usuario puede definir en sencillos pasos sucesivos, la caracterización mecánica de los distintos materiales que componen el modelo creado, la definición del estado de carga de referencia y seleccionar, a partir de los datos recibidos de los dispositivos de instrumentación, los estados de carga a calcular, a partir de la combinación de cargas simples correspondientes a peso propio, estado térmico (interpolación de la temperatura real de la presa a los nodos del modelo) y carga hidrostática (nivel de embalse).

### Estudio del comportamiento de la presa

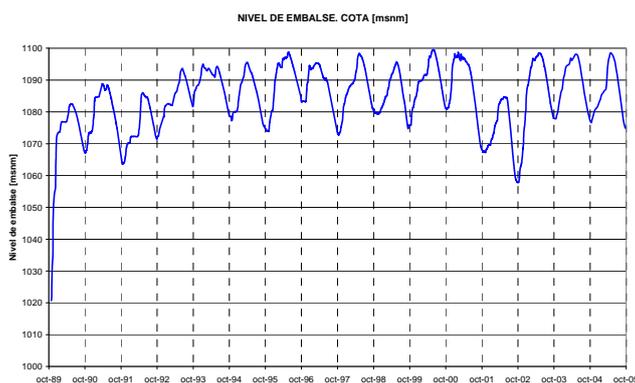
Se ha realizado un completo **análisis del comportamiento histórico** de la **Presa de Riaño**, basándose en los datos de auscultación registrados por el Sistema de Adquisición Automático, entre los años 1989 y 2005, un período de dieciséis años hidrológicos, ajustándose a los criterios establecidos en la “*Guía Técnica para la elaboración del informe anual de presas y embalses*”, elaborada por el Área de Inspección de Presas del Ministerio de Medio Ambiente.

A partir de estos datos, facilitados por la *Confederación Hidrográfica del Duero*, se ha desarrollado un ajuste estadístico del comportamiento real de la presa para las distintas variables de control anteriormente relacionadas.

A continuación se realiza una breve síntesis de los aspectos principales utilizados para el desarrollo y contraste del modelo matemático elaborado, en cuanto a las acciones sobre la presa y su respuesta real en términos de desplazamientos y deformaciones.

#### a) Control de Acciones Exteriores

Atendiendo a valores extremos, el nivel máximo del periodo de explotación se obtuvo en Junio de 2000 con una cota de 1099,53 msnm. y el mínimo en Noviembre de 1989 con una cota de 1020,70 msnm, siendo la máxima variación del nivel en este periodo de 78,73 m, lo que representa un 80,4 % de la carga hidrostática máxima.



**Figura 23.** - Variación del Nivel del embalse entre 1989 y 2005

#### b) Control Térmico de la Estructura

Las condiciones térmicas en la presa presentan unas tendencias de comportamiento que se repiten cíclicamente año tras año, con ligeras variaciones. Los factores que

condicionan actualmente el comportamiento térmico en la presa son: el nivel de las aguas, que actúa modificando las condiciones de temperatura de contorno en el paramento de aguas arriba, la evolución de la propia temperatura del hormigón y el ambiente exterior que provoca variaciones en la temperatura de la presa dando origen al fenómeno térmico estacional.

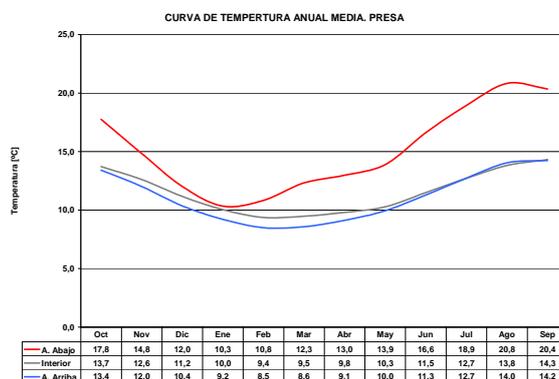


Figura 24. - Curvas de temperatura anual media de la presa.

#### c) Control de Movimientos Horizontales

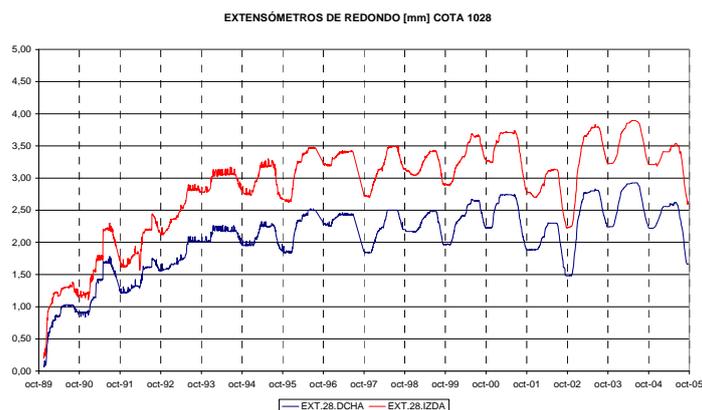
Del control realizado con los péndulos se obtienen recorridos máximos, desde el inicio de la puesta en carga, que no sobrepasan los 35 mm en sentido radial y los 11 mm en sentido tangencial. Los máximos desplazamientos se obtienen en la ménsula central, con un recorrido resultante medio en el periodo, de 27,5 mm al año. Los desplazamientos medidos en los bloques de la margen derecha, son superiores a los de la margen izquierda, con motivo del contacto asimétrico de la bóveda, para ajustarse a la geometría de la cerrada.

Los desplazamientos absolutos radiales y tangenciales evolucionan siguiendo la onda térmica anual del aire y respondiendo a las variaciones de la carga hidrostática del embalse, alcanzando valores extremos, dentro de cada año, en los meses de octubre y mayo. Por otro lado, se comprueba que los **máximos y mínimos movimientos** relativos en los sucesivos años hidrológicos **permanecen estables**, si se comparan situaciones similares en cuanto a carga hidrostática actuante sobre la bóveda y estado térmico de la presa.

#### d) Control de Movimientos en Cimentación

La deformación total producida en el cimiento de la presa está generada por la carga hidrostática. De esta forma, la mayor parte de las deformaciones acumuladas, de tipo

plástico, no recuperables, se originaron, en una primera fase, entre octubre de 1989 y octubre de 1993. Posteriormente, en el cimiento se generaron deformaciones elásticas recuperables, coincidiendo con las variaciones del nivel de embalse.



**Figura 25.** - Variación de los Extensómetros 26 lado izdo y dcho entre 1989 y 2005.

## Modelo de Cálculo

### a) Descripción del modelo

El Modelo de Comportamiento se ha realizado empleando el Método de Elementos Finitos, desarrollando los cálculos en régimen elástico.

El modelo es tridimensional, reflejando lo más fielmente posible la geometría de la presa, tanto de la bóveda como en su cimentación y estribos. Un aspecto relevante, es que se ha tenido en cuenta que, durante la construcción de la presa, se emplearon diferentes tipos de hormigones, por lo que se han empleado elementos con distintas características resistentes.

El modelo refleja de forma suficientemente aproximada la topografía, geología y características geotécnicas del terreno. El modelo del terreno contempla las discontinuidades y fallas existentes que, por su importancia, puedan alterar el comportamiento de la presa, y permite la asignación de características elásticas a esos elementos que simulen su comportamiento real.

Los cálculos del modelo se realizan con el programa **GEHOMADRID**, elaborado por el Grupo de Modelos Matemáticos en Ingeniería (M2i) del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), en colaboración con la Universidad de Hohai en Nanking (China). El programa, basado en la aplicación del lenguaje

FORTRAN 90 a un código de elementos finitos, tiene por objeto el análisis mediante elementos finitos del problema del sólido continuo.

El modelo Resultante estaba finalmente compuesto por un total de 27.724 tetraedros cuadráticos, 938 prismas cuadráticos y 41.823 nodos.

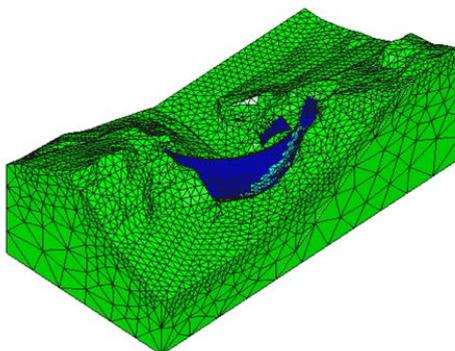


Figura 26. - Modelización 3D de la cerrada

#### b) Estado de Referencia

Como estado de cargas de referencia en el modelo, se considera inicialmente el resultante de la combinación de las siguientes acciones: *Peso propio*, del terreno y presa, se considera actuante y constante para todos los estados de carga; *Carga hidrostática*, embalse vacío, nivel de embalse a cota 1.020 msnm; *Temperatura*, estado térmico del mes de octubre, inicio del año hidrológico. Este estado de cargas coincide con el estado de carga real al que estaba sometida la presa de Riaño en **octubre del año 1.989**, fecha en la que entra en funcionamiento el Sistema de Auscultación Automatizado y desde la que se tienen registros históricos de los datos aportados por los dispositivos de instrumentación.

#### c) Análisis de Sensibilidad

Una vez desarrollado el modelo completo, se han comprobado los resultados en situaciones de cargas normales y con unas características de los materiales razonables, observándose si en alguna zona se obtienen valores no esperables, tanto en deformaciones como en tensiones. Comprobada, de esta manera, la validez del modelo, por conocimiento de la realidad, se ha procedido a realizar un estudio de la sensibilidad del mismo frente a modificaciones de los distintos parámetros que en él intervienen (características elásticas y térmicas de los materiales empleados), con el objeto de determinar su peso en la respuesta.

#### *d) Ajuste Modelo – Realidad*

Este análisis permitió, en el momento de calibrar el modelo y ajustarlo a las cargas y respuestas reales, conocer los parámetros que más influyen y por tanto reducir tiempo y esfuerzos en la obtención de unos resultados lo más próximos posibles a la realidad.

Se comparan a modo de ejemplo los resultados de desplazamientos obtenidos en coronación de la presa en la ménsula central entre los meses de octubre de 2002 y junio de 2003. Entre estas fechas el nivel de embalse ascendió entre la cota 1.060 y la 1.100 msnm, mientras que la temperatura en la bóveda descendió de 12,9 °C a 9,6°C ( $\Delta T = 3,3^{\circ}\text{C}$ ). En el mismo intervalo de fechas, el péndulo correspondiente a dicha zona de control, registró movimientos de 2,69 mm y 31,92 mm hacia aguas abajo, con un recorrido de 29,23 mm. Calculando estos estados de carga en el modelo numérico, se obtiene un movimiento relativo de 30,67 mm, con lo que la variación entre la realidad y el modelo es inferior al 5 %.

**Caso práctico 3:** Sistema de monitoreo automatizado con gestión remota, implantado por EPTISA IIC, en el viaducto de Pont de Candí, localizado en Montblanc (España).

#### **Introducción**

La construcción del Viaducto de Pont de Candí, perteneciente al subtramo IVB, del tramo Lleida Martorell de la Línea de Alta Velocidad (L.A.V.) Madrid – Barcelona F. Francesa, fue llevada a cabo por la Unión temporal de Empresa (U.T.E.) FCC- COMSA. La finalización de dicha construcción se materializó en julio de 2002.

El viaducto está formado por un tablero continuo de 413 m de longitud con 10 vanos de 35+8x43+34 m. La altura de las pilas varía entre 7,5 m (P1) y 56 m (P5). Las cimentaciones de las pilas se realizaron mediante pilotes de 1,65 m de diámetro y profundidades variables entre 17 y 28 m, que se agrupan en encepados de 6, 8 o 9 pilotes, dependiendo de la pila.

Tras unas campañas de nivelación topográfica realizadas en el tablero del viaducto durante mayo de 2007, se detectan desplazamientos verticales en el tablero, localizados principalmente en la zona de las pilas centrales 4 a 7. Dichas pilas se ubican en las proximidades del fondo del valle que salva el viaducto.

Comparando la nueva campaña topográfica, con las realizadas en septiembre de 2002, se pudo comprobar que se habían producido levantamientos del tablero en las pilas P4,

P5 P6 y P7 del orden de 1,9 cm, 16,2 cm, 18,3 cm y 4,0 cm respectivamente. También se observó que se estaban produciendo giros en las cuatro pilas afectadas.



**Figura 27.** - Viaducto de Pont de Candí Año 2003

Ante la problemática surgida, ADIF y FCC-COMSA, decidieron poner en marcha una serie de actuaciones para corregir la problemática detectada, contratando a EPTISA IIC para llevar a cabo la auscultación, tanto del terreno como del propio viaducto.

### **Auscultación de la fase previa**

Tras la detección del levantamiento del tablero, era evidente la existencia de un problema en el viaducto, pero era necesario cuantificar el alcance de dicho problema y, al mismo tiempo, determinar el origen que lo estaba produciendo.

Por otro lado, FCC-COMSA, inició una serie de intervenciones en el propio viaducto, para compensar los esfuerzos y sollicitaciones a que se estaba viendo sometido el mismo, como consecuencia de este levantamiento inesperado. Así pues, también era necesario comprobar, mediante la instalación de dispositivos de instrumentación, que las intervenciones que se estaban ejecutando, estaban siendo efectivas.

Las intervenciones realizadas por FCC-COMSA durante el año 2007 fueron las siguientes:

- En las pilas 2 a 8 se montan estructuras metálicas por el lateral de las pilas que impiden el movimiento relativo entre tablero y fuste.
- A finales de 2007, se repone la rasante de la estructura, apeándola en las pilas 4 a 7 mediante gastos hidráulicos, retirando los apoyos y rebajando las mesetas existentes.

Durante el 2008, dado que se estaba preparando la estructura para iniciar la ejecución del terraplén que se explicará posteriormente, se realizaron otra serie de intervenciones adicionales:

- Se modificaron las estructuras laterales, para tener capacidad de regular su distancia relativa a la pila y así poder regular la fuerza de acodamiento.
- Se modificaron los apoyos de las pilas 4 y 7, cambiando su esquema de guiados longitudinalmente a completamente libres. De esta forma, la fuerza transversal se resistía plenamente con la estructura lateral.
- Se modificaron los apoyos en las pilas 5 y 6, cambiando de fijos a libres. El cambio en sentido longitudinal, viene motivado porque la ejecución del terraplén posterior, iba a reducir de forma considerable la altura libre de las pilas.

Al mismo tiempo que FCC-COMSA iba ejecutando las intervenciones indicadas anteriormente, EPTISA IIC se centró en la instalación de dispositivos de control, tanto en la propia estructura como en el terreno natural.

La información obtenida a partir de la auscultación instalada y controlada durante esta fase previa (julio de 2007 a agosto de 2008), fue determinante para averiguar el motivo por el que se había originado el problema y permitió disponer de una información muy importante para el posterior desarrollo del Proyecto de Reparación del Viaducto.

### **Parámetros de control en fase previa**

La auscultación durante la fase previa se centró en:

- Control de la estructura: cimentaciones, tablero, estructuras laterales y pilas.
- Control del terreno natural: estudio del mismo, en superficie y a diferentes profundidades.

A continuación se resumen los parámetros controlados y los dispositivos empleados para llevar a cabo dicho control.

\* Control de **desplazamientos verticales en profundidad del terreno natural** mediante **tuberías de sliding micrometer/deformeter, tuberías increx y tuberías de anillos metálicos**. Se instalaron 6, 9 y 2 uds respectivamente.

\* Control de **desplazamientos horizontales en profundidad del terreno natural**, mediante **tuberías inclinométricas**. Se instalaron 2 uds.

- \* Control de **desplazamientos verticales en estribos y tablero**, mediante red de **clavos de nivelación**. Se instalaron aproximadamente 100 uds.
- \* Control de **desplazamientos verticales en la base de las pilas**, mediante **clavos de nivelación**. Se instalaron 9 uds.
- \* Control **taquimétrico de las pilas** para comprobar el posible vuelco, mediante la instalación de **prismas de reflexión**. Se instalaron un total de 32 uds.
- \* Control de **fisuras en riostras**, mediante la instalación de **bases de ternas**.
- \* Control de **giros en zapatas**, mediante la instalación de **extensómetros de 1 varilla** preparados para nivelación en cabeza. Se instalaron 4 por zapata en las 4 pilas centrales (pilas 4 a 7).
- \* Control de **tensiones en estructuras laterales y en la base de las pilas**, mediante la instalación de **extensómetros de cuerda vibrante (ECV)**. Estos dispositivos permiten conocer las deformaciones unitarias (microdeformaciones) del elemento al que se anclan. Conocido el módulo de deformación de dicho material, a partir de las deformaciones unitarias medidas, pueden calcularse los esfuerzos a los que está sometido dicho elemento. Rango +/- 1500 microdeformaciones y sensibilidad de 1 microdeformación. Se instalaron 24 ECV distribuidos en las estructuras laterales de las pilas 3 a 8 y 16 ECV distribuidos en la base de las pilas 4 a 7.
- \* Control de **movimientos del terreno en superficie**, mediante la instalación de una **red de hitos de nivelación de 145 ptos**, que se extendía en toda la longitud del viaducto en una banda de 200 m de anchura.

La descripción y características de los dispositivos mencionados en este apartado, se puede consultar en los casos prácticos 1 y 2.

Gran parte de las perforaciones ejecutadas para la instalación de sensores, se realizaron con recuperación de testigo, que posteriormente se llevó a laboratorios especializados, para la realización de diferentes ensayos.

El seguimiento de todos los dispositivos instalados lo llevó a cabo personal de EPTISA IIC, que se mantenía en la obra, de forma permanente, realizando campañas continuas, con una frecuencia semanal/quincenal.

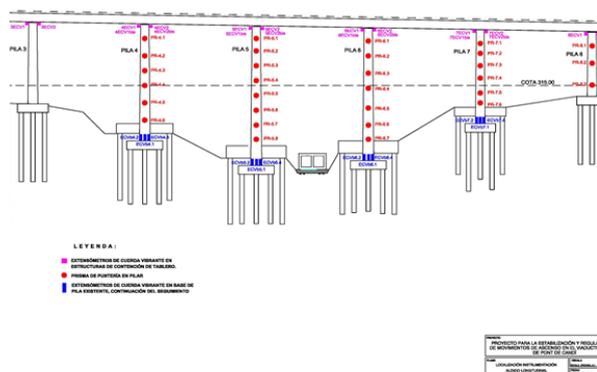


Figura 28. - Croquis dispositivos de control en estructura

### **Resumen de resultados obtenidos en la fase previa**

Los primeros dispositivos instalados, para control de desplazamientos verticales en profundidad, presentaban una longitud de 30 m, pero pronto se puso de manifiesto que el espesor de la capa activa llegaba a profundidades mayores, por lo que el resto de dispositivos se instalaron a mayor profundidad.

Las velocidades de levantamiento en las pilas 4 a 7, mantenían un cierto ajuste lineal con el tiempo, si bien se observaba una velocidad de hinchamiento mayor en las estaciones de invierno – primavera,

El punto más profundo del valle se localizaba en la cota 283 aproximadamente. Los ensayos mineralógicos por difracción de rayos X indicaban presencia de anhidrita en las argilitas localizadas por debajo de la cota 263.

Durante la ejecución de las perforaciones en seco se pudo comprobar la presencia de agua en las argilitas.

La actividad principal de hinchamiento que registraban los dispositivos, se producía a una profundidad comprendida entre 22 y 45 m por debajo del fondo del valle. La capa más activa se situaba por debajo de un nivel de yesos localizado en la cota 263.

El plano medio del tramo con mayor actividad se situaba en torno a la cota 255. El plano medio del tramo que mostraba una actividad de hinchamiento significativa se situaba en torno a la cota 245. La actividad de hinchamiento por encima de la cota 263 era muy reducida.

Las nivelaciones realizadas en las pilas y encepados, en el tablero del viaducto y en la red de hitos de superficie, eran congruentes.

### **Solución adoptada**

Tras analizar con detalle toda la información obtenida a partir de la auscultación, así como de los ensayos de laboratorio realizados, se optó como solución de reparación, la ejecución de un relleno en la zona media – baja del valle, sobre las cimentaciones de las pilas 4 a 7. Con esta solución, que suponía un aumento de la presión de confinamiento sobre los niveles de la capa activa, se esperaba, por un lado, reducir considerablemente la velocidad de hinchamiento. De esta forma las posibles actuaciones de corrección que fuese necesario realizar, a futuro, en la estructura, se espaciarían en el tiempo. Por otro lado, se esperaba reducir a largo plazo el levantamiento final total.

La ejecución del relleno, también produciría la disminución de la permeabilidad de la roca, debido al aumento de la presión de confinamiento sobre sus discontinuidades.

Finalmente, se evitarían infiltraciones en todo el área sobre el que se localizase la base del relleno y el sistema de cunetas y bajantes permitiría controlar, en cierto modo, las aguas de escorrentía que se conducirían hacia la obra transversal de drenaje que acompañaría a esta solución.

FCC-COMSA, se encargó de llevar a cabo el relleno. Complementariamente a esta solución constructiva, se diseñó un sistema de auscultación, adicional al existente de la fase previa, que también ejecutaría EPTISA IIC.

La ejecución del relleno se planteó en dos fases, con un tiempo de espera entre ambas, para analizar e interpretar, la información que se obtendría del sistema de auscultación adicional.

La primera fase finalizaba a la cota 315, lo que supone una altura de 33 m por encima del fondo del valle. Dependiendo de la reducción en la velocidad e hinchamiento, se acometería la segunda fase hasta alcanzar la cota máxima 330. El relleno se extendía entre las pilas 3 y 8 del viaducto.

Para minimizar la sobrecarga en los pilotes de las cimentaciones existentes, se ejecutarían unos nuevos encepados de protección, en las pilas 4, 5, 6 y 7, que recibirían directamente la carga del relleno. Asimismo, estos encepados disponían de pilotes perimetrales a la cimentación existente.



**Figura 29.** - Viaducto durante Fase I. Año 2010

### **Parámetros de control en la fase 1**

Al comienzo de esta fase (principio de 2009) se estableció un protocolo de trabajo, para intentar mantener operativos el mayor número posible de dispositivos instalados durante la fase previa. Evidentemente, algunos sensores, por motivos lógicos referentes a la ejecución de la nueva obra, quedaron inoperativos.

Asimismo se implantó una nueva red de sensores que permitía controlar nuevos parámetros no controlados en la fase anterior o reemplazar a otros sensores que eran dados de baja, por la ejecución de la obra.

De esta forma, la auscultación en la fase 1 se centró en:

- Control de la estructura previa: cimentaciones, tablero, estructuras laterales y pilas.
- Control de la estructura nueva: cimentaciones.
- Control de relleno: coronación cuerpo y cimiento.
- Control del terreno natural: estudio del mismo, en superficie y a diferentes profundidades.

Además de heredar el seguimiento de los parámetros ya descritos en la fase previa, se inició un control adicional de los parámetros que se indican a continuación:

\* Control de **desplazamientos verticales en profundidad del terreno natural**, mediante **tuberías de sliding micrometer/deformeter**, Se instalaron 4 nuevas uds.

\* Control de **desplazamientos verticales en el cuerpo del terraplén**, mediante **tuberías de sliding micrometer/deformeter**. Se instalaron 2 uds.

\* Control de **desplazamientos verticales en el cimiento del terraplén**, mediante **placas de asiento**. Estos dispositivos constan de un sistema de placas que se posiciona en el cimiento del terraplén, previamente al relleno, y una varilla de acero protegida que se va recreciendo al mismo tiempo que se procede al recrecido del terraplén. La cabeza de la varilla permite el acople de un elemento para nivelación topográfica. Se instalaron un total de 28 uds.

\* Control de la **presión intersticial en el terreno natural**, mediante la instalación de **piezómetros de cuerda vibrante**. Se instalaron 8 uds

\*Control del **desplazamiento vertical relativo entre zapata y pilotes originales**, mediante la instalación de **extensómetros de varilla**

\***Control de giro en pilas** mediante la instalación de **clinómetros automatizables**. Se instalaron 16 uds, 2 en base y 2 en cabeza, de las 4 pilas centrales.

\* Control de **tensiones en los pilotes de las zapatas de refuerzo**, mediante la instalación de **extensómetros de cuerda vibrante (ECV)**. Se instalaron un total de 96 uds, distribuidos en los pilotes de las zapatas de las 4 pilas centrales.

\* Control de la **presión transmitida por la zapata de refuerzo, al terreno localizado sobre la zapata original**, mediante la instalación de **células de presión**. Se instalaron un total de 16 uds, a razón de 4 por cada zapata de las pilas centrales (4, 5, 6 y 7).

\* Control de la **presión correspondiente al empuje del cuerpo del terraplén sobre los laterales de las pilas existentes**, mediante la instalación de **células de presión**. Se instalaron un total de 24 uds.

\* Control de los **movimientos verticales en la obra de drenaje**, mediante la instalación de una **red de nivelación** en su interior, constituida por 53 pts de nivelación.

La descripción y características de los dispositivos mencionados en este apartado, se puede consultar en los casos prácticos 1 y 2.

### **Automatización y gestión remota del sistema de auscultación**

A finales del año 2010, EPTISA IIC, procedió a la implantación de un sistema, para la adquisición automática de los datos procedentes de todos los sensores eléctricos.

Para ello, se llevó la señal de los sensores, mediante mangueras de cable multihilo, hasta unos armarios de centralización (donde se pueden realizar lecturas manuales de dichos sensores) y desde estos armarios, hasta las estaciones de adquisición automática (EMA), donde se almacenan las lecturas de los sensores, de forma automática.

Para la gestión remota del sistema se ha empleado un ordenador de control con su correspondiente programa modular SAYTL WEB. Todo el sistema de adquisición automática se ha dejado instalado en el interior del cajón visitable del tablero, quedando resguardado ante las condiciones ambientales externas.



**Figura 30.** - Armarios Manuales y Estaciones Automáticas de Adquisición

El Ordenador de control instalado en el viaducto, se encuentra conectado , vía remota, a otro ordenador localizado en las Oficinas Centrales de EPTISA IIC. Este segundo ordenador actúa como ordenador replicante de seguridad, haciendo copias continuas de los historicos de datos, adquiridos por el sistema.

El software SAYTL WEB, empleado para la gestión, es de tipo modular y se ha ido diseñando conforme a las diferentes necesidades que ha ido planteando el cliente.

Esta versión permite acceder al sistema automatizado, de forma remota, desde cualquier ordenador que disponga de conexión internet, sin necesidad de tener

instalado el software. Para ello, simplemente se necesita la ruta de acceso al programa, y la asignación de un usuario y una contraseña.

De esta forma, aquellos usuarios con permiso para acceder al sistema, podrán configurar nuevos sensores, modificar las unidades de ingeniería de los dispositivos, modificar la frecuencia de lecturas, realizar peticiones manuales de lectura instantánea y volcar el histórico de datos en soporte gráfico y numérico, para la elaboración de informes.



**Figura 31.** - Página de acceso al sistema

El Software permite asignar usuarios con diferentes rangos de acceso, de forma que ciertos usuarios podrán tener acceso total a la gestión del sistema, mientras que otros usuarios sólo podrán acceder a ciertas funciones del mismo.

Finalmente el software incluye un módulo de avisos/alarmas, de forma que el sistema envíe un e-mail o un sms, a las personas seleccionadas en el directorio, en caso de que los valores obtenidos superen los valores preestablecidos.



**Figura 32.** - Sinóptico principal de acceso a los diferentes grupos de sensores



Figura 33. - Sinóptico de acceso a los datos de las CPT en zapatas

### **Situación actual de la obra**

Durante la realización del relleno se fue observando una reducción notable de las velocidades de levantamiento del viaducto, a medida que progresaba la altura del relleno.

Los diferentes dispositivos empleados para controlar los movimientos verticales, tanto en la estructura, como en el terreno natural, muestran una importante disminución en la velocidad de hinchamiento, como consecuencia del incremento en la presión de confinamiento, que ha supuesto la ejecución de esta primera fase.

También se observa una cierta tendencia a la estabilización en los movimientos horizontales de las pilas (desplazamientos longitudinales y transversales).

Las fuerzas transversales acumuladas en las estructuras laterales de acodamiento, se miden periódicamente con gatos hidráulicos.

Actualmente, todos los sensores automatizados se leen 3 veces al día, los 365 días del año. Asimismo, para los dispositivos de seguimiento manual, el personal de EPTISA IIC, se desplaza a la obra con una periodicidad trimestral, para la toma de lecturas y la realización de un informe de seguimiento.

Los datos obtenidos hasta la fecha, hacen pensar que quizá no sea necesaria la ejecución de la fase 2 de relleno. Los resultados que se obtengan en próximas campañas y el estudio continuo que se realiza de este viaducto, determinarán si, finalmente, esta fase 2 se materializa o queda simplemente en proyecto.

## Conclusiones

La instalación de un sistema de instrumentación geotécnica o estructural, permite detectar, de manera oportuna, las anomalías que se desarrollen o tengan tendencia a desarrollarse, tanto durante la construcción, como en la fase operativa de las obras.

Este tipo de sistema de investigación, es el medio más eficiente para que el ingeniero encargado vigile el comportamiento de una obra y evalúe su seguridad, puesto que mediante la información obtenida de los diferentes sensores, se puede determinar, de forma más concreta y específica, el comportamiento de un terreno que se encuentra sometido a un proceso de inestabilidad, o las solicitaciones a las que se puede encontrar sometida una estructura localizada en un zona inestable.

La implantación de un sistema de monitoreo, permite mejorar la eficacia de los mantenimientos preventivos y correctivos, puesto que se suelen detectar las anomalías en los primeros estados de su aparición, siendo más fácil su corrección, que en aquellos casos en los que dicha anomalía se encuentra muy avanzada.

Por otro lado, el empleo de sistemas de monitoreo, permite no sólo cuantificar el impacto de un problema, sino también aclarar cuál es la causa que genera dicho problema. Por lo que a la hora de plantear actuaciones correctoras, se pueden aplicar soluciones definitivas que resuelvan el origen del problema, en vez de plantear soluciones temporales que frenen momentáneamente el problema.

Asimismo, el coste que supone implantar un sistema de monitoreo, es ínfimo, en comparación con el ahorro económico que puede suponer para el Estado o para las Constructoras, aplicar soluciones correctoras o modificar durante la marcha, el propio proceso constructivo, disponiendo de información detallada que permita asegurar el éxito de dicha solución correctora o de dicha modificación realizada durante la propia ejecución.

En Costa Rica, la necesidad de implantar sistemas de aviso/alarma se ha mencionado en varias ocasiones y en distintos foros. Sería, por tanto, recomendable, profundizar más en detalle sobre este tipo de actuaciones y plantearse la implantación de sistemas de monitoreo, en zonas de alta vulnerabilidad.

## Referencias bibliográficas

**Suárez, Jaime (2012).** *Deslizamientos, Tomo I: Análisis Geotécnico*. Bucaramanga, Colombia.

**Olalla, Claudio (2007).** *“Auscultación de Laderas”*. Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses. Zaragoza, España.

**José Alberto Rivas Lozano (ADIF) y Juan Manuel García Guerra (EPTISA IIC)**  
**(2009):** *“Instrumentación de taludes y terraplenes inestables en la red convencional de ADIF”.*

**Rodríguez de la Torre (Confederación Hidrográfica del Duero), Juan Manuel García (EPTISA IIC), Carlos Moreno (EPTISA IIC), Antonio Manuel Pastor (Cedex), Pablo Mira (Cedex) José Antonio Fernández (Cedex).** **(2008)** *“Sistema integral de auscultación en la presa de Riaño para el control de la seguridad de su comportamiento”.*

**Confederación Hidrográfica del Duero (Febrero 1970).** *“Justificación Técnica del Proyecto Reformado de la Presa del embalse de Riaño”.*

**Confederación Hidrográfica del Duero (Diciembre 1973).** *“Estudio de las bajas resistencias de los hormigones de la Presa de Riaño (León) durante la campaña del año 1968”.*

**EPTISA IIC (Marzo y Noviembre 1983).** *“Informes sobre el control de las vibraciones producidas por la ejecución de un túnel en las inmediaciones de la Presa de Riaño, León”.*

**EPTISA IIC (2005).** *“Informe Histórico de Auscultación de la Presa de Riaño. Periodo: 01/10/89 - 30/10/05”.*

**EPTISA IIC (2006).** *“Informe del Modelo de elementos Finitos de la Presa de Riaño”.*

**Rafael Rodríguez (Subdirector de Construcción ADIF) José Manuel Gutiérrez (Director Dpto Geotecnia FCC), M. Victoria Gil (Dpto Geotecnia FCC), Joaquín Roura (Subdirector Transportes FCC).** **(2012)** *“Levantamiento de cimentaciones en terrenos salinos. Viaducto de Pont de Candí. Problemática planteada y solución adoptada.”*

**EPTISA IIC** *“Informes continuos de auscultación del viaducto de Pont de Candí en fase previa. Julio 2007 - agosto 2008”.*

**EPTISA IIC** *“Informes continuos de auscultación del viaducto de Pont de Candí. Enero 2009 – febrero 2011”.*

**EPTISA IIC, (febrero 2011)** *“Informe final Auscultación de la Fase I del Viaducto de Pont de Candí”.*

**EPTISA IIC** *“Informes periódicos de auscultación del viaducto de Pont de Candí. Marzo 2011 – actualidad”.*