

TEMA 9: Evaluación y auscultación de las obras e instalaciones hidráulicas.

Índice

1.	Introducción y Marco General de la Seguridad Hidráulica	3
2.	Objetivos Fundamentales de la Auscultación	3
3.	Clasificación de las Inspecciones Técnicas Visuales	4
3.1.	Inspecciones Visuales Ordinarias	4
3.2.	Inspecciones Visuales Principales o Periódicas	5
3.3.	Inspecciones Extraordinarias.....	5
4.	Ensayos no destructivos aplicados a la Hidráulica	6
5.	Auscultación Instrumental.....	6
5.1.	Instrumentación Hidráulica: control de filtraciones y presiones	7
5.1.1.	Piezómetros de Tubo Abierto (Tipo Casagrande)	7
5.1.2.	Piezómetros de Cuerda Vibrante	8
5.1.3.	Aforadores de Filtración y Vertederos de Medida.....	8
5.2.	Control de Deformaciones y Movimientos.....	9
5.2.1.	Péndulos Directos e Inversos	9
5.2.2.	Fisurómetros, Extensómetros de Juntas y Clinómetros.....	10
5.2.3.	Redes de Nivelación Topográfica y Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS).....	12
5.3.	Control de Tensiones y Parámetros Térmicos.....	12
5.3.1.	Células de Presión Total y Extensómetros	12
5.3.2.	Termopares y Sondas Térmicas RTD (Resistencia de Platino)	14
5.4.	Variables exteriores	14
5.4.1.	Variables Hidrológicas e Hidráulicas	14
5.4.2.	Variables Meteorológicas y Climáticas.....	15
5.4.3.	Variables Geodinámicas y Sísmicas	15
6.	Patologías Estructurales Frecuentes en Obras Hidráulicas.....	15
6.1.	Erosión Interna (Tubificación / Piping).....	15
6.2.	Subpresión Excesiva y Pérdida de Eficacia del Drenaje.....	16
6.3.	Reacción Alkali-Árido (Sólido Creciente) y Ataque por Sulfatos	16
6.4.	Cavitación y Erosión Hidrodinámica	16
7.	Normativa de Seguridad y Planes de Emergencia.....	16

TEMA 9. EVALUACIÓN Y AUSCULTACIÓN DE LAS OBRAS E INSTALACIONES HIDRÁULICAS

7.1. Normas de Explotación.....	16
7.2. Planes de Emergencia.....	16

1. Introducción y Marco General de la Seguridad Hidráulica

Las infraestructuras hidráulicas, tales como presas, embalses, canales de gran conducción, balsas de regulación y sistemas de defensa contra inundaciones, representan algunas de las obras de ingeniería civil más críticas y complejas del mundo. Su correcto funcionamiento es vital para el abastecimiento de agua potable, el riego agrícola, la generación de energía hidroeléctrica y la protección de poblaciones e infraestructuras situadas aguas abajo.

Sin embargo, estas estructuras se encuentran sometidas a un espectro severo de fuerzas mecánicas, hidráulicas, químicas y ambientales durante su vida útil. La interacción constante entre el agua y las estructuras de hormigón, tierra o escollera induce fenómenos evolutivos de degradación que pueden comprometer la estabilidad global de la infraestructura. Por ello, la evaluación y la auscultación técnica continua no son meros complementos operativos, sino pilares obligatorios de la gestión de la seguridad.

La historia de la ingeniería hidráulica demuestra que los fallos catastróficos raramente ocurren de forma instantánea y sin aviso previo; la gran mayoría de los colapsos o incidentes graves van anteceditos por anomalías detectables que se manifiestan de manera sutil en forma de incrementos de presión, pequeños movimientos, variaciones térmicas anómalas o cambios en el quimismo y caudal de las filtraciones. Establecer metodologías rigurosas para identificar, procesar e interpretar estas señales es el objetivo fundamental de la auscultación.

2. Objetivos Fundamentales de la Auscultación

La implementación de planes integrales de control y auscultación persigue cuatro objetivos primordiales dentro del ciclo de vida de una obra hidráulica:

- **Garantía de la Seguridad Pública y Estructural:** El objetivo prioritario es evitar la rotura de la obra y mitigar el riesgo asociado para las vidas humanas, el medio ambiente y los bienes socioeconómicos aguas abajo.
- **Verificación de las Hipótesis de Proyecto:** Durante las fases de primer llenado y puesta en servicio, la auscultación juega un papel importante en los cálculos teóricos de diseño. Permite contrastar si las deformaciones, subpresiones y tensiones reales se corresponden con los rangos numéricos previstos en los modelos matemáticos y geotécnicos iniciales.
- **Detección Temprana de Patologías Latentes:** Identificar de forma precoz fenómenos como la erosión interna (piping), la degradación del hormigón por reacciones álcali-árido, la pérdida de eficacia de las pantallas de impermeabilización o el deterioro de la cimentación rocosa antes de que causen daños irreversibles.

- **Optimización Económica del Mantenimiento:** Disponer de datos precisos permite pasar de un mantenimiento estrictamente reactivo (reparar cuando falle) a una estrategia preventiva y predictiva, reduciendo drásticamente los costes de explotación y prolongando sustancialmente la vida útil remanente de la instalación.

3. Clasificación de las Inspecciones Técnicas Visuales

A pesar del desarrollo de sofisticados sensores electrónicos, tal como ya se nombraron en el apartado 4 del tema 6 denominado “*control y vigilancia de presas y embalses*”, la inspección visual directa efectuada por ingenieros y técnicos cualificados sigue constituyendo el primer eslabón del control de seguridad. Las inspecciones deben regirse por protocolos estandarizados y estructurarse en función de su periodicidad y alcance, que se deberán recoger en las Normas de Explotación (**NEX**) de la infraestructura correspondiente:

3.1. Inspecciones Visuales Ordinarias

Realizadas habitualmente por el personal técnico de explotación de forma semanal o quincenal. Su propósito es vigilar el estado general de la instalación y detectar anomalías evidentes a simple vista. Comprenden la revisión de los paramentos visibles, la comprobación del libre flujo en canales de drenaje, la verificación del estado de coronación y la observación de posibles humedades o vegetación imprevista en zonas secas.

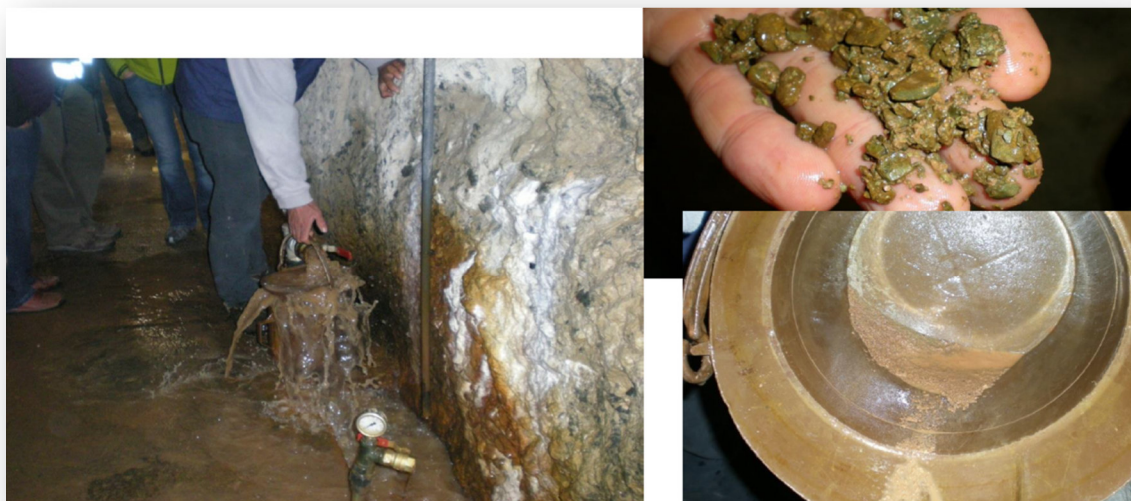


Figura 1. Ejemplo de un dren con sólidos en suspensión localizado durante una visita de inspección visual ordinaria. En estos casos hay que avisar inmediatamente al técnico responsable de la explotación de la infraestructura.



Figura 2. Ejemplos de diferentes manifestaciones de deterioro del hormigón: degradación en la que se observa disgregación de áridos (foto arriba a la izquierda), eflorescencias (foto arriba a la derecha), coqueras (foto abajo a la izquierda) y rezumes (foto abajo a la derecha)

3.2. Inspecciones Visuales Principales o Periódicas

Tienen un carácter marcadamente formal y exhaustivo. Se ejecutan con periodicidades que oscilan entre 1 y 5 años (dependiendo de la tipología y clasificación de riesgo de la obra) por equipos de ingenieros especialistas ajenos a la explotación diaria. Implican el vaciado controlado de canales, galerías internas y, de ser viable, tramos de embalse para examinar las estructuras sumergidas, evaluar el desgaste por cavitación en aliviaderos y documentar con precisión fotográfica cualquier avance en la fisuración del hormigón.

3.3. Inspecciones Extraordinarias

Se desencadenan de forma obligatoria e inmediata tras la ocurrencia de eventos extremos excepcionales. Los principales desencadenantes son sismos de magnitudes relevantes en la zona de influencia, avenidas hidrológicas que fuercen el uso al límite de los aliviaderos y desagües de fondo, o cuando los propios instrumentos de auscultación emitan lecturas que superen los umbrales de alerta preestablecidos.

4. Ensayos no destructivos aplicados a la Hidráulica

Cuando la inspección visual o la instrumentación revelan indicios de degradación interna, se recurre a ensayos no destructivos (END) para caracterizar la magnitud del problema sin alterar la integridad estructural de la obra, algunos ejemplos:

1. **Georradar o Radar de Penetración Terrestre (GPR).** El georradar utiliza pulsos de ondas electromagnéticas de alta frecuencia que se introducen en el material y se reflejan ante discontinuidades dieléctricas. Es extraordinariamente eficaz para cartografiar el trasdós de revestimientos de hormigón en canales y túneles hidráulicos, permitiendo localizar con exactitud la presencia de oquedades, pérdidas de contacto con el terreno natural o la acumulación indeseada de agua de filtración.
2. **Ensayos de Ultrasonidos y Velocidad de Pulso Sónico.** Se basan en medir el tiempo de tránsito de una onda elástica a través del hormigón entre un emisor y un receptor. Dado que la velocidad de propagación depende directamente de la densidad y el módulo elástico del medio, las zonas con velocidades bajas delatan hormigones degradados, con alta porosidad interna, microfisuración intensa o nidos de grava deficientemente compactados durante la construcción.
3. **Termografía Infrarroja de Alta Resolución.** Esta técnica pasiva capta la radiación infrarroja emitida por las superficies de las estructuras. Dado que el agua posee un calor específico significativamente mayor que el hormigón, la roca o la tierra, las zonas que presentan filtraciones activas o humedades ocultas muestran anomalías térmicas muy marcadas (puntos fríos o calientes según la estación del año), facilitando la detección precoz de fugas en paramentos de presas o cajeros de canales.

5. Auscultación Instrumental

La auscultación instrumental en infraestructuras hidráulicas es el proceso sistemático de observación, medición y análisis de la respuesta estructural e hidráulica de la obra frente a las cargas que soporta. Mediante una red de sensores y equipos de precisión integrados en el cuerpo de la presa y sus cimientos (como péndulos, piezómetros, células de carga y extensómetros), se registran de forma continua variables críticas como deformaciones, presiones de agua, filtraciones y movimientos estructurales. Este diagnóstico permanente es fundamental para evaluar el comportamiento real de la infraestructura en comparación con sus modelos de diseño, permitiendo detectar de manera precoz cualquier anomalía o síntoma de deterioro para garantizar la seguridad operativa y prevenir fallos catastróficos.

Sensor	Diferencia lecturas manual /automático	Tipo sensor	Rango sensor
Aforo	< 2mm	Manual: Thompson (triangulares y rectangulares)	En función del ángulo del vertedero
		Automático: ultrasonidos	0-5000 mm
PCV	< 1,5 Hz		Presiones: 0,35-140 kg/cm ²
Termómetro	< 1,5 °C	Termoresistivo	-20 a 100 °C
Péndulo	< 1 mm	Manual: plancheta, coordinómetro óptico.	±25 mm
		Automático: lectores ópticos, láser, palpador magnético, palpador potenciométrico	Rango variable según tipo de sensor.
Extensómetro de varillas	< 0,5 mm	Manual: comparador	10 mm, en función del modelo
		Automático: Resistivo, LVDT	±25 mm

Tabla 1. Ejemplo de sensores, tipo, rango y diferencia de referencia entre lecturas manuales y automáticas

5.1. Instrumentación Hidráulica: control de filtraciones y presiones

El agua en el interior de una obra hidráulica puede generar fuerzas que la desestabilicen y que por tanto deben controlarse de forma meticulosa. La presión que ejerce el agua confinada en los poros de un suelo o en las fisuras de una roca se conoce como *presión intersticial*, y cuando actúa verticalmente bajo la base de una estructura se denomina *subpresión*. La instrumentación que se utiliza para medir la presión del agua se incluye a continuación:

5.1.1. Piezómetros de Tubo Abierto (Tipo Casagrande)

Consisten en una tubería perforada introducida en un sondeo, cuyo extremo inferior está rodeado de un filtro de arena. El agua asciende por el tubo hasta igualar la presión del acuífero o zona de estudio. La medición del nivel de agua (mediante una sonda de contacto eléctrico o 'limnómetro') refleja la carga hidrostática en ese punto preciso. Son

sistemas robustos, duraderos y económicos, pero presentan un tiempo de respuesta lento ante variaciones bruscas de presión en terrenos poco permeables.

5.1.2. Piezómetros de Cuerda Vibrante

Representan el estándar de la automatización moderna. Incorporan un diafragma metálico flexible unido a una cuerda de acero tensada. Los cambios de presión del agua deforman el diafragma, modificando la tensión de la cuerda. Al ser excitada electromagnéticamente, la cuerda vibra a una frecuencia resonante proporcional a la presión aplicada. Los datos se transmiten digitalmente de forma instantánea a sistemas Datalogger centrales, ofreciendo un tiempo de respuesta casi inmediato.

Las lecturas manuales se miden en Hertzios o en microsegundos. Estos valores se introducen en la fórmula correspondiente, teniendo en cuenta la frecuencia inicial, la constante del sensor y el valor de la lectura realizada para obtener la presión en Kg/cm².

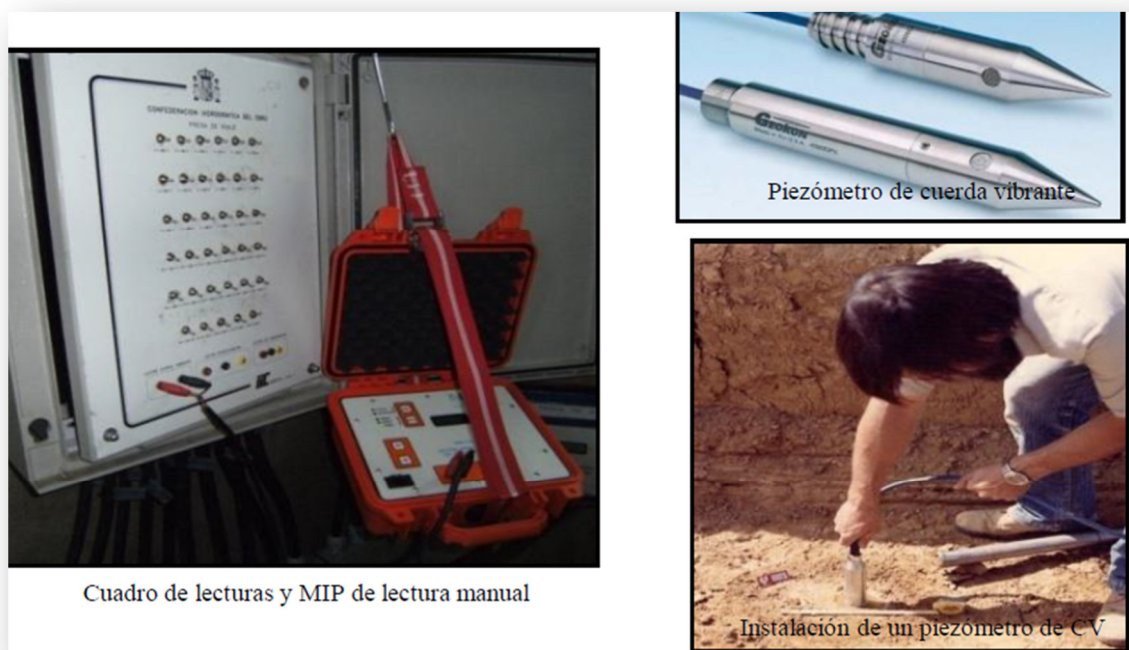


Figura 3. Piezómetro de cuerda vibrante, instalación y cuadro de lectura con lector manual

5.1.3. Aforadores de Filtración y Vertederos de Medida

Toda obra hidráulica experimenta cierto grado de filtración a través de su cuerpo o cimentación. El objetivo es recolectar estas aguas mediante redes de drenes internos y conducirlas hacia las galerías de inspección, donde se disponen aforadores provistos de vertederos calibrados (generalmente de sección triangular en 'V' a 90° para caudales pequeños, o rectangulares para caudales mayores).

Las lecturas manuales se leen en una regleta en mm, este valor se introduce en una fórmula según la sección del vertedero para obtener el caudal en l/min.

La auscultación del caudal de filtración debe analizar combinadamente dos variables críticas:

- *Evolución del caudal:* Un incremento repentino del caudal sin una subida correlativa del nivel del embalse denota el fallo de algún elemento impermeabilizante.
- *Turbidez del agua:* Si el agua filtrada arrastra finos (turbidez), es un indicador inequívoco de erosión interna regresiva, una de las patologías más destructivas en presas de materiales sueltos.



Figura 4. Aforo de sección triangular a 90°, con regleta manual y lector de ultrasonidos automático.

5.2. Control de Deformaciones y Movimientos

El comportamiento mecánico de una estructura hidráulica se traduce directamente en movimientos espaciales bajo la acción del empuje hidrostático, los cambios térmicos y las cargas sísmicas.

5.2.1. Péndulos Directos e Inversos

Estos sensores se utilizan para la medición de la deformación horizontal global en presas de hormigón (gravedad, arco o contrafuertes). Los datos se leen en un pie de rey en mm, el movimiento absoluto se obtiene de la resta del valor leído con respecto al origen de las medidas.

Péndulo Directo: Un cable de acero de alta resistencia se ancla en la parte superior de la estructura (coronación) y cuelga libremente por el interior de una chimenea vertical hasta la base, donde se estabiliza con una pesada masa sumergida en un amortiguador de aceite. Permite medir los desplazamientos horizontales de la coronación con respecto a la base.

Péndulo Inverso: Se utiliza para fijar un punto de referencia absoluto e inmóvil en la roca profunda, muy por debajo de la zona de influencia de las cargas de la presa. El cable se ancla al fondo de un sondeo profundo bajo la cimentación y asciende verticalmente gracias a un flotador de gran empuje situado en su extremo superior en la galería de la base. Al combinar ambos péndulos, se obtiene la deformación real y total de la estructura en cualquier instante.

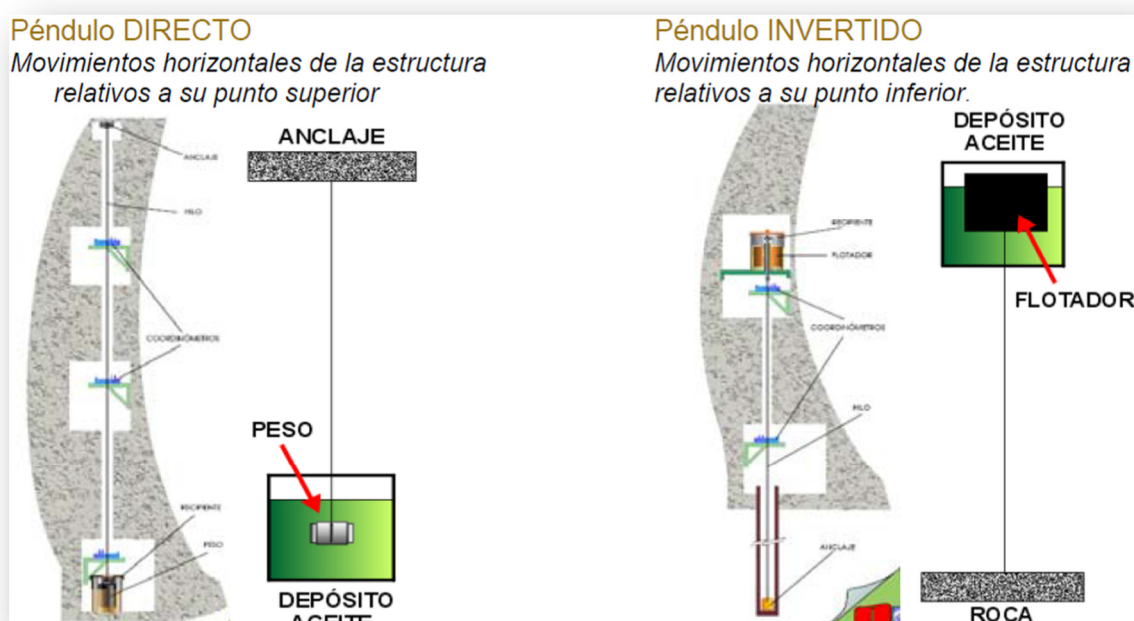


Figura 5. Esquema de la disposición de un péndulo directo y de un péndulo invertido

5.2.2. Fisurómetros, Extensómetros de Juntas y Clinómetros

Las juntas constructivas y las grietas accidentales requieren un seguimiento tridimensional continuo tanto en las presas de hormigón como en las galerías de las presas de materiales sueltos si las hubiera. Los datos de estos sensores se miden en mm, salvo el clinómetro que se mide en grados.

- **Fisurómetros mecánicos** (tipo deformímetro): Utilizan bases de medición fijadas a ambos lados de la fisura. El operador mide periódicamente la distancia exacta con un calibre digital.
- **Extensómetros de juntas tridimensionales:** Transductores eléctricos que registran de forma automática los movimientos en los tres ejes espaciales (apertura/cierre, deslizamiento vertical y cizallamiento horizontal).

- **Clinómetros:** Sensores de altísima precisión destinados a registrar variaciones angulares o giros locales en los bloques de hormigón o en los muros de contención.



Figura 6. Base para medida de juntas tridimensional, reloj comparador para lectura manual y sensores automáticos en junta tridimensional.



Figura 7. Base de clinómetro automatizada y medición manual de giros con el lector correspondiente.

5.2.3. Redes de Nivelación Topográfica y Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)

Para monitorizar los movimientos absolutos en la superficie exterior de la obra (paramento de aguas abajo, estribos naturales del terreno, coronación de presas de tierra) se implanta una red exterior de hitos topográficos. Mediante lecturas de alta precisión utilizando estaciones totales robotizadas o receptores GNSS de grado geodésico permanente, se calculan las coordenadas tridimensionales absolutas respecto a una red de bases estables situadas fuera del modelo geodinámico de la presa.

5.3. Control de Tensiones y Parámetros Térmicos

Las fuerzas internas que actúan en la masa estructural de las obras hidráulicas, así como las variables climáticas que las inducen, constituyen el tercer grupo clave de la auscultación cuantitativa.

5.3.1. Células de Presión Total y Extensómetros

Las células de presión total se sitúan típicamente en la interfaz entre la estructura de hormigón y el terreno, o bien embebidas en el núcleo de arcilla de las presas de materiales sueltos. Consisten en dos platos metálicos soldados perimetralmente que encierran una fina película de fluido incompresible comunicada con un transductor de presión.

Por otra parte, los extensómetros de resistencia, son sensores que se colocan en grupo embebidos en el hormigón miden las microdeformaciones locales del material (las unidades son micra/m), permitiendo deducir el estado de las tensiones de la estructura aplicando las leyes de la elasticidad.

También se denominan extensómetros a los sensores que se colocan para medir los movimientos verticales entre el cimiento y la presa. Se suelen denominar extensómetros de varillas y miden el desplazamiento en mm relativo entre cimiento y presa.



Figura 8. Tipos de células de presión total (izquierda) y ejemplo de una célula de presión total colocada en un núcleo de arcilla (derecha). Los datos de estos sensores son Hertzios o microsegundos que introducidos en la fórmula correspondiente se obtiene la presión en Kg/cm^2 .

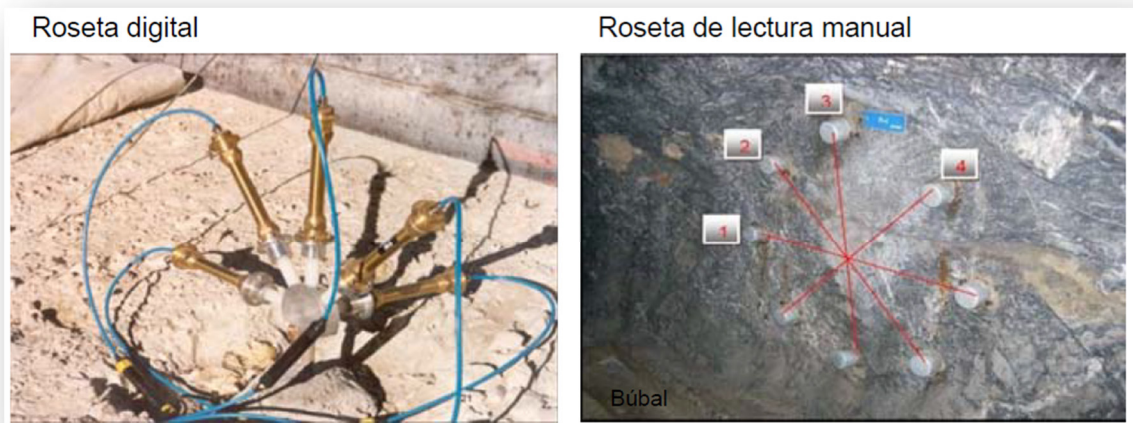


Figura 9. Ejemplo extensómetro de grupo digital (roseta extensométrica) que terminará estando embebida en el hormigón (izquierda). Roseta de lectura manual colocada en galería en roca (derecha).

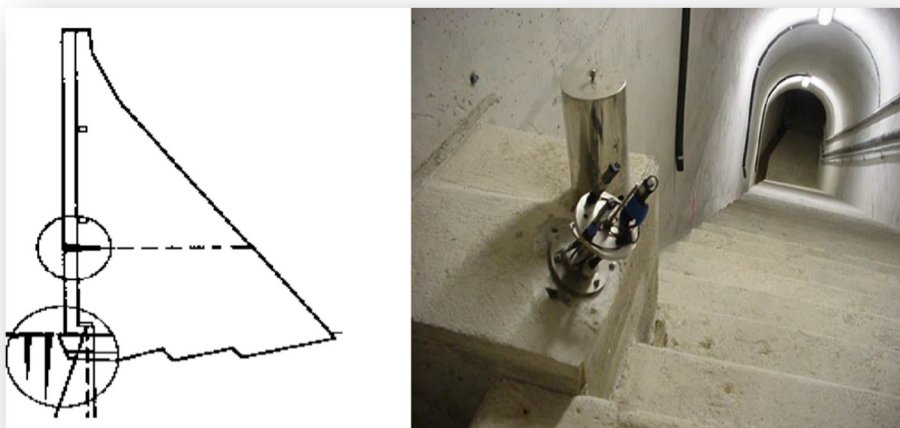


Figura 10. Esquema de ubicación de un extensómetro de varillas (izquierda) y cabezal de extensómetro de varillas en una galería (derecha).

5.3.2. Termopares y Sondas Térmicas RTD (Resistencia de Platino)

El comportamiento térmico del hormigón en masa es uno de los factores que más fisuras genera debido al calor de hidratación desprendido durante el fraguado inicial y a las variaciones estacionales posteriores. Las sondas RTD instaladas a diferentes profundidades dentro de los bloques estructurales mapean los gradientes térmicos internos. Estos datos son vitales para disociar de manera analítica qué parte de los movimientos observados en los péndulos se debe puramente a la dilatación o contracción térmica y qué parte corresponde al empuje hidrostático del agua. Los datos de estos sensores son en $^{\circ}\text{C}$.

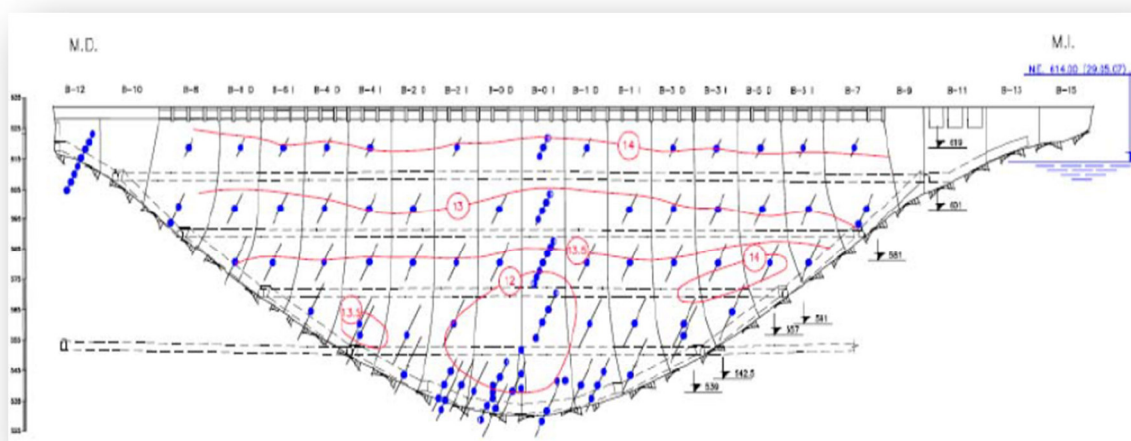


Figura 11. Ejemplo de mapa de isotermas obtenido de los valores de los termómetros

5.4. Variables exteriores

5.4.1. Variables Hidrológicas e Hidráulicas

Son las más críticas para la gestión del vaso y la seguridad frente a avenidas.

- **Nivel del embalse (Cota de agua):** Se mide de forma continua mediante limnímetros (de flotador, de presión, ultrasonidos o radar). Es la variable exterior que mayor influencia tiene en las presiones de filtración y en los movimientos de la presa (empuje hidrostático).
- **Nivel de la capa freática aguas abajo:** Para evaluar la influencia del embalse en el entorno hidrogeológico.
- **Caudales entrantes y salientes:** Medidos en las estaciones de aforo del río, los aliviaderos y los desagües de fondo.

5.4.2. Variables Meteorológicas y Climáticas

Afectan directamente al comportamiento térmico y al estado tensional del hormigón o del cuerpo de materiales sueltos.

- **Temperatura ambiental:** Variable clave, ya que los cambios térmicos estacionales e interdiarios provocan dilataciones y contracciones en las presas de hormigón, alterando los movimientos medidos en los péndulos.
- **Precipitación (Pluviometría):** Medida con pluviómetros en el entorno de la presa. Es crucial para anticipar aportaciones al embalse y para analizar filtraciones (diferenciando si el agua filtrada proviene del vaso o de la lluvia directa sobre el terreno).
- **Radiación solar:** Influye en el gradiente térmico entre el paramento de aguas arriba (oculto por el agua) y el de aguas abajo (expuesto al sol).
- **Velocidad y dirección del viento:** Esencial para calcular el fetch (oleaje) y comprobar los resguardos libres de la presa.
- **Evaporación:** Medida con tanques de evaporación para el balance hídrico del embalse.

5.4.3. Variables Geodinámicas y Sísmicas

Evalúan las acciones del terreno y los fenómenos naturales externos sobre la estructura.

- **Aceleración sísmica (Movimiento del terreno):** Se mide mediante acelerógrafos y sismógrafos instalados en la base de la presa (roca de cimentación) y en la coronación para registrar la respuesta de la estructura ante terremotos.
- **Movimientos de la ladera:** Vigilancia de la estabilidad de los estribos y laderas del vaso mediante hitos topográficos, clinómetros o sistemas de control por satélite (InSAR), previniendo desprendimientos que puedan generar olas destructivas en el embalse.

6. Patologías Estructurales Frecuentes en Obras Hidráulicas

La evaluación técnica sistemática busca diagnosticar de forma temprana un conjunto específico de patologías que afectan de forma recurrente a las infraestructuras hidráulicas:

6.1. Erosión Interna (Tubificación / Piping)

Es la causa principal de rotura en presas de tierra y balsas de regulación. Se inicia cuando el gradiente hidráulico del flujo de filtración supera las fuerzas cohesivas del suelo, comenzando a arrastrar las partículas más finas del terreno hacia el exterior. Este arrastre continuo genera un conducto vacío interno (tubo) que progresa de forma regresiva hacia el interior del embalse, acelerando exponencialmente el paso de agua hasta provocar el colapso por hundimiento o brecha de la estructura.

6.2. Subpresión Excesiva y Pérdida de Eficacia del Drenaje

En presas de hormigón, si la red de drenes internos se colmata por la precipitación de carbonatos o sales disueltas, la subpresión bajo la base de la presa aumenta peligrosamente. Este incremento reduce la fuerza normal efectiva de contacto con la roca de cimentación, disminuyendo la resistencia al deslizamiento de la presa y amenazando gravemente su estabilidad global frente al vuelco.

6.3. Reacción Álcali-Árido (Sólido Creciente) y Ataque por Sulfatos

Son reacciones químicas degradantes internas del hormigón. La reacción álcali-árido ocurre entre los óxidos alcalinos del cemento y ciertas formas de sílice amorfa presentes en los áridos utilizados. Forma un gel expansivo que absorbe agua y se hincha en presencia de la humedad constante de la obra, cuarteando el hormigón, bloqueando compuertas y desalineando los apoyos mecánicos de los aliviaderos.

6.4. Cavitación y Erosión Hidrodinámica

Afecta severamente a los canales de descarga de aliviaderos y los túneles de desagüe de fondo cuando el agua circula a velocidades extremadamente altas (típicamente superiores a 15-20 m/s). Si existen pequeñas irregularidades superficiales en el hormigón, se generan caídas drásticas de la presión local del fluido que provocan la formación de burbujas de vapor de agua. Al recuperar el flujo presiones mayores aguas abajo, estas burbujas chocan violentamente contra las paredes de hormigón, arrancando fragmentos del material y picando la superficie hasta alcanzar y seccionar las armaduras de acero estructural.

7. Normativa de Seguridad y Planes de Emergencia

La gobernanza y las exigencias técnicas en la evaluación de infraestructuras hidráulicas están estrictamente reguladas por marcos legislativos internacionales y nacionales. En el contexto de la seguridad de presas y embalses, la normativa obliga a los titulares de las infraestructuras a redactar, implantar y mantener actualizados documentos normativos internos fundamentales:

7.1. Normas de Explotación

Es el documento director técnico que regula el manejo ordinario y extraordinario de los órganos de desagüe de la presa, las pautas de llenado y vaciado del embalse, los resguardos estacionales mínimos obligatorios para laminar avenidas y los programas de mantenimiento preventivo sistemático de los equipos mecánicos y eléctricos y del sistema de auscultación.

7.2. Planes de Emergencia

Documento de obligada implantación para grandes infraestructuras que define la organización y los recursos necesarios para hacer frente a situaciones de grave riesgo de

rotura o mal funcionamiento. El Plan de Emergencia establece de forma nítida los umbrales operativos basados en los datos aportados en directo por el sistema de auscultación técnica:

Escenario / Umbral	Criterio Técnico (Auscultación)	Acción Requerida / Protocolo
Escenario 0:	Todas las lecturas están dentro de los rangos teóricos predichos por los modelos estadísticos HST.	Continuar con la rutina de lecturas programada y el mantenimiento preventivo habitual.
Escenario 1:	Ciertos sensores (subpresiones, caudales) superan levemente los umbrales de aviso estáticos.	Incrementar la frecuencia de auscultación, realizar inspecciones visuales intensivas de paramentos y comprobar los drenes.
Escenario 2:	Desviaciones estructurales severas. Movimientos acelerados de péndulos o filtraciones con alta turbidez.	Activar el comité técnico de crisis, comunicar la situación a protección civil y evaluar el descenso preventivo del embalse.
Escenario 3:	Fallo estructural inminente o desbordamiento incontrolable por coronación (overtopping).	Activar las sirenas de evacuación masiva aguas abajo y ceder el mando directo a los servicios nacionales de emergencia.

El éxito en la mitigación del riesgo hidráulico radica en la resiliencia y redundancia de los sistemas de transmisión de datos. Por este motivo, las salas de control de las grandes presas modernas cuentan con conexiones de respaldo vía satélite y sistemas de energía ininterrumpida (Sistemas de Alimentación Ininterrumpida - SAI y grupos electrógenos autónomos) capaces de garantizar la monitorización técnica y operativa continua incluso bajo las condiciones meteorológicas o catástrofes sísmicas más extremas.