

3. TÉCNICAS DE RECONOCIMIENTO, CARACTERIZACIÓN Y SEGUIMIENTO

3.1. INTRODUCCIÓN

Cuando se teme una posible inestabilidad de las cimentaciones o se observa un cambio en el comportamiento estructural que pueda ser atribuible a la cimentación, el conocimiento de una serie de datos se hace indispensable para poder entender los problemas detectados y establecer un método de vigilancia o una estrategia de refuerzo o de rehabilitación.

Por lo tanto, resulta necesario realizar una campaña de reconocimiento en la que se determinen aspectos como la tipología del cimiento y los materiales constituyentes, el proceso de ejecución empleado, las características del terreno y los datos hidráulicos, en el caso de obras afectadas por cursos de agua.

En este capítulo se presentan distintas técnicas que ayudan a la caracterización del terreno, del cimiento y de su comportamiento.

3.2. RECONOCIMIENTO DEL TERRENO

Como criterio general para conocer las condiciones de apoyo de la obra, y previamente a la planificación de reconocimientos en campo, es importante disponer de la mayor información posible, como cartografía, plano de situación de la obra, características de la misma, y referencias de estudios u obras próximas.

La efectividad de una inspección visual, fase posterior al análisis de la documentación previa existente, está relacionada con la experiencia del técnico especialista que la lleva a cabo, tanto en lo que se refiere a las cimentaciones de este tipo de obras como a los aspectos geológicos y geomorfológicos que puedan ser apreciados a simple vista.

Los dos aspectos anteriores, análisis de la información e inspección visual, pueden simplificar la intensidad y el tipo de reconocimientos a realizar en campo.

En todo caso, el trabajo de campo debe ir complementado con un estudio geológico que permita confirmar las formaciones existentes en el entorno de la obra de fábrica y su influencia sobre el comportamiento de la cimentación.

3.2.1. Geología y cartografía de la zona

La cartografía y geología generales básicas de la zona de estudio se obtendrá a partir de los mapas del Instituto Geográfico Nacional, mapa Geológico de España, así como de los elaborados por las Comunidades Autónomas, o de publicaciones similares, para posteriormente realizar in situ una cartografía en detalle a la escala requerida. La cartografía geológica en detalle del emplazamiento, debe realizarse a una escala tal que puedan diferenciarse los distintos afloramientos de materiales existentes, sobre los que se sitúa el puente.

Una escala adecuada sería 1:1.000, aunque puede variar según el detalle que se quiera reflejar en la cartografía, y consecuentemente en el perfil longitudinal a lo largo del puente.

3.2.2. Técnicas de reconocimiento

Hay distintos tipos de reconocimiento básicos para conocer el comportamiento del terreno y sus características bajo la cimentación de una obra de fábrica. Los principales reconocimientos son los siguientes:

- sondeos mecánicos con extracción continua de testigo y toma de muestras inalteradas y ensayos SPT;
- ensayos de penetración dinámica;
- calicatas; y
- prospecciones geofísicas.

En principio, en obras de fábrica será suficiente con realizar un sondeo en el entorno de la mitad de las pilas y siempre en el emplazamiento de los estribos. Si la separación entre pilas es del orden de 50 m o mayor, se recomienda aumentar el

número de sondeos, realizando uno junto a cada una de las pilas, más un sondeo desde cada estribo.

Si el recubrimiento de suelos se estima mayor de 3-4 m, suele ser eficaz completar el reconocimiento con ensayos de penetración dinámica. Si, por el contrario, el recubrimiento de suelo se estima escaso, parte de los sondeos podrá sustituirse por calicatas junto a la cimentación, lo que permitirá reconocer su morfología.

En ocasiones se obtiene una buena información de la situación del techo del sustrato rocoso utilizando, en sustitución de catas y penetraciones dinám

En cuanto a la longitud de perforación de los sondeos, al menos se debe alcanzar una profundidad del orden de 10 m bajo la cota de apoyo de la cimentación. Si la misma se realiza en suelos, el sondeo debería finalizar una vez alcanzado un terreno de compacidad alta; como criterio inicial, habitualmente se da por finalizado el sondeo cuando se obtiene resultado de rechazo en los tres últimos ensayos SPT. Si, por el contrario se llega a alcanzar roca, se recomienda que el sondeo penetre en la misma al menos 5 m y en cualquier caso nunca menos de 3 m. Las profundidades propuestas contemplan recabar la información suficiente para la realización de un posterior recalce.

En relación con los ensayos a realizar en laboratorio sobre las muestras extraídas en los sondeos, los más generales y comunes en caso de muestras de suelos, son siempre los necesarios para determinar:

- a) la identificación o naturaleza del terreno (granulométricos y de plasticidad);
- b) las condiciones de estado (densidad y humedad); y
- c) resistencia (compresión simple en muestras de naturaleza cohesiva).

Si se trata también de conocer con más detalle la deformabilidad del terreno bajo la cimentación, aunque no suele ser frecuente, se recurre en laboratorio a los ensayos edométricos para determinar asientos y consolidación bajo carga, los de colapso para valorar la posibilidad de que una cimentación pueda sufrir asientos bruscos o rápidos debidos a inundación o presencia de agua, y finalmente ensayos como la determinación de la presión de hinchamiento y el hinchamiento libre para conocer el potencial expansivo o capacidad de un suelo arcilloso de modificar su volumen frente a cambios en su contenido de humedad.

Dado que se trata de puentes existentes, en general será necesario investigar la capacidad del terreno de apoyo en situaciones de incremento de carga sobre la cimentación o posible fallo de ésta. Los datos realmente imprescindibles entonces son la definición de los niveles de terreno y sus características resistentes: presión admisible en zapatas y resistencias unitarias en punta y fuste en caso de recalces con micropilotes, parámetros que pueden cuantificarse a partir de los reconocimientos in situ y de ensayos habituales en laboratorio.

En muestras de roca, el ensayo normal para trabajos de este tipo determina únicamente la resistencia a compresión simple, aunque no se debe descartar ampliar la información mediante ensayos de rotura del tipo point-load, corte directo o de compresión triaxial.

Ensayos de penetración dinámica

Proporcionan un buen indicador de la variación en forma continua de la compacidad de un suelo con la profundidad, mostrando el espesor de los suelos o rellenos

superficiales, capas blandas intermedias, techo de formaciones duras o de roca y siempre es un complemento de la información obtenida en sondeos mecánicos.

El penetrómetro dinámico, de forma similar al SPT que se realiza de forma puntual en los sondeos, transmite al terreno la fuerza necesaria para introducir una pun-taza mediante la caída de una maza desde una determinada altura. En el ensayo se contabiliza el número de golpes necesarios para avanzar 20 cm. Con ello se obtiene un registro continuo del golpeo con la profundidad.

Prospecciones geofísicas

Son ensayos esencialmente cualitativos que permiten completar la información geológica y la obtenida en los sondeos mecánicos. Entre los principales métodos cabe distinguir los siguientes:

- Métodos eléctricos (tomografía eléctrica). Se basan en la medición de la resistividad de los diferentes niveles de terreno. Son adecuados para detectar niveles freáticos.
- Métodos sísmicos. En ellos se mide la velocidad de propagación de ondas producidas por un impulso provocado artificialmente. Dicha velocidad depende principalmente del módulo de elasticidad del terreno. Permiten diferenciar distintos tipos de terreno (en las dos primeras capas), su grado de ripabilidad, identificando también la situación del techo del sustrato rocoso bajo capas de suelos.

3.2.2.2. Técnicas de reconocimiento específicas complementarias

Ensayos de penetración estática (CPT y CPTU)

Es un reconocimiento óptimo en suelos blandos tanto cohesivos como granulares finos. Consiste en la hinca continua a presión de una punta cónica, midiendo directamente el esfuerzo necesario para la penetración del cono y el rozamiento lateral.

La ventaja de este ensayo, al margen de que sus resultados deben contrastarse con los sondeos con extracción de testigo, reside en la diferenciación bastante precisa de capas de distinto comportamiento geotécnico, especialmente en niveles drenantes que aceleren procesos de consolidación bajo carga.

Con los datos que se obtienen de estos ensayos, pueden correlacionarse otros como, densidad relativa, ángulo de rozamiento, parámetros de deformabilidad, resistencia a licuefacción, resistencia al corte, resistencias unitarias de punta y fuste, coeficientes de consolidación, etc.

Ensayos presiométricos

En los ensayos presiométricos se aplica a la profundidad requerida una presión radial sobre el taladro de la perforación, midiendo las deformaciones producidas. Es, por tanto, un ensayo de carga – deformación. Con el mismo se obtiene una curva que relaciona la presión aplicada y la deformación, y permite obtener parámetros geotécnicos, principalmente, módulos de deformación, presión límite, correlaciones con la presión admisible, etc.

3.3. RECONOCIMIENTO DE LA CIMENTACIÓN, PILAS Y ESTRIBOS [4]

3.3.1. Búsqueda de documentación existente

La búsqueda de datos de proyecto u otros documentos relacionados con la estructura a estudiar y en este caso con las cimentaciones, constituye la primera fase del “reconocimiento”. Si recurrir a la documentación que existe es imprescindible al enfrentarse a un problema relacionado con estructuras existentes, aún lo es más en el caso particular del estudio de la cimentación debido a la dificultad que supone su reconocimiento e inspección.

Entre los datos a localizar resultan de especial interés los siguientes:

- Planos de las cimentaciones.
- Cálculos estructurales e hipótesis de proyecto.
- Información relativa al proceso de ejecución.
- Relación de todo incidente o intervención que se haya producido durante la construcción o durante la vida en servicio de la estructura y que afecte a la cimentación.
- Datos geológicos y geotécnicos.
- Datos hidráulicos y relativos a los cauces en el caso de que la obra esté cimentada sobre un curso de agua.

No obstante, debe realizarse un análisis crítico de los documentos que se encuentren, dando sólo por válidos aquellos datos que puedan ser confirmados. Tampoco hay que olvidar que la tipología de la cimentación puede variar de unos apoyos a otros de la estructura. Para comprobar todos aquellos datos que se consideren dudosos será necesario recurrir a la ayuda de otras técnicas de reconocimiento como son las inspecciones, las calicatas, los sondeos, etc.

3.3.2. Inspección visual

Los principales síntomas patológicos en cimentaciones suelen ser, como se recoge en la referencia [1]:

- Fisuras/grietas en el terreno, en el firme o en los elementos estructurales del puente.
- Movimientos excesivos que pueden resultar inadmisibles por razones estructurales, de tráfico o estéticas.
- Deterioro de los materiales.
- Socavaciones, erosiones y descalces.



Figura 3.1. Giro y descenso de una pila (apréciese la inclinación con respecto a la lámina de agua).

En la mayor parte de las estructuras no es posible realizar una observación directa de la cimentación, por lo que la inspección visual de la estructura resulta esencial para detectar dichas anomalías. Es frecuente que problemas en las cimentaciones se traduzcan en deterioros en la superestructura, tal y como se recoge en el capítulo 5 de este documento. La existencia de fisuras y cambios en la geometría puede ser síntoma de una patología cuyo origen está en la cimentación. Por ejemplo, pequeños desplazamientos de los apoyos, que serían difícilmente perceptibles directamente, producen frecuentemente deterioros bastante aparentes en la superestructura.

Los deterioros en las cimentaciones también pueden ser detectados por la falta de alineamiento de los pretilos, impostas, aceras y otros elementos auxiliares.

No obstante, hay que destacar que no todos los deterioros que se observen en la superestructura de las obras de fábrica son imputables a los movimientos y patologías de las cimentaciones, sino que pueden deberse a otras causas.

También hay que tener presente que en las cimentaciones pueden existir anomalías importantes sin que se observe manifestación alguna en la superestructura. Este aspecto es de gran importancia en la medida que pudiera provocar el colapso frágil de la estructura.

En el capítulo 5 se describen algunos deterioros que pueden tener su origen en un fallo de la cimentación.



Figura 3.2. Daños en muros laterales de un estribo derivados de un descalce de la cimentación.

En el caso de estructuras cimentadas sobre cursos de agua resulta de interés observar determinados aspectos que tienen que ver con el cauce y cuya variación puede suponer modificaciones en el comportamiento de las estructuras. Algunos de estos aspectos son:

- Posición del lecho a su paso bajo la obra.
- El ángulo de incidencia de la corriente del agua en pilas y estribos.
- La topografía y naturaleza de los fondos, principalmente la presencia de fosas imputables a la socavación local y al efecto de contracción del cauce. Las cavidades no son frecuentemente visibles desde el exterior, pero pueden ser detectadas por el estado de las protecciones o por la existencia de flujos de agua anormales (resurgencias o torbellinos que se desprenden del apoyo).

- El amontonamiento de cuerpos flotantes y aluviones obstruyendo la desembocadura o la existencia de resaltos.
- Signos de ataque y deterioro en las márgenes del cauce próximas a la obra.



Figura 3.3. Socavación en una pila.

Del mismo modo, la existencia de deterioros en las protecciones de la cimentación (escolleras, pantallas, etc.) puede ser indicativa de la susceptibilidad de la cimentación a presentar determinados problemas. Algunas anomalías que se pueden detectar en estos elementos son:

- Arrastre por la corriente del material que constituye la protección.
- Hundimiento de los taludes alrededor de las pilas.
- Alteración de los materiales que constituyen las defensas.

La inspección visual se programará en periodo de aguas bajas para poder observar la mayor parte de los elementos. La información recogida puede completarse con observaciones complementarias realizadas en periodos de crecidas.

3.3.3. Calicatas

En el estudio y reconocimiento de las cimentaciones, una calicata puede estar diseñada para acceder a la cimentación y ver su estado real cuando su examen exterior, con o sin buceadores, no permite obtener los datos buscados. La superficie y profundidad de excavación dependerán de la tipología y dimensiones de la cimentación. En general las profundidades de excavación variarán entre dos y tres metros, mientras que la superficie de excavación estará condicionada por las características de la cimentación y del terreno.

En el caso de que la cimentación a estudiar presente una protección de rocas o escolleras, que suele ser lo habitual (v. capítulo 2), ésta también se puede retirar para realizar la observación.

Se tendrá en cuenta, una vez realizada la calicata, que las zonas desguarnecidas deben ser cuidadosamente devueltas a su situación original.



Figura 3.4. Ejecución de cata en un puente.



Figura 3.5. Detalle de cata en un puente.

3.3.4. Sondeos

Se aprovecharán los sondeos que se realicen para el reconocimiento del terreno intentando que éstos se ejecuten atravesando los macizos de cimentación. Esto permite obtener datos acerca del espesor del cimiento, materiales que lo constituyen, características de los mismos, etc.

Siempre que sea posible, los sondeos se realizarán desde la plataforma de la obra de paso. Se recomienda efectuar los sondeos tanto en coincidencia con las hojas portantes de los muros de las pilas y los estribos, como atravesando el relleno de los mismos. En caso de no ser posible, los sondeos se realizarán posicionando la maquinaria bajo la estructura, en una zona próxima a pilas o estribos, de modo que el sondeo afecte únicamente al elemento de cimentación.

Aunque la técnica de sondeos de diámetro pequeño para la introducción de un endoscopio es menos frecuente, no se debe descartar su utilización en el reconocimiento de la cimentación.

Además, los sondeos permiten obtener muestras, realizar ensayos in situ (mecánicos, de agua) y medir parámetros físicos como la densidad tal y como se recoge en 3.2.2.1.



Figura 3.6. Ejecución de sondeos en un puente.

3.3.5. Inspecciones subacuáticas [6] [7] [8]

En el reconocimiento de la cimentación de estructuras que se encuentran emplazadas en cursos de agua se suele recurrir a la inspección subacuática. No obstante, hay que tener en cuenta que en numerosos cauces, durante el periodo de estiaje, el nivel del agua es bajo y permite observar la base de los apoyos sin recurrir a la contratación de empresas especializadas.

La inspección subacuática tiene como objetivos fundamentales el reconocimiento de la parte sumergida de la subestructura del puente así como del lecho del cauce. La inspección de este último está encaminada a detectar el posible riesgo de socavación de la cimentación.

La inspección de la estructura y del lecho se realizará tanto aguas arriba como aguas abajo y en todo el perímetro de los elementos de apoyo. Además, se tendrá en cuenta que puede ser deseable programar una inspección subacuática en una situación excepcional, como por ejemplo justo después de una crecida.

La inspección subacuática difiere de la inspección visual en varios aspectos que, en general, aumentan la subjetividad de los inspectores (buceadores). Ésta se desarrolla normalmente en condiciones de nula o baja visibilidad por lo que gran parte de la información es obtenida mediante el tacto. La iluminación de la zona de trabajo suele ser de escasa utilidad en agua turbia porque las partículas suspendidas tienden a reflejar la luz en lugar de aumentar la visibilidad. Además, la corriente del agua dificulta la inspección impidiendo que el buzo permanezca en la zona a inspeccionar. Estas condiciones, existencia de corriente y escasa visibilidad, hacen que para el buceador sea difícil mantener la orientación. Por último, hay que tener en cuenta la presencia de vegetación y otros depósitos propios de los medios acuáticos que pueden ocultar los defectos. En muchos casos previamente a la realización de la inspección es necesario limpiar la zona a observar con chorro de agua u otras técnicas.

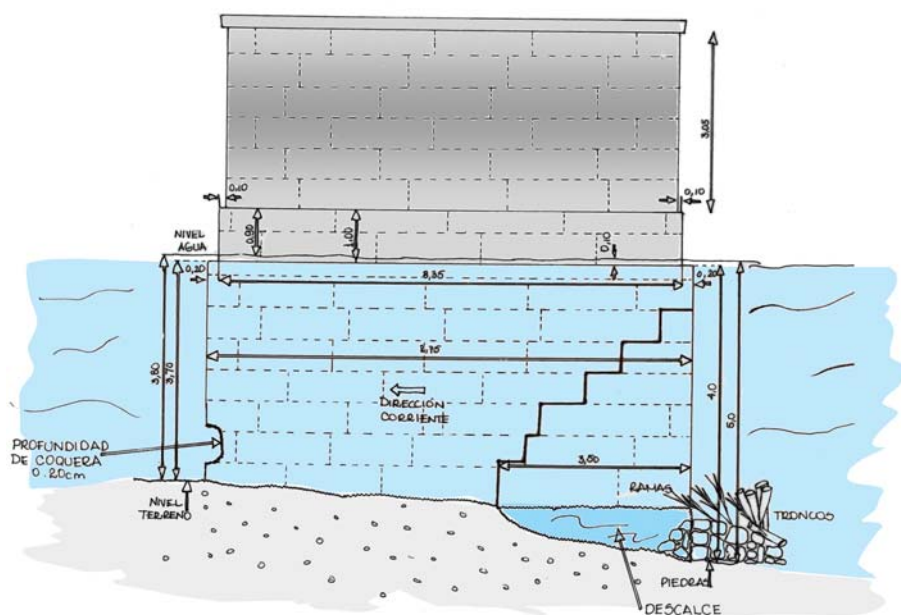


Figura 3.7. Croquis de trabajos de inspección subacuática.



Figura 3.8. Trabajos de inspección subacuática.

En general el equipo de inspección estará formado al menos por un operador de la lancha o barco de apoyo que se utilice y dos buceadores con el objeto de que en los periodos de inmersión siempre estén dos buzos en el agua en continuo contacto visual.

Para alcanzar los objetivos que persigue la inspección subacuática es necesario que un técnico sea el responsable de la inspección y que desde “tierra” pueda dirigir los trabajos. En cualquier caso es una buena práctica que se realice la inspección de manera ordenada, al igual que se acomete la inspección visual de una estructura, teniendo en cuenta que la inspección subacuática se realiza por personal cualificado pero cuya misión no es realizar un diagnóstico sobre la resistencia mecánica y seguridad del apoyo, sino suministrar una imagen objetiva lo más precisa posible del estado del apoyo. Por lo tanto, se hace imprescindible que el responsable de la inspección defina previamente los objetivos a alcanzar con los buceadores.

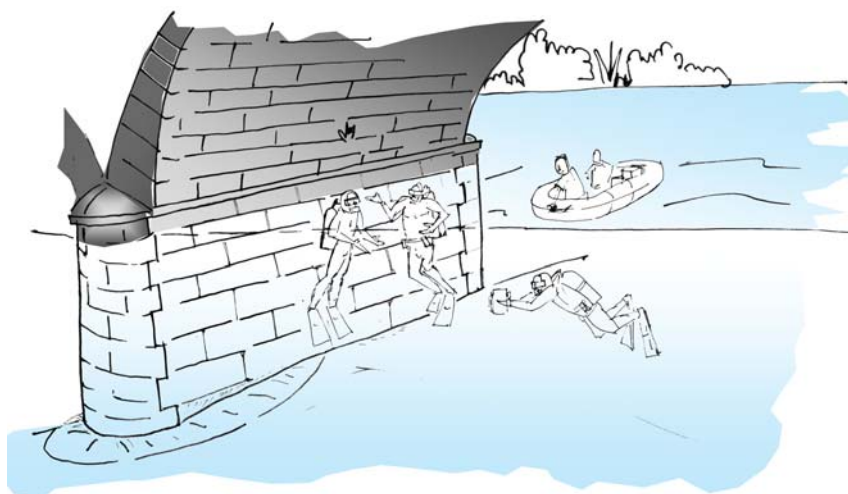


Figura 3.9. Equipos utilizados en la inspección subacuática.

En la planificación de la inspección hay que resaltar la importancia de determinar la accesibilidad de los equipos de inspección subacuática durante las inspecciones previas de la estructura. Los equipos de inspección subacuática suelen transportar sus medios (barca tipo zodiac, botellas y demás material) en vehículos grandes, capaces de moverse por caminos de tierra, pero sin grandes pendientes ni terrenos embarrados.

Si el agua del río no viene demasiado turbia, es posible y recomendable grabar un vídeo de los paramentos del elemento, o tomar fotografías, o incluso ver las imágenes en directo a través de un monitor de TV. Estas técnicas permiten a los responsables de la inspección dirigir la visita realizada por los buceadores desde la propia barca o desde la orilla.

Al planificar la inspección es importante contar con la colaboración de la autoridad hidrográfica dado que, en muchos casos, pueden facilitar el trabajo. Por ejemplo, si la estructura a reconocer se encuentra en un cauce regulado podría contarse con la posibilidad de reducir el caudal, lo que permitiría reducir la velocidad de la corriente y facilitar las labores de los inspectores. En algunos casos, es preciso contar también con los regímenes de explotación hidroeléctrica.

En la inspección de cada elemento de la subestructura se debe tomar al menos la siguiente serie de datos:

Socavaciones bajo el elemento (socavación local)

Durante la inspección subacuática se indicará el emplazamiento de las oquedades. Además, es necesario determinar no sólo en qué longitud del paramento el lecho no tiene contacto con la cara inferior de la zapata/encepado, sino la profundidad de esta socavación.

En general la socavación local es sencilla de observar aunque en algunos casos los agujeros generados se vuelven a rellenar por sedimentos durante flujos de agua a baja velocidad y por lo tanto se dificulta su detección.



Figura 3.10. Cavity detectada bajo el muro lateral de un estribo gracias a la inspección subacuática.

Durante la inspección se tendrá en cuenta que las cavidades pueden encontrarse rellenas u ocultas por rocas dispuestas a lo largo de los apoyos. Si es necesario, se utilizarán varas u otros elementos que permitan remover los rellenos y determinar el verdadero nivel de la máxima socavación. En algunos casos la efectividad de la inspección subacuática puede ser limitada, siendo necesario utilizar otros métodos de reconocimiento como es el sonar, técnica a utilizar en situación de máxima avenida para detectar la socavación local antes de que se rellene.

Profundidad del lecho

Es recomendable tomar la profundidad del lecho alrededor del elemento (batimetría perimetral). Para esto, los buzos suelen llevar una mira que pueden emplear si la profundidad no es muy grande. También es recomendable tomar una referencia del nivel del agua en el momento de realizar la inspección, con respecto a algún elemento inamovible del puente.

La identificación de la cota del lecho con respecto a un elemento fijo de la superestructura, permite determinar los cambios del lecho mediante el control de este parámetro en sucesivas inspecciones e investigar de esta forma la socavación general.

Como es sabido, la socavación también puede ser debida a una contracción del cauce en las inmediaciones de la estructura. Por lo tanto, de nuevo es importante referenciar la profundidad del lecho respecto a un componente fijo durante las inspecciones subacuáticas. Se deberá estimar la cota del lecho en una sección cerca del puente situada aguas arriba y en otra situada aguas abajo para comparar.

Estado de los paramentos de la subestructura

Se prestará especial atención a la existencia de:

Grietas. Se indicará su emplazamiento y su posible extensión así como el ancho y profundidad de las mismas.

Alteración de los materiales. Entre otros se recogerán datos de los siguientes:

- Piedra/ladrillo. Se recogerá la existencia de elementos fracturados o que hayan desaparecido, el lavado de llagas y la degradación de las piedras.
- Pilotes y piezas de madera. Se describirá si existe la alteración del material producida por insectos o su pudrición. La profundidad de la alteración se determinará con la ayuda de un cuchillo o un pico. Además se indicarán todas las piezas que se encuentren agrietadas o fisuradas.

- Hormigón. Igualmente se indicará la zona alterada, obteniéndose la profundidad de la misma.
- Acero. Se indicará posibles problemas de corrosión y la posición de las piezas dañadas.

Estado del lecho en las proximidades del elemento

Se determinará el tipo de material del lecho en las proximidades del elemento y su consistencia. También se observará si hay indicios de aterramiento.

Estado de los elementos de protección y escolleras

Los daños en los elementos de protección son un aviso de que determinadas anomalías que afectan a la cimentación se están produciendo. Se recogerán, entre otros daños, su posible alteración, deformación y, en su caso, la forma de los taludes.

En cualquier caso hay que tener en cuenta que la calidad del trabajo dependerá de varios factores:

- cualificación de los buzos;
- condiciones de visibilidad;
- velocidad de la corriente;
- adecuada planificación de la inspección.

3.3.6. Otras técnicas de reconocimiento

Puesta en seco

Esta técnica permite, en estructuras en las que la subestructura está afectada por un cauce, tanto la observación visual directa de las anomalías que afectan a las cimentaciones, como su mantenimiento y refuerzo en seco, evitando la interacción con el agua.

La técnica consiste en desviar el curso del río mediante la construcción de presas, islas y desvíos consiguiendo que la zona objeto de estudio quede en seco.



Figura 3.11. Ejecución de plataforma de trabajo para el recalce de las pilas de sillería del puente metálico de Titulcia.

Para llevar a cabo la “puesta en seco” es necesario realizar un estudio detallado del que se derive que no existe riesgo de filtraciones de agua, de arrastre de materiales del fondo por la circulación del agua bajo la cimentación o de hundimientos. De todos modos, la puesta en seco sólo se efectuará en época de estiaje o aguas bajas.



Figura 3.12. Plataforma de trabajo para el recalce de las pilas de sillería del puente metálico de Titulcia.

En caso de una crecida o de una larga interrupción de los trabajos de investigación hay que prever un sistema de alerta y de reposición del curso original del cauce.

Si los suelos sobre los que se trabaja son expansivos, se tendrá en cuenta que la desecación puede provocar hundimientos. También puede ser necesario apuntalar o cimbrar la estructura si su estado lo requiere. No hay que olvidar que la puesta en seco aumenta la carga transmitida a las cimentaciones al suprimir el efecto del empuje hidrostático.

Métodos no destructivos

En la actualidad hay numerosos estudios orientados al desarrollo y aplicación de métodos no destructivos al reconocimiento de las características de los cimientos. Estos estudios ponen de manifiesto la aplicabilidad de estas técnicas en el campo del reconocimiento de las cimentaciones, pero todavía no se han obtenido conclusiones definitivas sobre la fiabilidad y el campo de aplicación de los mismos [11].

La mayor parte de estos métodos (eco, sísmica paralela, sondeo sónico) tienen su principal aplicación en el control de cimentaciones profundas en obras de nueva construcción, por lo que su adaptación al reconocimiento de cimentaciones de obras de fábrica y el desarrollo de otras técnicas nuevas (campo de inducción y ondas de flexión), será una alternativa interesante a las técnicas tradicionales (catas, sondeos, puesta en seco, etc.) desde el punto de vista de su alcance, economía y seguridad.

3.4. MONITORIZACIÓN

3.4.1. Concepto

En la terminología médica se entiende por auscultación el método de examen físico que consiste en escuchar los sonidos que se producen dentro del cuerpo bien sea con o sin la ayuda de aparatos. Por generalización, en los últimos años se ha ido imponiendo la utilización del término auscultación, quizás incorrectamente en ingeniería civil, cuando se hace referencia al examen del estado de las estructuras y los materiales que las constituyen con el auxilio de aparatos y técnicas diversas.

El término monitorizar es, según el diccionario de la RAE [17], “observar mediante aparatos especiales el curso de uno o varios parámetros fisiológicos o de otra naturaleza para detectar posibles anomalías”. En [18] se define monitorizar como “seguir o controlar algo mediante dispositivo electrónico visual o acústico, que permite seguir el desarrollo de un fenómeno o proceso, o el funcionamiento de un aparato”.

Por su parte, en [19] se define el término inglés “monitor” como “to watch or listen to (something) carefully over a certain period of time for a special purpose”.

De acuerdo con lo anterior, el término monitorización hace referencia a dos ideas básicas: la de medir, observar o controlar unas determinadas magnitudes o parámetros con el auxilio de determinados aparatos especiales y la de hacer un seguimiento de su evolución en el tiempo.

En ese sentido, aunque hace algunos años determinados autores consideraban la auscultación como sinónimo de seguimiento a lo largo del tiempo [9] [15], hoy en día parece que se impone la idea de emplear el término auscultación para el examen de determinadas magnitudes o características con auxilio de aparatos, mientras el término monitorización implica, además, el seguimiento en el tiempo de los parámetros o magnitudes controlados por los aparatos de auscultación.

3.4.2. Tipos de monitorización

De acuerdo con la anterior definición, puede hacerse una distinción entre dos tipos de monitorización, según el seguimiento que se realice sea continuo o discreto (monitorización periódica) y, a su vez, en ambos tipos se puede diferenciar entre monitorización estática y dinámica [26] [27].

Este documento, al estar centrado en el seguimiento de cimentaciones y sus problemas asociados, contempla exclusivamente el caso de la monitorización estática.

3.4.2.1. Monitorización periódica (o discreta)

Supone la observación de la evolución de determinadas magnitudes con el auxilio de aparatos adecuados, mediante la repetición de medidas puntuales a intervalos de tiempo más o menos regulares. Así, aunque históricamente no recibieran ese nombre, se puede considerar que las tareas de seguimiento de determinados parámetros (movimientos, presiones, deformaciones unitarias, temperaturas, etc.), tales como las realizadas tradicionalmente en las presas, constituyen una auténtica monitorización aunque no impliquen un registro continuo, sino la realización de medidas, muchas veces manuales, repetidas a intervalos regulares de tiempo.

Incluso cabría calificar de monitorización el seguimiento realizado de la evolución de grietas o fisuras de una construcción a través de los tradicionales “testigos” de vidrio o escayola, si bien en este caso ese seguimiento de la evolución sea cualitativo y no cuantitativo.

Pero resulta claro que cualquier medida o control de una determinada magnitud, que se repita en el tiempo, para estudiar su evolución, constituye una monitorización por simple que sea.

3.4.2.2. Monitorización continua

El abaratamiento de los equipos informáticos y la consiguiente generalización en el uso de los mismos, ha hecho que sea cada vez más frecuente la monitorización de estructuras mediante la aplicación de equipos basados en sistemas automáticos de medida controlados por ordenador. Estos sistemas automáticos presentan, frente a los sistemas tradicionales de monitorización discontinua (de lectura manual), una serie de ventajas y al mismo tiempo una serie de inconvenientes. En la tabla 3.1 se recogen las principales ventajas e inconvenientes de los equipos de monitorización automáticos basados en sensores eléctricos y sistemas de adquisición de datos.

Tabla 3.1 Monitorización mediante sistemas automáticos de medida¹

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Permite elegir a voluntad la frecuencia de lecturas. Puede transformarse fácilmente en monitorización continua.	Necesita emplear sensores y sistemas eléctricos de medida.
Posibilidad de seguimiento de resultados en tiempo real desde la oficina vía Internet.	Mayor coste de primera instalación.
Menor coste de personal para la obtención de datos durante el seguimiento que en el caso de sistemas manuales.	Mayor coste por amortización de equipos durante el seguimiento que en el caso de sistemas manuales.
Posibilidad de tratamiento de grandes cantidades de datos y facilidad de presentación de resultados.	Necesidad de programas específicos de tratamiento e interpretación de resultados.

Se están extendiendo los sistemas de monitorización sin cables, en los que las señales de los sensores son transmitidas vía radio. Estos sistemas emplean sensores que realmente integran tanto el transductor propiamente dicho como la electrónica de acondicionamiento necesaria, incluso un procesador y el sistema de transmisión de las señales ya digitalizadas.

¹ Se supone que se trata de monitorización continua o periódica, pero con sistemas de registro basados en transductores eléctricos y ordenadores o equipos tipo Data-logger. No se contempla el caso de equipos basados en sistemas de registro mecánicos u ópticos que, hoy en día, prácticamente han quedado obsoletos.

3.4.3. Magnitudes a medir

En el caso de monitorización de cimentaciones de puentes de fábrica, cabe distinguir entre dos posibilidades claramente diferenciadas, según tal monitorización esté enfocada a observar la evolución de las consecuencias estructurales de un posible problema de cimentación (no es lo más habitual que el seguimiento sea del propio elemento de cimentación) o, por el contrario, se encamine a detectar el posible riesgo de socavación de tal cimentación por las corrientes del curso de agua salvado por el puente.

3.4.3.1. Monitorización estructural

Los sistemas habituales de monitorización contemplan el control de la evolución de las siguientes magnitudes:

- Desplazamientos absolutos: verticales (asientos) y horizontales.
- Desplazamientos relativos entre dos puntos de la estructura (por ejemplo entre arranques de arcos o bóvedas).
- Movimientos de grietas y fisuras, ya sea en dirección normal al plano de la propia grieta o según direcciones contenidas en el mismo.
- Deformaciones unitarias: normalmente medidas de forma aproximada (como DL/L) mediante sistemas de medida de desplazamientos que permiten el control del movimiento relativo entre dos puntos (DL) más o menos próximos (situados a distancia L), con lo que realmente miden la deformación unitaria media en la zona de la base de medida (L).
- Giros: mediante el uso de clinómetros, ya sean de burbuja, eléctricos, etc.
- Otros: como puede ser el caso de la monitorización de reacciones transmitidas a través de los apoyos en estructuras hiperestáticas, que pueden verse alteradas significativamente por la presencia de movimientos de la cimentación.

3.4.3.2. Monitorización de la socavación

La constatación del elevado número de estructuras que resultan vulnerables desde el punto de vista de socavación de la cimentación, ha hecho que se preste atención a la monitorización de la socavación como una de las posibles medidas alternativas a adoptar de cara a proteger esas estructuras de un posible colapso [21].

Esta monitorización de la socavación está enfocada en todos los casos al seguimiento de la evolución del lecho del río junto a pilas y estribos, por lo que la magnitud medida es siempre la altura desde un punto de la propia estructura adoptado como referencia hasta el lecho del río.

3.4.4. Sistemas de medida [1]

3.4.4.1. Monitorización estructural

a) Nivelación topográfica

Dependiendo del tipo de nivel que se emplee, se pueden esperar precisiones desde tan sólo algunos mm (niveles ordinarios), hasta valores del orden de algunas décimas de mm (niveles de precisión de placa plano-paralela). Tiene que partirse de bases de referencia inamovibles lo que, en ocasiones, exige la disposición de puntos fijos específicos mediante varillas rígidas ancladas al fondo de un sondeo suficientemente profundo como para garantizar su inmovilidad.

La nivelación topográfica es un sistema de monitorización discreto. Sólo con dispositivos tipo láser y en unas condiciones ambientales específicas se podría establecer una monitorización continua.

En los puentes de fábrica la nivelación puede tener interés tanto para medir la evolución de eventuales movimientos en la cimentación como posibles movimientos en la superestructura que, en última instancia, puedan denunciar problemas en la cimentación.

b) Extensómetros

Pueden ser mecánicos, de cuerda vibrante, bandas extensométricas o de fibra óptica. La denominación genérica de extensómetros se suele aplicar a aparatos destinados a la estimación de las deformaciones unitarias, aunque en realidad tan sólo las bandas extensométricas o determinados extensómetros de fibra óptica miden en realidad magnitudes que resulten proporcionales a tales deformaciones unitarias. La mayor parte de los denominados extensómetros simplemente estiman la deformación unitaria media, mediante el cociente entre la variación de distancia entre dos puntos y el valor inicial de dicha distancia (base de medida). En esta línea se incluyen distintos aparatos con muy diferentes longitudes de sus bases de medida:

- De base corta: como por ejemplo los extensómetros de resistencia eléctrica o bandas extensométricas, cuya base varía desde unos mm a unos 10-15 cm.
- De base media: un ejemplo típico serían los extensómetros de cuerda vibrante o los extensómetros mecánicos, con bases de medida desde algunos cm, hasta 40-50 cm.
- De gran base: con base de medida del orden de uno o incluso varios metros. Un ejemplo típico de extensómetros de gran base son los extensómetros de varillas o de hilo. Recientemente se han desarrollado también extensómetros de gran base de fibra óptica.

La selección de un extensómetro u otro se efectuará en función del problema a estudiar.

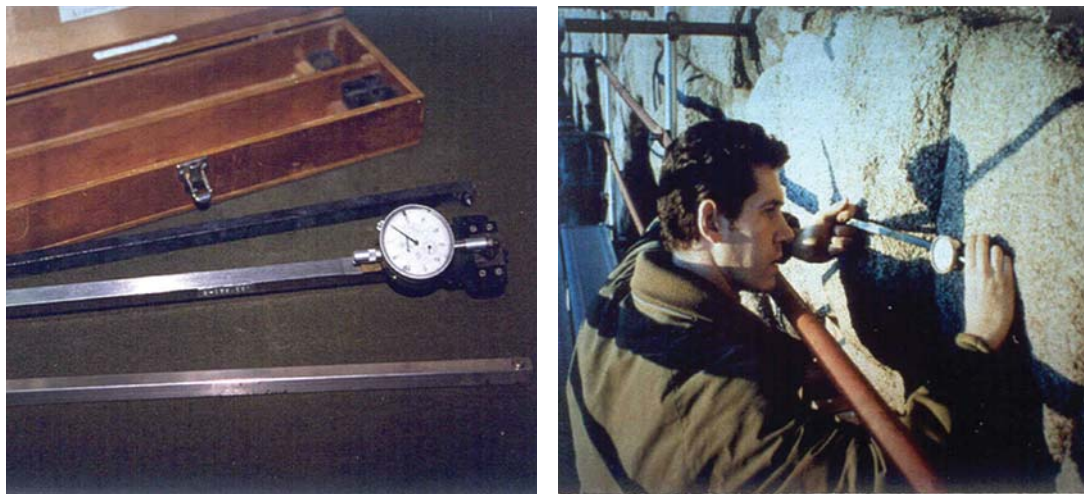


Figura 3.13. Extensómetro mecánico.

En puentes de fábrica la extensometría puede servir para medir la magnitud y la evolución de la abertura de grietas, separaciones entre sillares, etc., en general, tanto para las cimentaciones como para la superestructura.

c) Lupas micrométricas

Son aparatos ópticos equipados con una lente de algunos aumentos y dotados de una escala graduada para permitir la medida de aberturas de fisuras. Suelen apreciar la décima de mm.

d) Medidores de convergencia

Permiten el control de la variación de distancia relativa entre dos puntos fijos en la dirección de la recta que los une, mediante el empleo de una cinta o hilo de invar acoplado a un sistema de medida mecánico de precisión basado en un reloj comparador y a un dispositivo que permite controlar que la tensión aplicada a la cinta de invar sea siempre constante. En obras de fábrica puede resultar de utilidad, por ejemplo, para el control de posibles separaciones entre arranques de arcos, permitiendo alcanzar precisiones del orden de algunas décimas de milímetro para distancias entre los puntos fijos de una veintena de metros.

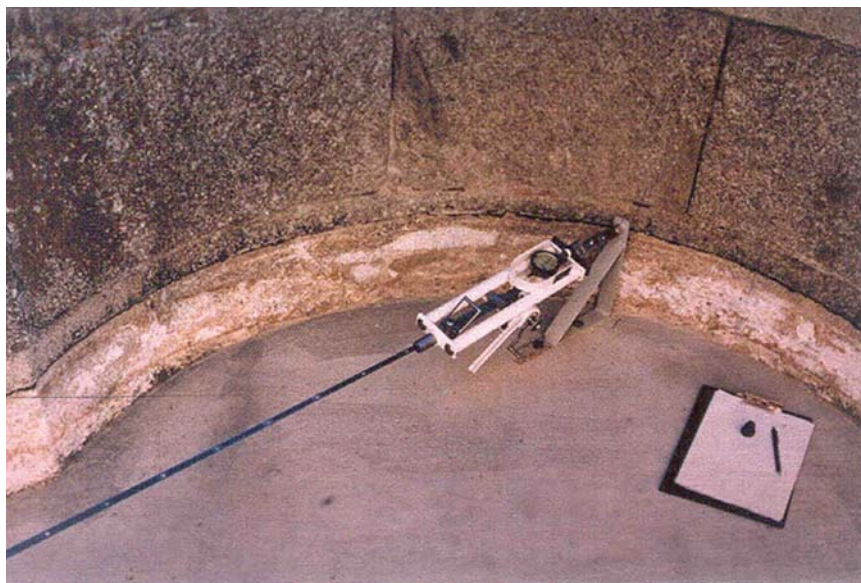


Figura 3.14. Medidor de convergencia.

e) Clinómetros

Son adecuados para la medida de giros. Existen diversos sistemas, desde los clinómetros de burbuja de alta sensibilidad (error inferior a $\pm 2 \times 10^{-4}$ radianes) del LCPC [13], hasta los servoclinómetros (disponibles en una amplia gama de rangos y precisiones) o los clinómetros eléctricos basados en otros principios (cuerda vibrante, bandas extensométricas, etc.). En puentes de fábrica pueden medirse así eventuales giros de pilas, estribos, muros, tajamares, etc.

f) Colimación

Se trata de un sistema óptico que consiste en la determinación del desplazamiento horizontal de un punto en dirección perpendicular a una alineación de referencia. No es un sistema de medida habitualmente empleado en obras de fábrica.

g) Péndulos

Consisten, como su propio nombre indica, en una masa colgando de un hilo anclado por el otro extremo a la fábrica de la estructura (péndulo directo) o un hilo anclado inferiormente y puesto en tensión mediante un flotador parcialmente sumergido en un baño de aceite (péndulo inverso). El péndulo no es un dispositivo habitual en la monitorización de puentes.

Los péndulos también pueden emplearse para la medida de giros, cuando se pueda considerar que los movimientos horizontales registrados son como consecuencia de un giro del elemento auscultado (pila o estribo) y no el resultado de una deformación por flexión o un abombamiento.

h) Inclínómetros

Consisten en un tubo especial colocado en el interior de una perforación sensiblemente vertical por el que se introduce un medidor o torpedo dotado de un clinómetro eléctrico que mide el ángulo de inclinación del tubo en el punto de medida respecto a la vertical. La integración aproximada de los giros registrados a lo largo del tubo, permite la estimación de los movimientos horizontales en los distintos puntos de medida respecto al fondo del tubo. Es un sistema especialmente útil para detectar movimientos en dos direcciones simultáneamente (p.e. en pilas y estribos).

i) Piezómetros

Son equipos para la determinación del nivel de carga hidrostática de agua en un punto determinado. No suelen ser habituales en auscultación o monitorización de puentes de fábrica.

j) Fotogrametría terrestre

En ocasiones se ha empleado esta técnica para determinar los movimientos y evolución de estructuras de fábrica de tipo monumental e histórico. Por comparación entre las geometrías deducidas en instantes diferentes se pueden deducir los movimientos producidos. Se trata de una técnica muy prometedora.

k) Sistemas GPS

Se emplean en ocasiones para el seguimiento de movimientos en estructuras especiales.

3.4.4.2. Monitorización de la socavación

Se establecen cuatro categorías o tipos de aparatos o sistemas para la monitorización de la socavación [14], [21]:

a) Sonda o extensómetro de varilla

Consiste en un tubo adosado a la pila o estribo del puente por el que puede deslizarse una varilla, terminada en su extremo inferior en una base o plataforma que descansa en el lecho del río. Al progresar la socavación, esta base y la varilla unida

a ella descenden. El sistema puede ser empleado tanto para monitorización discontinua como continua. En este último caso es necesario disponer algún transductor de desplazamiento para poder realizar en todo momento el seguimiento de la posición de la varilla. Es adecuada para lechos de gravas o escollera, pero puede presentar problemas en otros tipos de suelos (por ejemplo arenas finas) que podrían penetrar en el hueco entre el tubo y la varilla e impedir el libre movimiento de ésta, dando lugar a lecturas erróneas.

b) Sistemas tipo sonar

Están formados por un transductor y un equipo de medida y acondicionamiento que es el encargado de generar y recibir el pulso sónico, determinar el tiempo transcurrido entre ambos, convertirlo en unidades de longitud, registrarlo y, en su caso, enviarlo a la estación remota de control. El transductor, colocado en el agua, transforma el pulso en una onda sónica y recibe el eco de la misma, reflejado en el lecho del río.

Se ha comprobado que aparatos de sonar comerciales del tipo de los empleados para localizar bancos de peces, pueden ser usados eficazmente en la monitorización de la socavación de fondos. Puede haber casos especiales (aguas turbulentas con gran cantidad de aire o con altas concentraciones de sedimentos en suspensión) en que no resulte aplicable. Este tipo de instrumentación, utilizado para monitorización continua, tiene la ventaja de proporcionar una imagen completa de la evolución del lecho del río, permitiendo reconstruir tanto el proceso de arrastre y socavación durante la riada como el posterior de sedimentación y relleno.

c) Sistemas enterrados o hincados de varillas

En este grupo se incluye todo tipo de sistemas basados en elementos verticales como tubos, varillas, perfiles, etc. que deben ser montados o hincados en el lecho del río, hasta llegar por debajo de la máxima cota de socavación esperada. Se utilizan con medidores de muy diverso tipo (mecánicos, ópticos, de conductancia, etc.) [21]. La columna soporte vertical puede ser instalada mediante hincado, perforación, excavación y posterior relleno, etc.

El sistema más típico en EE.UU es el del anillo deslizante, en el que dicho anillo equipado con imanes, desliza por el exterior de un tubo de acero inoxidable. Para su uso en monitorización discontinua (operación manual) se emplea un sensor basado en un interruptor magnético conectado a una batería y un zumbador mediante un cable graduado suficientemente largo, que desliza por el interior del tubo. Si se emplea en monitorización continua, se dispone una hilera de interruptores magnéticos regularmente espaciados a lo largo del tubo; al ir progresando la socavación, el anillo deslizante desciende y sus imanes van activando los interruptores dispuestos.

d) Otros dispositivos enterrados

Pueden ser elementos flotantes que deben ser enterrados en el lecho del río a diversas cotas. Al progresar la socavación los elementos que van quedando expuestos salen a flote. Se emplean, o bien simples elementos flotantes anclados mediante un cable o cuerda flexible al puente, o bien elementos dotados de un transmisor activado por el movimiento del agua, que comienza a transmitir una señal en el momento en que queda liberado por la socavación.

Además de los elementos anteriores, todos ellos susceptibles de ser utilizados en monitorización tanto continua como discontinua, se pueden emplear también en la monitorización discontinua otros equipos a base de pértigas, o cables graduados con un peso mayor o menor en su extremo o aparatos de instrumentación geofísica basados también en propagación de ondas y medida de la reflexión de las mismas. La principal diferencia de éstos últimos con el sonar es que las ondas penetran en el propio lecho del río, proporcionando información del mismo, mientras el sonar simplemente detecta la capa superior del lecho y permite determinar su posición. Los instrumentos sísmicos emplean señales sónicas similares al sonar pero a frecuencias menores (normalmente de 2 a 16 kHz) mientras el radar (Ground Penetrating Radar GPR) utiliza señales electromagnéticas en el rango de 60 a 300 MHz, detectando las reflexiones causadas por las interfases entre las diferentes capas con distintas propiedades eléctricas.

3.4.5. Planificación de la monitorización

3.4.5.1. Monitorización estructural

Dependiendo de los objetivos que se persigan con la monitorización, la duración de la observación podrá variar desde unas pocas horas (no habitual en el análisis de problemas de cimentación, pero sí, por ejemplo, en pruebas de carga) hasta meses o incluso años. Esto influye de forma directa en el diseño del propio sistema de monitorización, puesto que será necesario tener en cuenta circunstancias tales como [12]:

- resistencia de los aparatos empleados a los agentes atmosféricos;
- estabilidad de su respuesta a largo plazo;
- dificultades de montaje y de lectura (necesidad de acceso para la realización de la misma);
- precisión alcanzada, a priori, por cada sistema;
- cualificación necesaria en el personal encargado de su seguimiento;
- velocidad de evolución previsible de las magnitudes a controlar y frecuencia de medidas prevista.

3.4.5.2. Monitorización de la socavación

Muchos de los sistemas antes comentados exigen que su instalación haya sido prevista antes de la construcción del puente pues, de lo contrario, la propia instalación puede ser muy complicada y costosa.

En este sentido, en [14] se hace una evaluación de los cuatro grandes grupos de sistemas antes comentados desde diversos puntos de vista tales como: posibilidad de instalación en una pila o estribo, precisión mejor que ± 30 cm, posibilidad de lectura remota, de funcionamiento durante riadas, facilidad de instalación, tolerancia al hielo, a los arrastres o a las acciones vandálicas, facilidad de manejo y mantenimiento, coste, etc., calificando cada grupo de aparatos para cada criterio con los niveles de bueno, aceptable, pobre o desconocido, resultando los sistemas basados en sonar como los de mejores prestaciones conjuntas con cierta diferencia.

3.4.6. Metodología de toma de datos e interpretación de resultados

3.4.6.1. Monitorización estructural

Es necesario evaluar experimentalmente la precisión real que proporciona, en las condiciones de obra, el sistema de seguimiento empleado, desde el punto de vista del fenómeno estudiado. Esto implica, en muchas ocasiones, la necesidad de valorar cuál es la amplitud de las variaciones que puede presentar la magnitud evaluada por la simple modificación de determinados agentes externos (variaciones de la temperatura, del nivel freático, de las cargas de tráfico) y que, sin embargo, no afecte específicamente al problema que se pretende estudiar mediante la monitorización [9].

Un caso típico de esta situación son, por ejemplo, las variaciones de abertura de fisuras como consecuencia de la “respiración” de la estructura frente a modificaciones térmicas diarias o estacionales. Es importante identificar estas variaciones para evitar conclusiones alarmistas a partir de extrapolaciones indebidas, formuladas sobre la base de observaciones efectuadas en un lapso de tiempo excesivamente corto. En muchas ocasiones esto exige que el seguimiento se realice al menos durante un año para estar en disposición de diferenciar entre la parte del movimiento debido a la “respiración natural” de la estructura frente a situaciones ambientales cambiantes y la parte correspondiente, por ejemplo, a la evolución de un problema de asentos de cimentación.

En la figura 3.15 se presentan dos ejemplos reales de seguimiento de movimientos. En el primero de ellos se observa una considerable variación de la distancia medida mediante un medidor de convergencias, que es debida exclusivamente a variaciones térmicas estacionales, de forma que la situación una vez transcurrido un año vuelve a ser la misma que se tenía al comenzar la observación. Por su parte, el segundo ejemplo, muestra la evolución de una abertura de fisura que, en el transcurso de pocos

meses, presenta una evolución, con aberturas crecientes a velocidades cada vez mayores, claramente indicativas de la presencia de un problema estructural.

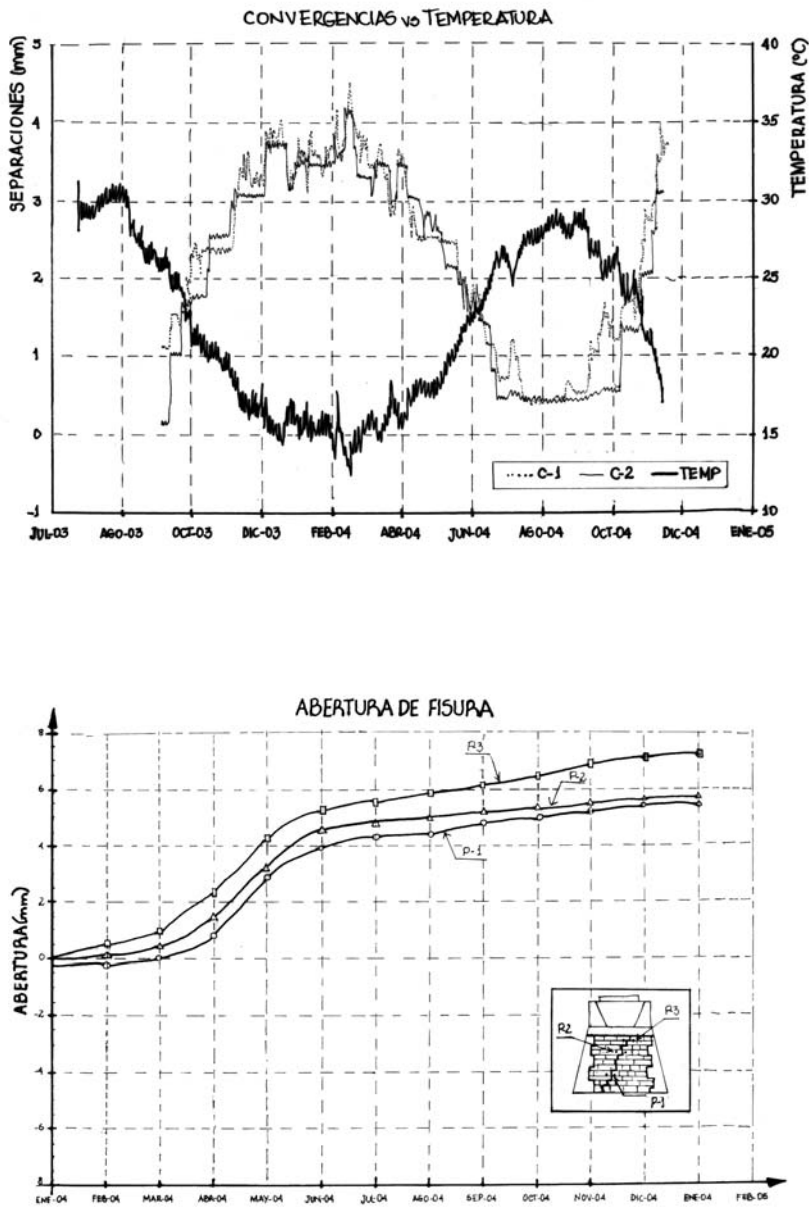


Figura 3.15. Gráficas de evolución de movimientos.

Cuando las variaciones registradas de las magnitudes bajo control no reflejan sino la respiración natural de la obra bajo el efecto de los agentes naturales exteriores, la utilización de correlaciones múltiples puede servir para identificar la parte debida a cada parámetro que intervenga en el fenómeno observado [12].

De cara al diseño de la monitorización es importante evaluar previamente, según la magnitud a controlar, el rango de medida esperable para que resulte coherente con el de medida de los aparatos empleados y su precisión.

3.4.6.2. Monitorización de la socavación

Dada la imposibilidad de sustitución o actuación sobre todos los puentes que muestran una cierta susceptibilidad a un posible daño o hundimiento por socavación, las pruebas realizadas con equipos de monitorización de la socavación han mostrado sus posibilidades y utilidad tanto en el caso de equipos permanentes y transmisión vía radio (en los puentes más críticos en cuanto a susceptibilidad a un posible hundimiento por socavación) como en el caso de los equipos portátiles empleados en monitorización periódica de los puentes menos críticos.

En el caso de los equipos tipo sonar, pueden presentarse problemas con las variaciones de temperatura del agua, en tanto en cuanto afecta a la velocidad del sonido en la misma, si bien no suele tener excesiva trascendencia dada la precisión requerida para estas medidas (habitualmente del orden de los 30 cm). Si resulta necesario pueden hacerse correcciones de las lecturas por temperatura e incluso, en casos muy específicos, por la salinidad del agua, durante la etapa de postproceso de resultados.

3.5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dirección General de Carreteras (2002): "Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera".
2. Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de l'Espace (Diciembre 1991): «Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art », fascicule 11, Fondations en site terrestre.
3. Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de l'Espace (Diciembre 1991): «Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, fascicule 10 Fondations en site aquatique».
4. Ministère des Transports. Direction Générale des Transports Intérieurs (Diciembre 1980): "Fondations de ponts en site aquatique en état précaire".

5. Caumes, Underwater foundations of railway bridges. Gestion des ouvrages d'art. Actes du colloque organisé par l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, octobre 1994.
6. Avent R.R., Alawady M., Heymsfield E., Inspecting Concrete Bridge Substructures (Part 1: Scour). Concrete International, January 2001.
7. LeMieux G.F., Underwater inspection of the world's longest overall bridges, part I. Concrete International, February 1998.
8. LeMieux G.F., Underwater inspection of the world's longest overall bridges, part II. Concrete International, March 1998.
9. Corté J.F., Auscultation et diagnostic des fondations: Le cas des ponts anciens en site aquatique. Restauration des Ouvrages et des Structures. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
10. Sánchez Domínguez F., Métodos no destructivos de control de cimentaciones profundas. Casos Prácticos. EUROCONSULT-CEBTP, S.A.
11. Larry D. Olson, Farokh Jilinoos, Marwan F. Aouad, Determination of unknown subsurface bridge foundations. A summary of the NCHRP 21-5 interim report.
12. Corté J.F. et Pincent B., Mesures de déplacements pour la surveillance des ouvrages d'art. Comptes-rendus du Colloque International sur la Gestion des Ouvrages d'Art – Paris, Avril 1981, Vol. 1.
13. Baguelin F., Corté J. F., Levillain J. P., Méthodes d'inspection et d'auscultation des fondations et piles des ponts anciens. Revue Travaux n° 544, Juin 1980.
14. Lasa, I.R.; Hayes, G.H.; Parker, E.T.: "Remote monitoring of bridge scour using echo sounding technology". TRB Transportation Research Circular 498. June 2000.
15. Cuvillo, R.: "Inspección de estructuras". Curso de técnicas experimentales para la evaluación del estado de las estructuras. Laboratorio Central, CEDEX, MOPU. Madrid, 1985.
16. Kashima S., Yanaka Y., Suzuki S. y Mori K.: Monitoring the Akashi Kaykyo Bridge: first experiences. Structural Engineering International IABSE, Vol. 11 n. 2, May 2001.
17. Real Academia Española de la Lengua: Diccionario de la lengua española, 22ª edición.
18. Seco M., Andrés O. y Ramos G.: Diccionario del español actual. Ed. Aguilar, 1999.
19. Armer G.S.T. (Ed.): Monitoring and assessment of structures. Spon Press, 2001.

20. Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Fascicule 03 : Auscultation. Surveillance renforcée. Haute surveillance. Mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde. Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.
21. Richardson, EV; Pagan-Ortiz, JE; Schall, JD; Price, GR.: "Monitoring and plans for action for bridge scour: instruments and State Departments of Transportation experiences." Transportation Research E-Circular E-C049, April 2003.
22. Lagasse, PF.: "1998 Scanning review of european practice for bridge scour and stream instability countermeasures". NCHRP Research Results Digest 241. July 1999.
23. Schall, JD; Davies, P.: "Research pays off: instrumentation for measuring scour at bridge piers and abutments". TR News 203. July 1999.
24. Lagasse, PF; Nordin, CF; Schall, JD; Sabol, GV.: "Scour monitoring devices for bridges". Transportation Research Record 1290. 1991.
25. Harrison, LJ.: "Federal highway administration bridge scour practice". Transportation Research Record 1290. 1991.
26. Del Grosso, A.: "Special monitoring projects". SAMCO Summer Academy 2005, 05-09 September 2005, Zell am See, Austria.
27. Mufti, A.: "Guidelines for Structural Health Monitoring", ISIS Canada Design Manuals (No. 2), 2001.

