

La presa de El Atazar, 25 años después

El Atazar dam, twenty-five years on

Juan Alberto García Pérez. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director de Explotación de la presa hasta 2006. albgp@ciccp.es

Francisco Blázquez Prieto. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Jefe de la División de Seguridad de Presas. fbblazquez@cyii.es

Juan Pablo de Francisco Díaz. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director de Explotación de la presa desde 2006. jpdefrancisco@cyii.es

Canal de Isabel II. Vocales del Comité Nacional Español de Grandes Presas

Resumen: La presa de El Atazar constituye un importante hito de la ingeniería hidráulica española. Su espléndida bóveda, sus dimensiones (134 m de altura sobre cimientos y casi 500 m de longitud de coronación) y su enclave en un paraje privilegiado del tramo inferior de la cuenca del Lozoya, le proporcionan una indudable calidad estética y paisajística muy apreciada por sus innumerables visitantes y reproducida en abundantes publicaciones y postales. Forma un embalse de 425 hm³ que constituye la principal reserva hídrica de la Comunidad de Madrid (6 millones de habitantes en la actualidad). Probablemente por su envergadura técnica y su trascendencia estratégica fue inaugurada el 10 de abril de 1972 por el Jefe del Estado. Desde su construcción a impulso del ministro Silva Muñoz, en una época en la que la capital sufría fuertes restricciones en su suministro, ha favorecido el desarrollo urbano, industrial y económico del área de Madrid. La calidad del agua que almacena goza de justa fama por su baja mineralización y elevada transparencia. La vegetación suso y ayuso del embalse se ha conservado en excelentes condiciones.

En el presente trabajo se resumen las actividades que ha llevado a cabo el Canal de Isabel II para su seguridad, conservación y explotación en los últimos 25 años, exponiendo los datos del control y la evolución de la estructura y el cimiento, así como los concernientes a la fisuración detectada en 1978. Se concluye que con el cuidadoso control y explotación que se ha efectuado, la presa ha presentado un comportamiento muy aceptable. Asimismo se subraya la creciente importancia que las labores de explotación y mantenimiento están adquiriendo entre los quehaceres de los ingenieros hidráulicos.

Palabras Clave: Seguridad de presas; Auscultación; El Atazar; Instrumentación; Conservación y mantenimiento

Abstract: El Atazar dam was an important landmark in Spanish dam engineering. Its splendid double arch, its dimensions (rising 134 m from its foundations and with a crest length of nigh on 500 m) and its location in a privileged setting at the lower section of the Lozoya basin, all serve to provide the dam with an unquestionable aesthetic and appealing quality readily appreciated by the many visitors to the dam and one reproduced in countless publications and postcards. The dam forms a 425 hm³ impoundment which serves as the main water storage area of the Madrid Community area (with a current population of 6 million inhabitants). On account of the dam's technical accomplishment and strategic importance, the dam was opened by General Franco himself on 10 April 1972. Ever since its construction, under the auspices of the Minister Silva Muñoz, in a period where the capital was suffering heavy restrictions in water supply, the dam has allowed the urban, industrial and economic development of the Madrid area. The low mineralized and highly transparent water stored in the reservoir is justifiably held in very high esteem and the upstream and downstream vegetation of the reservoir have remained in excellent condition. This article summarises the activities by the Canal de Isabel II Water Board aimed towards the safety, maintenance and operation of the dam over the last 25 years, indicating control details and the development of the structure and foundations and providing information on the cracking detected in the dam in 1978. The article concludes that careful control and operation have both ensured the very acceptable level of behaviour of the dam. The author also underlines the increasing importance of operation and maintenance tasks within the duties of water engineering specialists.

Keywords: Safety of dams; Auscultation; El Atazar; Instrumentation; Conservation and maintenance

Introducción

Han transcurrido 25 años desde la publicación en la ROP del último artículo relacionado con la presa de El Atazar (*"Los anclajes en la presa de El Atazar, comprobación de anclajes de control después de diez años de funcionamiento"* de Rodolfo Urbistondo y Luis Yges, ROP Diciembre 1983). La Revista había publicado en noviembre de 1969 y 1970 dos artículos sobre *"Galería de presión del canal de El Atazar (1ª sección)"* de José Román Sánchez de la Nieta y Miguel García Mayo; en octubre de 1970 se publicó *"El hormigón en la presa del Atazar"* de Carlos Duelo Topete y Fernando del Río Zuloaga; en octubre de 1973 *"Torre de toma del canal de El Atazar"* de José Román Sánchez de la Nieta y en la edición de abril-mayo de 1982 *"Presa de El Atazar. Tratamiento de fisuras del paramento de aguas arriba"* escrito por Rodolfo Urbistondo y Luis Yges. Posteriormente, en la edición de mayo-junio de 1985 se publicó otro artículo con el mismo título y autores aunque de diferente contenido.

A solicitud del Director de la Revista, Juan Antonio Becerril, se presenta este trabajo en el que se intenta describir la evolución del comportamiento de la presa, las investigaciones y estudios realizados y la aplicación de las nuevas técnicas de control y de explotación durante el período 1983–2007.

El río Lozoya ha vertido sus aguas por el aliviadero de la presa en varias ocasiones y, como decía Francisco Fernández Damborenea, también sobre la presa se han vertido "ríos de tinta". No pretendemos que este artículo sea un "río" sino un modesto arroyo, pero de aguas claras, que aporte el relato desapasionado de lo acaecido en un cuarto de siglo por si puede ayudar al lector (especialmente a quien le haya podido llegar una información dispersa) a formarse su propio juicio en una crónica que trata de ser objetiva, a pesar de la profunda "amistad" y confianza que los autores hemos ido forjando con la presa, de la que nos hemos ocupado con fidelidad, sin fallarle un solo día.

La presa de El Atazar da origen al embalse más aguas abajo de los cinco que regulan la cuenca del río Lozoya para el abastecimiento de agua a la Comunidad de Madrid. Se encuentra en el tramo inferior del río Lozoya, cercano a su afluencia al Jarama. Es la presa más importante del sistema de abastecimiento a la Comunidad de Madrid ya que el volumen máximo de su embalse, 425 hm³, supone el 46% de la ca-



Fig. 1. El Atazar en construcción.

pacidad total de embalse del Canal de Isabel II. Se construyó (Fig. 1) entre 1966 y 1972.

La presa es del tipo bóveda gruesa, tiene una altura sobre cimientos de 134 m y un espesor de 36 m a la cota de los desagües de fondo y de 6 m en coronación. Sus características principales están recogidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Ficha Técnica de la presa de El Atazar	
Tipología	Bóveda gruesa
Tipo según el RTSPE	Gran Presa
Clasificación por riesgos aguas abajo	A
Capacidad del aliviadero a cota 872,10 (m ³ /s)	250
Tipología del aliviadero	Labio fijo
Capacidad de los desagües intermedios a cota 872,10 (m ³ /s)	253
Capacidad de los desagües de fondo a cota 872,10 (m ³ /s)	245
Altura de la presa sobre cimientos (m)	134,00
Altura de la presa sobre el cauce (m)	127,80
Cota del cauce (m.s.n.m.)	745,40
Cota del labio del aliviadero (m.s.n.m.)	870,00
Cota de coronación (m.s.n.m.)	873,40
Longitud de coronación (m)	484,00
Volumen a Cota del labio del aliviadero (hm ³)	425,00
Superficie de cuenca (km ²) total río Lozoya / Intercuenca	918 / 195
Avenida Máxima registrada, punta horaria (m ³ /s)	910 (marzo 1991)
Aportación media anual (hm ³) total río Lozoya / Intercuenca	378 / 54

Comportamiento Estructural en su primera etapa (1972-1983)

La presa tuvo su primer llenado hasta la cota 825 entre los meses de enero y junio de 1971 y hasta la cota 860 entre febrero y mayo de 1972.

El suceso de mayor importancia acontecido durante la primera fase de explotación de la presa se produjo en febrero de 1978, cuando se registró un incidente grave: la progresión de una fisura en el paramento de aguas arriba que profundizó hasta hacerse visible en la galería 770, en la que se detectó un importante caudal. El nivel de embalse había alcanzado la cota 868,72 (a poco más de un metro del aliviadero) tras un rápido ascenso y en una época de temperaturas bajas. El caudal drenado estimado fue del orden de 8.000 l/min de los que unos 3.000 surgieron por drenes de paramento y taladros pasantes y el resto, unos 5.000, por las galerías.

Inmediatamente se analizó la situación con el fin de intentar establecer las posibles causas del incidente, la influencia que podría tener sobre la explotación de la presa y las medidas correctoras que debían acometerse.

La investigación de la fisura, por medio de la extracción de testigos de hormigón desde las galerías y mediante cámaras submarinas y buzos, permitió conocer su morfología. Su desarrollo afecta al paramento de los bloques centrales (8, 6, 4, 2, 0, 1 y 3) y penetra en ellos con profundidad variable (entre un tercio y dos tercios de su espesor) con un desarrollo y superficie del orden de 150 m y 2.000 m² respectivamente.

Nos detenemos brevemente para exponer unas palabras sobre las causas atribuidas a la aparición de la fisura, que han sido variadas. Entre las más reconocidas están la de carácter térmico (microfisuración producida por fuertes gradientes térmicos debidos al cambio en el sistema de refrigeración durante la construcción) y la relacionada con la asimetría constructiva (diferencia de rigidez estructural del cuerpo de presa debida, sobre todo, a la construcción del zócalo en la ladera derecha, causa principal de la asimetría de desplazamientos). Es muy probable que esa rigidización artificial produjese una diferencia de deformación en el terreno, por lo que durante el primer llenado se produjeron movimientos plásticos en alguna zona de la cimentación de la margen izquierda de hasta 7 mm, mientras que los

desplazamientos máximos en la derecha fueron de 3 mm. Por ello se piensa que las deformaciones plásticas asimétricas pudieron provocar tensiones por torsión en el tercio inferior de la bóveda dando origen a la fisura.

Durante los años 1978 y 1979 se procedió a la reparación, que consistió en el sellado de la fisura en el paramento de aguas arriba efectuado por buzos, seguido de una campaña de inyecciones con resinas epoxídicas desde las galerías.

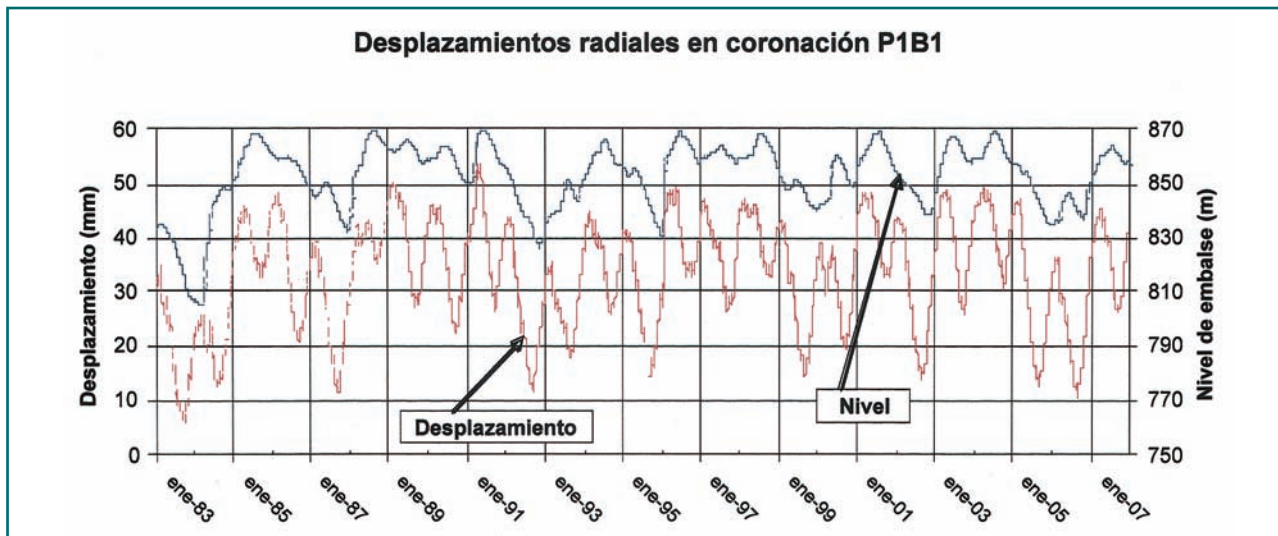
Las medidas correctoras puestas en práctica en los meses y años posteriores al incidente fueron enfocadas a la mejora de la situación de la presa (especialmente continuando las inyecciones con resina en la zona de la fisura y ampliando su drenaje) y a completar la instrumentación de auscultación (instalación de extensómetros de varillas en la cimentación y extensómetros eléctricos en la zona fisurada).

Durante esa primera etapa de la historia de la presa fueron tan numerosos los expertos y equipos de trabajo que aportaron su inestimable colaboración que hemos de pedir excusas anticipadas si, entre los que se citan a continuación, se producen inevitables olvidos:

- Nicolás Navalón en 1979 estudió concienzudamente el origen de la fisura.
- Los Técnicos de CONSULPRESA y MEDYTSA prestaron de modo consecutivo su apoyo técnico en la interpretación del comportamiento de la presa hasta 1987.
- Rodolfo Urbistondo, desde su máxima responsabilidad como Ingeniero Director del Canal de Isabel II, condujo el equipo encargado de las investigaciones y aportó sus notables conocimientos técnicos.
- Luis Yges dirigió la vigilancia de su comportamiento, las obras de inyecciones y las de mejora de la auscultación.
- RODIO ejecutó las obras de reconocimiento e inyección.
- El equipo de técnicos del Servicio de Vigilancia de Presas de ese período colaboró con sus conocimientos y dictaminó sobre los informes y notas elaborados en la época.

En este primer período de la vida de la presa, el nivel del embalse superó, durante semanas, la cota 860 en tres ocasiones y las cotas 867 y 869 en otras dos.

Fig. 2.
Desplazamientos
radiales
centrales
1974-1982.



En la Fig. 2 se aprecia la evolución de los desplazamientos radiales en coronación, en ella se destaca que, después del primer llenado, estuvieron bien correlacionados con el nivel del embalse.

Actuaciones desde 1983

Estudios y Colaboraciones

Vaya por delante nuestro reconocimiento a quienes han dedicado mucho tiempo, conocimientos y esfuerzo a tratar de progresar en la comprensión de las características y el comportamiento de la presa en este período de los últimos 25 años. Pedimos disculpas a aquellos que involuntariamente no se mencionen.

Hasta 1987, como se ha dicho, **MEDYTSA** siguió prestando su apoyo técnico en el control y la interpretación del comportamiento, bajo la dirección de Benito Díaz y Manuel García Peris.

En 1987 **ATI** elaboró un estudio sobre la alteración de la roca de cimentación.

Antonio Soriano y Ángel Arcones (Ingeniería del Suelo, S.A.) mantuvieron una larga e intensa colaboración con el Canal de Isabel II entre 1988 y 2002, muy especialmente con la elaboración de 10 Informes anuales de comportamiento (1988 a 1999), un modelo estadístico de desplazamientos radiales (1990), un modelo de elementos finitos (1991) y diversos informes y notas sobre: tensiones existentes en los anclajes de las vigas para consolidación de las laderas (1991), extensómetros del cimiento (1991), movimientos de la ci-

mentación (1991), auscultación geodésica (1991), análisis químico del agua de los manantiales (1997), potencial expansividad de los hormigones (1998). Promovieron actuaciones como los ensayos de liberación de tensiones en los paramentos de las galerías perimetral y 770 (1990), e investigaciones sobre las características de la roca de cimentación, ensayos dilatómétricos (1992), etc.

Giovanni Lombardi colaboró durante más de dos años (1995-1998) en la elaboración de estudios e informes (que resumió en su "Informe final sobre la seguridad de la obra y de su cimentación – Julio 1998" y promovió la ejecución de los ensayos y actuaciones llevadas a cabo entre 1998 y 2002, cuyo resultado fue la actual organización del control de la presa.

Joaquín Díez-Cascón en 1997 realizó el trabajo "Presa de El Atazar. Caracterización del hormigón" en la Universidad de Cantabria.

César Sagaseta y José Manuel Sánchez Alciturri realizaron el trabajo "Caracterización del terreno de cimentación" en la Universidad de Cantabria en 1997.

Moisés Rubín de Célix, Juan Carlos de Cea, Miguel Cabrera, Luis Pérez, José Miguel Majadas, José de Castro y Juan Alberto García trabajaron como integrantes del "Grupo Técnico de Trabajo para el Estudio de la Presa de El Atazar" constituido por el Presidente de la Confederación Hidrográfica del Tago en 1999, para que analizasen el sistema de auscultación y redactasen un plan de puesta en carga controlada de la presa tendiente a revisar las condiciones de explotación. Posteriormente se fueron incorporando al Grupo (por sustitución cronológica de algunos de sus

miembros) **Bernardo López-Camacho, Juan Pablo de Francisco, José Antonio Díaz Lázaro-Carrasco, Julio Cortés y Justo Mora.**

Jesús Granell en noviembre de 2005 redactó el informe "Estudio de la presa de El Atazar y su cimentación" y en marzo de 2007 el "Programa de puesta en carga total de la presa de El Atazar".

Francisco Sánchez Caro en 2006, realizó la revisión del modelo estadístico de desplazamientos radiales.

La División de Seguridad de Presas del Canal de Isabel II, conducida por **Francisco Blázquez**, ha realizado o dirigido desde 1989 una extensa serie de estudios y actuaciones entre los que se destacan: realización de 13 taladros verticales de drenaje complementario desde la clave de la galería perimetral en los 7 bloques centrales sobrepasando más de 10 m la zona fisurada (1990), determinación de desplazamientos en la presa de El Atazar entre 1971 y 1990 (1991) y entre 1991 y 1995 (1996), estudio de correlación entre la temperatura ambiente y temperaturas en el hormigón 1996-1997 (1998), informe sobre la campaña de identificación y lecturas de termopares (1998), estudio de la situación, estado y lectura de los piezómetros (1999), instalación de lectores ópticos automáticos con precisión de 0,01 mm para medir de forma fiable los pequeños desplazamientos (corto plazo) y las posibles deformaciones lentas (largo plazo) (1993-2001), establecimiento de los valores umbral de alerta y alarma para todos los instrumentos clasificados como detectores (2000), análisis de desplazamientos radiales a lo largo del tiempo para diferentes cotas de embalse en El Atazar (2004), etc.

Ensayos realizados

- 1997: Sondeos (21) con extracción de testigos, registro automático de parámetros de perforación, ensayos de permeabilidad Lugeon, testificación geofísica y ensayos dilatométricos, para disponer de información actualizada sobre el terreno de cimentación y contrastarla con la obtenida en campañas anteriores. Desde la galería perimetral se perforaron 266 m (taladros de 30 m de longitud media) y desde el plinto de aguas abajo 488 m (de 35 m de longitud media) distribuidos uniformemente a lo largo de todo el contacto.
- 1997: Testificación de 36 Sondeos de 1983 para establecer la columna litológica con los mismos

criterios de descripción utilizados en esta campaña

- 1997: Análisis químicos referentes a las aguas circulantes en la presa, la cimentación, la zona de apoyo y los alrededores de la obra.
- 1997: Medida y análisis de los caudales de las fuentes e infiltraciones.
- 1997: Ensayos de laboratorio en relación con las propiedades mecánicas e hidráulicas de los hormigones.
- 1997: Ensayos de laboratorio sobre las propiedades mecánicas del macizo de cimentación.
- 1997: Análisis de la microestructura de los hormigones de la presa
- 1999: Toma de datos y análisis de las vibraciones generadas durante las maniobras en los desagües.

Trabajos subacuáticos

Como ya se ha indicado, tras el incidente de fisuración se efectuó en 1978 y 1979 una campaña de inyecciones desde las galerías. En 1982, aprovechando el bajo nivel de embalse, se realizaron otros trabajos de sellado complementarios, si bien en algunos drenes aislados no se llegaron a eliminar las filtraciones. Con el paso de los años se fue observando que existía una tendencia al aumento del caudal drenado a través de la fisura reparada. Por ello, en 1990 se decidió iniciar una serie de campañas de investigación previa y de reparación consecuente. Por su importancia y singularidad nos detendremos en describir estos trabajos con un cierto grado de detalle.

Las investigaciones realizadas han llevado a la conclusión de que los puntuales pasos de agua, que tienen una dimensión próxima a 1 mm en el paramento, se deben a la degradación (por envejecimiento e inherente rigidez) del cordón de sellado de la fisura ejecutado en 1978 en el paramento de aguas arriba y a la consecuente erosión del hormigón en los puntos en los que la resina inyectada desde el interior en aquella fecha no consiguió llegar hasta el paramento, dando origen a un pequeño conducto de paso de agua. Está claro que las filtraciones esporádicas no se producen como consecuencia de un despegue de la zona fisurada, fenómeno que habrían detectado los múltiples extensómetros instalados y, muy especialmente, los dos micrómetros deslizantes tipo Kovari, que tienen una precisión de milésima de milímetro.

El control permanente de los drenes de la fisura y las periódicas inspecciones subacuáticas permiten tener bien acotado el fenómeno y actuar como se describe a continuación cuando el caudal drenado alcance unos valores relevantes.

Inspecciones subacuáticas

Antes de cada campaña se realiza una inspección subacuática que permita programarla con detalle para hacerla compatible con la gestión del recurso hídrico y determinar las condiciones de trabajo en función de la profundidad.

Las inspecciones se realizan con los "ROV" (Remote Operated Vehicle), operados por control remoto mediante cable y provistos de cámara de televisión. Disponen de un centro de mando en la superficie que alberga monitores de televisión, videos para grabación y reproducción de imágenes e impresión en papel fotográfico. El sistema utilizado evita muchas horas de buceo de elevado coste. Se han usado diferentes modelos, pues no todos son adecuados para la elevada profundidad de trabajo. Se han efectuado revisiones en los años 1990, 1992, 1996 y 2007.

Sellados de puntos de paso de agua

La obturación de los puntos de paso de agua se ha realizado siguiendo una metodología que se ha ido depurando a lo largo de las sucesivas actuaciones. Esencialmente podemos dividirla en 4 fases:

1. Los buzos localizan los puntos de paso de agua en la zona de succión que los drenes habían detectado y el ROV precisaba. Instalados en un andamio para facilitar su labor, eliminan la masilla del cordón degradado y preparan un buen asiento de las placas rectangulares de PVC provistas de conectores roscados con válvula, definiendo su tamaño para cubrir también los eventuales puntos de succión menor no detectados por el ROV. Las válvulas están identificadas con chapitas numeradas.
2. Se ubican las placas con la ayuda de la propia presión hidráulica. Se reciben firmemente en su contorno con masilla epoxídica de dos componentes y se dejan los inyectores abiertos para que sigan drenando, protegidos con una malla que retiene las partículas en suspensión.
3. Polimerizada la masilla (24 a 48 horas) se cierran las válvulas, lo que permite detectar eventuales succiones adyacentes que eran inapreciables al dominar la succión principal. Se sella el cordón en los tramos que no tienen ninguna succión.
4. Se inyecta resina epoxídica fluida mediante inyectores de 6,5 litros, provistos de émbolo, que se enroscan a los conectores de la placa. La diferencia de presiones es suficiente para que la resina penetre. Se cierran las válvulas para que la polimerización de la resina permita la obturación y relleno del conducto que se produjo por erosión. La operación termina cuando no hay más admisión y se cierran las válvulas, que quedan definitivamente selladas por la polimerización de la resina.

Se han utilizado diversos tipos de buceo:

- "a saturación": esta modalidad de buceo se caracteriza por la permanencia constante a la presión de trabajo, con lo que el tiempo efectivo de actividad puede ser muy largo (un equipo de dos buceadores puede trabajar hasta ocho horas al día), con la condición de que se mantengan adecuadamente presurizados. Se consigue así una menor duración de obra. El mayor coste de implantación inicial se amortiza rápidamente.
- "clásico": inmersiones con traje seco, suministro de aire desde superficie y paradas de descompresión en el agua mediante campana húmeda.
- "respiración de gases": de diferentes tipos (hasta cuatro) en función de la profundidad. Aumentan los tiempos de descompresión y se resuelve la pérdida de calor debida a la respiración de compuestos de helio, mediante la utilización de "trajes húmedos" (circula agua caliente enviada desde el exterior entre el traje y el cuerpo del buceador).

Los elementos precisos para las reparaciones mediante buceo se ubicaron sobre una plataforma flotante modular de 108 m² formada por bloques de polietileno de alta densidad.

Las campañas de reparación se realizaron en 1990, 1992, 1997, 2002 y 2007. En la Tabla 2 se resumen los trabajos y sus resultados:

Tabla 2. Trabajos subacuáticos

Año	Mes	Prof. (m)	Tipo buceo	Nº de drenes	Bloques tratados	Caudal (l/min) en la zona tratada	
						Previo	Final
1990	dic	80	saturación	4	0 - 2 - 6	731	19
1992	oct	58	clásico	1	4	446	20
1997	feb	90	gases	8	0 - 2 - 4	808	31
2002	sep	70	gases	8	0 - 2 - 3 - 4	667	14
2007	dic	87	gases	2	0	258	28

En la Fig. 3 se aprecia muy bien el resultado de las actuaciones, con los drásticos decrementos de caudal tras cada campaña.

Debe destacarse que todas las zonas reparadas desde 1990 no han vuelto a sufrir incrementos de filtraciones. En el conjunto de todas las campañas, las admisiones de resina han sido de 5 litros de media por cada conector, lo que indica claramente la escasa sección de las zonas de paso de agua.

Mejoras del sistema de auscultación de la presa

Durante estos últimos 25 años, las mejoras en el sistema de auscultación de la presa han sido constantes y de gran importancia. Partiendo de una situación privilegiada tanto por el número como por la calidad de instrumentos de medida y control que estaban instalados en 1982, a lo largo de estos años se han introducido importantes y variadas mejoras, que esquematizamos a continuación:

Clasificación de los instrumentos

Para sistematizar el análisis del comportamiento de la presa se hacía preciso seleccionar, de entre el ingente volumen de datos disponible, aquellos que mejor informaran a diario sobre la situación. Por ello se estableció en 1999 una división de los instrumentos en:

- detectores (de lectura diaria, miden las magnitudes básicas indicativas del comportamiento) y
- de apoyo (los que pueden ayudar a interpretar los eventuales fenómenos anormales que se detecten o que proporcionan información adicional).

Los 71 equipos clasificados como detectores son los siguientes: 16 bases de lectura de péndulos (con lecturas radial y tangencial por base), 16 aforos zonales y 3 aforos en drenes, 12 piezómetros en cimentación, 12 extensómetros de varillas y 12 termorresistencias.

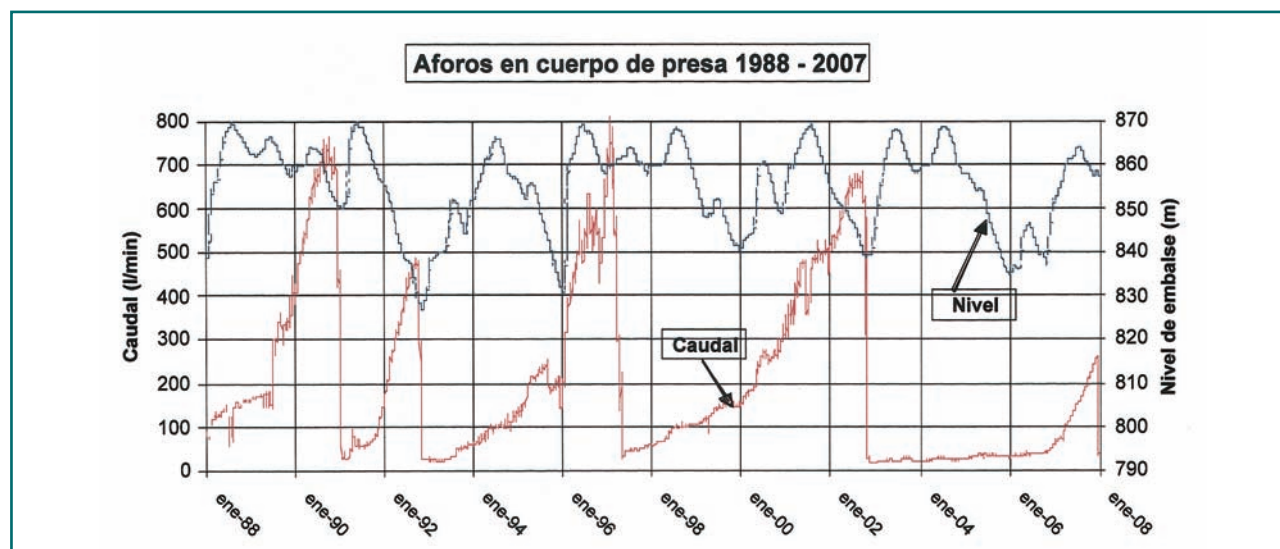


Fig. 3. Aforos en cuerpo de presa 1988 - 2007.

Las medidas proporcionadas por estos instrumentos constituyen la base del Boletín Diario de Auscultación. A las 10 de la mañana se dispone de ellas, ya comparadas con los modelos.

Los instrumentos **de apoyo** son: 30 bases de lectura de los péndulos, 47 extensómetros de varillas, 2 bases de micrómetros deslizantes, 17 caudales zonales, 114 piezómetros, 48 bases de medida (con elongámetro) en zona de fisura, 202 bases para mediciones geodésicas, 176 bases de medida manual de apertura de juntas, 90 termopares instalados durante la construcción, 3 termorresistencias y 8 extensómetros de hilo en la ladera izquierda.

Instrumentación eliminada

Ciertos aparatos que se han revelado como no fiables se han dejado fuera de servicio. En 1988 en la presa existían 672 piezómetros cuya distribución presentaba notables contrastes, ya que había varios bloques con más de 25 piezómetros que se leían con una periodicidad semanal, lo que hacía difícil tratar la información generada. En 1999 se analizaron individualmente y se eliminaron 568, transformándose 91 en drenes y rellenándose 477. Además se incluyeron en este apartado, una vez comprobada la información suministrada, medidores eléctricos de apertura de juntas, extensómetros de gran base en roca, rosetas extensométricas en hormigón y células de carga (todos ellos instalados durante la construcción de la presa), y extensómetros eléctricos en fisura.

Nuevos instrumentos y recuperación de los existentes

A raíz de la fisuración de 1978 se inició un periodo de instalación de nueva instrumentación, entre la que se destaca:

- 60 extensómetros de varillas, entre 1980 y 1983.
- 46 planchetas fijas en las bases de péndulos, de lectura más precisa que las móviles, en 1980.
- 15 termorresistencias integradoras de temperatura zonal, en 1996.
- 2 extensómetros o micrómetros deslizantes (tipo Kovari), en 1997, de 100 m de longitud cada uno (48 m en hormigón y 52 m en el terreno), con una ligera inclinación hacia aguas arriba y abajo respectivamente, que permiten obtener información de las deformaciones cada metro, con

una precisión de milésima de milímetro, aspecto básico en la detección de eventuales fisuras.

En relación con la recuperación de la instrumentación existente, se destaca que en 1998 se comprueba, "in situ" y en la Sala de Control, la lectura de los termopares instalados durante la construcción y, como consecuencia, desde 1999 se realizan lecturas periódicas de estos equipos.

Automatización

Definidos los elementos detectores, se procedió entre 1999 y 2000 a la centralización y automatización de sus lecturas como primer paso para su transmisión al Centro Principal de Control (CPC) del Canal de Isabel II en Madrid. La centralización comenzó en pruebas a finales de 2001 y está plenamente operativa desde mediados de 2002.

Los equipos automatizados que, de modo más relevante, han supuesto un avance en la toma de datos son:

Lectores ópticos automáticos de desplazamiento

Entre 1993 y 2007 se han instalado 25 lectores ópticos, sin contacto con el hilo del péndulo, lo que supone la automatización del 55 % de las 46 bases de lectura de la presa. La precisión de las lecturas es de una centésima de milímetro. Incorporan un display para lectura directa "in situ" de los datos.

Caudalímetros de tipo electromagnético

Se han instalado 18 entre 1999 y 2007. El caudal se observa en un display situado en el propio equipo o en sus inmediaciones y además los datos están centralizados.

Piezómetros automáticos

Desde 1999 se han automatizado 12, que están clasificados como detectores.

Sensores de desplazamiento en extensómetros

En 1999 se instalaron 12 sensores de tipo LVDT con precisión de una centésima de milímetro. La lectura automática se hace sin interferir la posibili-

dad de lectura directa de comprobación. En 2007 se instalan y centralizan otros 45 sensores de este tipo.

Telecontrol y centralización de datos

Existía un sistema de centralización de datos instalado en los años 70 cuyo funcionamiento era deficiente y su técnica había quedado obsoleta. A lo largo de 1998 se comprobó que la transmisión de los datos generaba errores no admisibles y se optó por su desmontaje y sustitución.

En 1999 se proyectó e instaló un nuevo sistema de centralización con el objetivo general de obtener precisión y fiabilidad, así como la posibilidad de transmitir los datos al CPC, situado en Madrid, que dispone de personal permanentemente. Este sistema centraliza casi todos los elementos detectores y permite el control en tiempo real desde la Sala de Emergencia de la presa.

En 2002, aprovechando el sistema de telecontrol propio del Canal de Isabel II, y prácticamente sin tener que hacer ninguna adaptación física o funcional, se realizó la transmisión de estos datos al CPC, que también dispone de una infraestructura informática para el tratamiento y archivo de datos.

Una última fase en 2005 fue la transmisión de la información (siempre en tiempo real) a cualquier ordenador, vía Internet o a través de la red Intranet de la empresa.

Auscultación sísmica

En el año 2005 se instaló un sistema de medición sísmica en la presa, consistente en seis bases de medida con tres acelerómetros cada una según las tres dimensiones. Se ubicaron tres bases en la zona de coronación, una en la zona de aguas abajo de cimentación (en el eje de la presa) y dos en "campo libre", una en la ladera izquierda aguas abajo, a cota cercana a la del cauce, y la otra en la ladera derecha aguas arriba, a cota ligeramente superior a la de coronación.

La finalidad de esta instalación es permitir el adecuado análisis del comportamiento de la presa y su cimentación mediante la reconstrucción completa del eventual movimiento en el terreno y su repercusión en la estructura, lo que será posible dada la situación de los seis sensores.

Tabla 3. Resumen de instrumentación instalada

Equipos de auscultación	Manuales	Automáticos
Aforos zonales de filtraciones	33	16
Drenes controlados	1.218	
Aforos exteriores aguas abajo	12	
Bases de lectura de péndulos	46	25
Medida de presiones	126	12
Medidas en extensómetro deslizante	200	
Bases de medida de juntas	218	
Extensómetros de varillas	159	55
Termorresistencias	106	13
Bases de nivelación topográfica	91	
Puntos de colimación	4	
Bases de poligonación	107	
Total de puntos de medida	2.320	121

Como curiosidad podemos señalar que el pequeño movimiento sísmico del 12 de agosto de 2007 (que supuso una aceleración punta de 0,011 g en la coronación de la presa de Manzanares el Real, distante 40 km) no fue detectado por los equipos de El Atazar al estar regulados a una sensibilidad de 0,020 g (si se regula para valores menores se producen falsas alarmas pues son afectados por el paso de vehículos por la coronación de la presa), si bien fue apreciado por los dos péndulos directos auxiliares de la presa como una oscilación de 0,20 y 0,19 mm de amplitud.

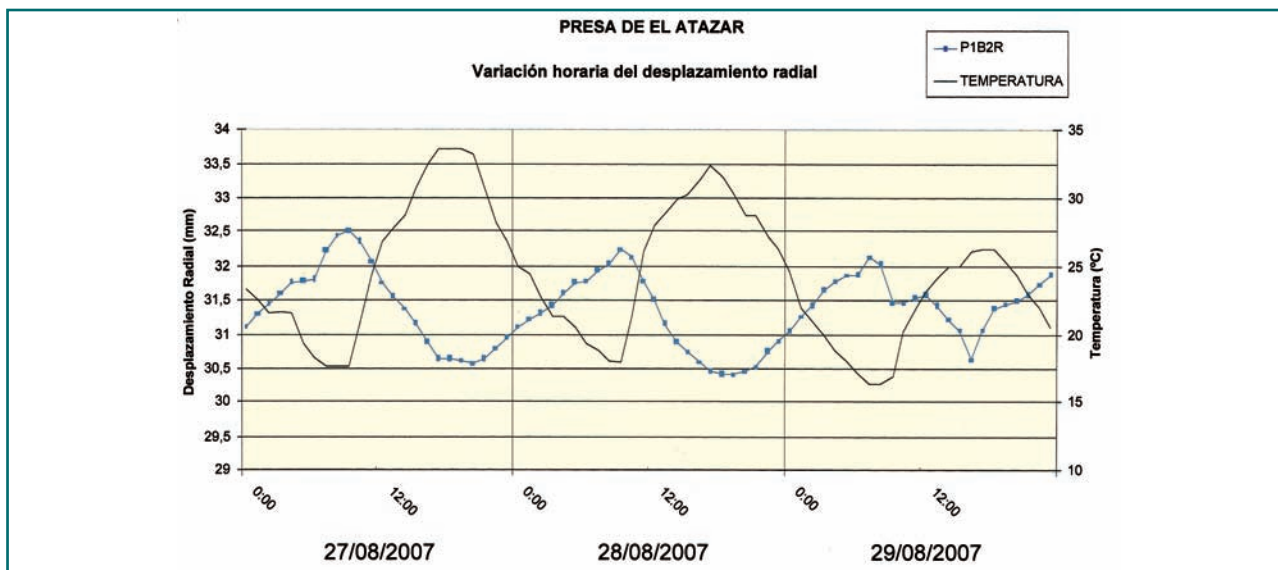
Una presa bien controlada

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las familias de instrumentos de auscultación y control disponibles, y en la Tabla 4 el resumen de datos adquiridos cada año. De su observación se puede deducir el elevado grado de control permanente que se ejerce sobre la presa.

Tabla 4. Lecturas anuales

Tipo de variable	Nº de lecturas
Variables exteriores	1.460
Caudal en aforos y drenes	72.249
Desplazamientos y deformaciones	34.424
Subpresión en la cimentación	10.308
Otras (juntas, temperaturas)	13.272
Lecturas topográficas	309
Total lecturas	132.022

Fig. 4. Variación Radial horaria.



Como curiosidad y muestra de la calidad de los equipos de control instalados en la presa, así como del comportamiento elástico de la estructura, aportamos la Fig. 4 en la que se aprecia la amplitud de ciclo diario de los desplazamientos que los lectores ópticos automáticos son capaces de detectar. Puede apreciarse cómo a lo largo del día los desplazamientos siguen la evolución horaria de la temperatura.

Evolución del comportamiento estructural 1982 - 2007

Datos de niveles de embalses: llenados y sequías

Como puede apreciarse en la Fig. 5, desde 1982 se han registrado condiciones de carga muy variables como consecuencia de los sucesivos ciclos de lluvia y sequía ocurridos durante veinticinco años. En este periodo, el nivel del embalse ha superado en cinco ocasiones la cota 869,00 (a 1 m de la cota de vertido). Incluso en dos ocasiones (julio/88 y mayo/91) se produjo el llenado total con vertido por el aliviadero.

Entre estos periodos de elevado nivel se intercalan épocas de sequía con nivel de embalse bajo. Así, en cinco ocasiones el nivel ha descendido por debajo de la cota 836,00 (34 m por debajo de la cota de vertido).

Llenados totales con vertido por el aliviadero

Entre el 25 y 31 de julio de 1988 se produjo el primer vertido por el aliviadero, alcanzando una altura máxi-

ma de lámina vertiente de 9 cm. Tres años después tuvo lugar el primer llenado total en primavera, entre el 17 y 25 de mayo de 2001, con altura máxima de lámina de 13 cm.

Resumen de informes periódicos de comportamiento

En el año 1989 se inicia la actual organización del control de comportamiento con la emisión de informes anuales y trimestrales, resúmenes de datos mensuales y boletines diarios. Desde entonces se han emitido 18 informes anuales, los 10 primeros redactados por Ingeniería del Suelo, S.A. y los 8 últimos por el propio personal técnico del Departamento de Presas del Canal de Isabel II. Desde 2006 tanto los resúmenes mensuales como los informes trimestrales se editan y distribuyen en soporte informático.

Modelos

Desde 1990 se utilizó un modelo estadístico de predicción de desplazamientos radiales con resultados suficientemente satisfactorios. Fue revisado en 2006 obteniéndose un notable grado de aproximación entre los desplazamientos reales y los previstos, lo que pone de manifiesto tanto la adecuación del modelo como la estabilidad cronológica de la estructura. Es el que se utiliza actualmente en los análisis diarios.

Desde 1991 se ha venido comprobando la estructura con un modelo de elementos finitos. En 2007 se ha desarrollado, calibrado e implantado un modelo

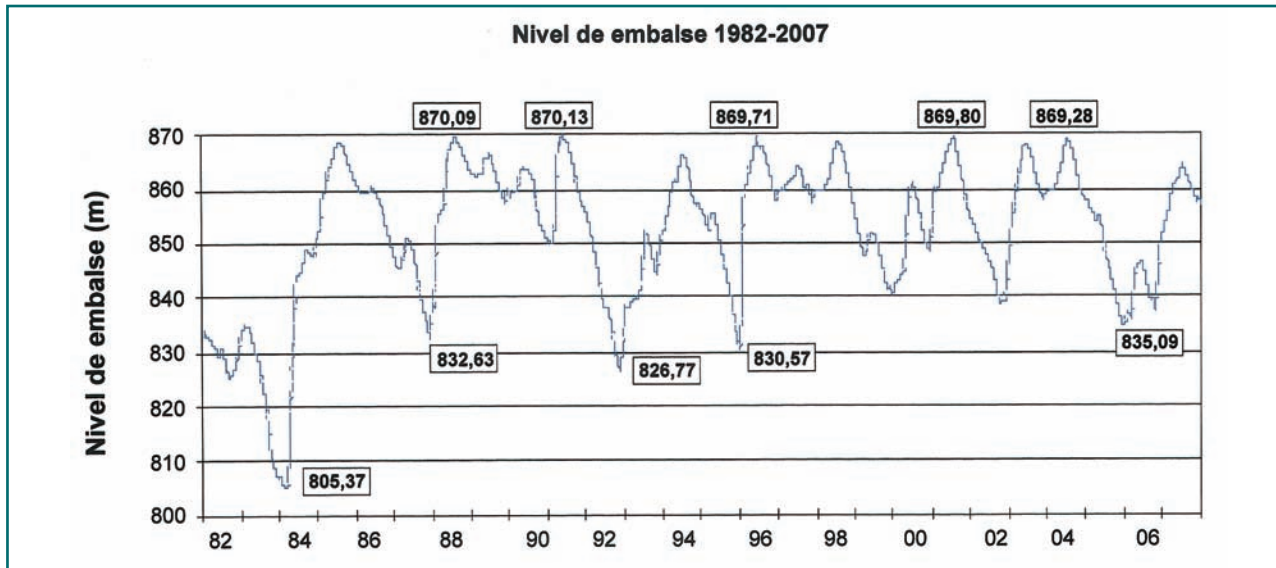


Fig. 5. Evolución del nivel del embalse, 1982 - 2007.

deformacional numérico de elementos finitos, de comportamiento elástico, para la predicción de movimientos en función de la carga hidráulica y de las temperaturas del hormigón proporcionadas por las termorresistencias instaladas en 1996. Como es evidente, el modelo no intenta reproducir la historia tensional de la presa pero sí permite predecir sus movimientos en escenarios que aún no se han dado.

La combinación de ambos modelos permite un control doble de los movimientos absolutos, además el sistema de auscultación disponible proporciona información redundante de cada magnitud controlada. De este modo se hace posible establecer escenarios realistas mediante la combinación de los

valores umbral establecidos para los numerosos dispositivos.

Evolución de los desplazamientos del cuerpo de presa

La Fig. 6 es un ejemplo del comportamiento de la estructura en los últimos 25 años, prácticamente asimilable a un régimen elástico.

Evolución de los movimientos plásticos del cimiento

Los estudios realizados apuntan a que las condiciones del macizo de cimentación no eran las más adecuadas para la construcción de una presa bóve-

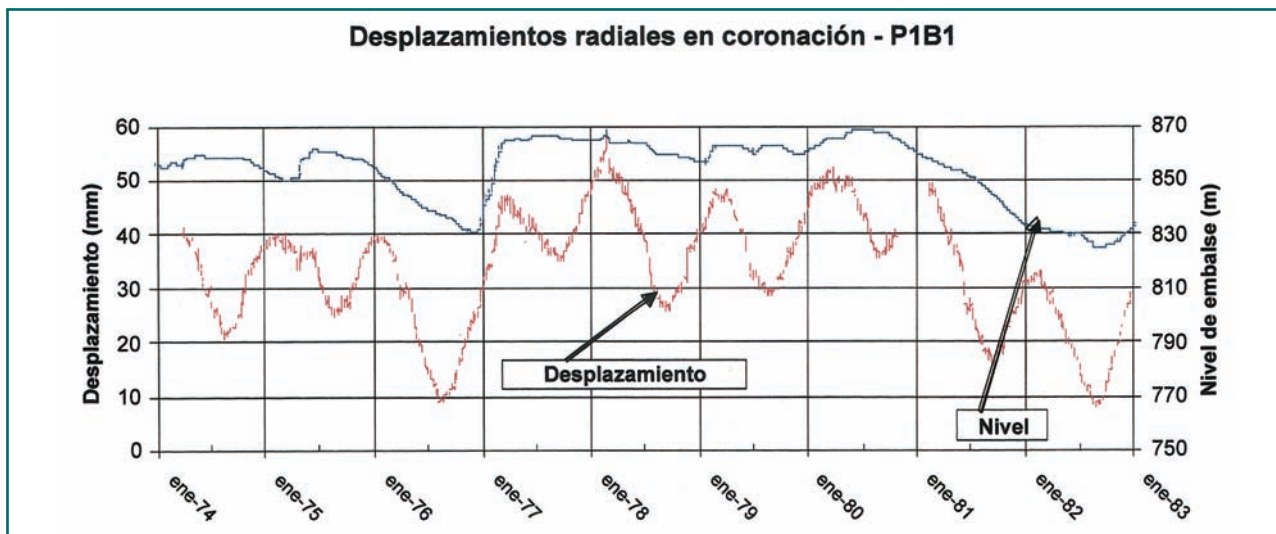
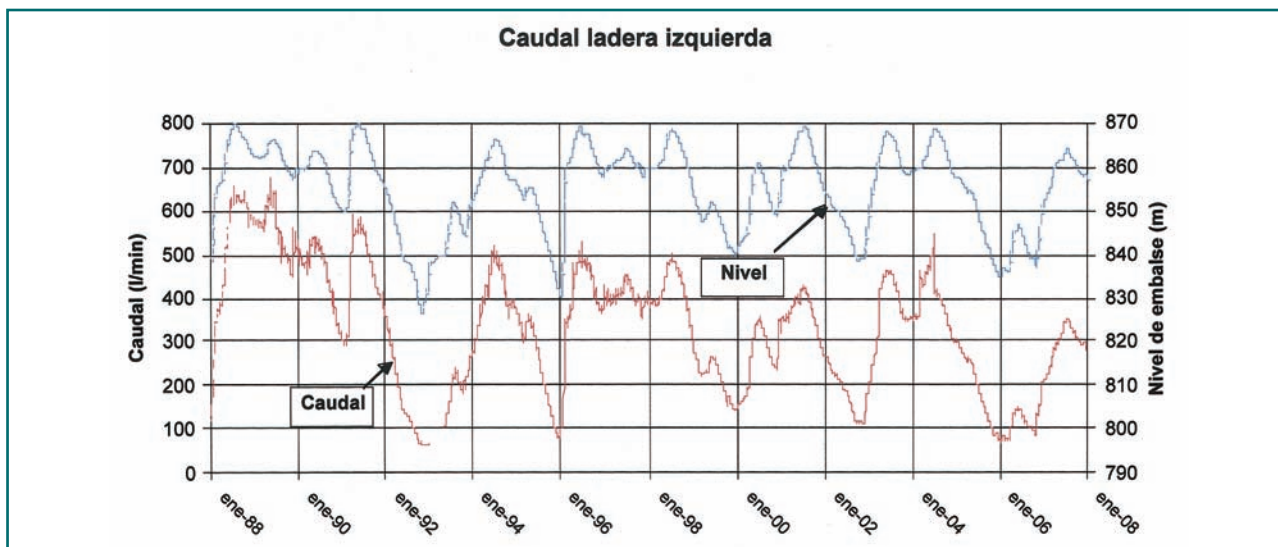


Fig. 6. Desplazamientos radiales en coronación 1983 - 2007.

Fig. 7. Evolución del drenaje en la ladera izquierda, 1988 - 2007.



da. Pero la presa actual, transcurridos 36 años de explotación, ya es otra diferente a la proyectada, por lo que aquella decisión hoy no parece relevante.

De entre el cúmulo de datos disponible se muestran los relativos a los movimientos plásticos de la cimentación que, a nuestro juicio, resultan muy esclarecedores:

El desplazamiento radial medio irreversible (ya que las lecturas corresponden a momentos con nivel de embalse y temperatura semejantes) en el conjunto de la cimentación (6 bases, una por péndulo) en toda la "vida" de la presa (36 años) puede resumirse así:

- 6,82 mm en los 2 primeros años (1971-73)
- 0,40 mm en los 5 siguientes (1974-1978)
- 0,38 mm en los 11 siguientes (1979-1989)
- 0,17 mm en los 18 últimos años (1990-2007)

Queda patente que el comportamiento de la cimentación desde 1990 es asimilable a un régimen elástico.

Debemos reseñar la mayor plasticidad detectada en la ladera izquierda, que se relaciona con la existencia de la viga zócalo en la margen derecha.

Evolución del drenaje

Como complemento a la Fig. 6 de aforos en el cuerpo presa expuesta anteriormente, en la Fig. 7 se muestra la evolución del drenaje de la ladera izquierda, cuyos aforos siguen proporcionalmente la carga del embalse.

Mejora de la Seguridad y de la Explotación

Además de las actuaciones específicas reseñadas más arriba, la aprobación de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (Acuerdo del Consejo de Ministros de 9 de diciembre de 1994) y del Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses (Orden de 12 de marzo de 1996) determinó la ejecución de más trabajos tendentes a mejorar la seguridad de la obra y a aminorar los riesgos aguas abajo.

Normas de Explotación

El Canal de Isabel II, responsable de la explotación y el control de la presa, remitió en 2003 a la Administración Hidráulica las Normas de Explotación, que han sido aprobadas en julio de 2007. Establecen el programa de mantenimiento programado (de los equipos electromecánicos, de las comunicaciones y de la instalación eléctrica), el programa de inspecciones (que detalla sus itinerarios, frecuencias y contenidos), los resguardos estacionales en la gestión de avenidas para mitigar los riesgos a la estructura y los posibles daños aguas abajo, el programa de auscultación de todos los instrumentos y aparatos detectores y de apoyo y el organigrama de explotación.

Plan de Emergencia

El Plan de Emergencia de la presa fue aprobado en octubre de 2004 y actualmente está en fase de im-

plantación. Se ha construido en la margen derecha la sala de emergencia de presa, y se han mejorado notablemente las comunicaciones entre la presa y el CPC. Las comunicaciones consisten en una red mallada de fibra óptica y radioenlaces con un ancho de banda de 34 Mbps, no saturable en situaciones críticas, específicamente aislada del resto de la red de comunicaciones del Canal de Isabel II y por la que se transmiten voz, datos de mantenimiento, variables hidráulicas e hidrológicas, datos de auscultación, etc.

Sistema informático de gestión

Para la implementación de todo lo recogido en las Normas de Explotación y en el Plan de Emergencia se ha diseñado un sistema informático que recoge todo lo referente a la Gestión de la Operación, Mantenimiento y Auscultación (Aplicación GOMA). Gracias a esta aplicación informática los oficiales de presa recopilan en ordenadores portátiles toda la información y variables recogidas en las tareas de mantenimiento y explotación, inspecciones y toma de datos de aparatos de auscultación. Estos datos son transmitidos diariamente a la base de datos central del Canal de Isabel II para su rápida distribución a todos los responsables del equipo de explotación de la presa, lo que facilita y agiliza la toma de decisiones.

Con objeto de realizar una explotación conjunta de toda la cuenca del río Lozoya y del conjunto del sistema de Abastecimiento del Canal de Isabel II, la gestión hidráulica e hidrológica de la presa se realiza en el CPC, ubicado en las Oficinas Centrales, desde donde se telecontrolan todas las variables hidrológicas e hidráulicas (nivel de embalse lluvia, temperatura, posición y final de carrera de los desagües, etc.), con lo que se consigue gestionar las presas de una forma global utilizando los nuevos avances y técnicas. En la toma de decisiones de gestión de cada presa, se tienen en cuenta las capacidades de desagüe del conjunto de presas, las predicciones meteorológicas, los modelos hidrológicos de cada una de las cuencas y el programa de abastecimiento.

La limitación de llenado invernal

Desde que la fisuración se hizo patente en las galerías en febrero de 1978, con nivel de embalse a

cota 868,72 (a sólo 1,28 m de la cota del aliviadero), durante la época invernal, por precaución, sólo se habían vuelto a alcanzar las cotas 864,15 en diciembre, 863,37 en enero y 865,78 en febrero.

La Comisión de Desembalse de la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) resolvió el 3 de diciembre de 1997 una limitación de llenado invernal para la presa, consistente en que "desde diciembre hasta finales de febrero el nivel máximo de explotación de la Presa de El Atazar será la cota 860, permitiéndose en caso de avenidas llegar a la 862, para descender de nuevo a la 860 de forma paulatina".

El "Grupo Técnico de Trabajo para el Estudio de la Presa de El Atazar", constituido en 1999, analizó el comportamiento de la presa después del llenado en la primavera de 2001 y concluyó en su reunión de octubre de dicho año que la presa había respondido adecuadamente a la solicitud. Pero fijó como condiciones previas para proceder al llenado invernal, que se realizase una revisión y análisis general de la presa y del embalse, especialmente de su cimiento, se nombrase al Director de Explotación (nombrado en 2003) y se presentasen las Normas de Explotación y el Plan de Emergencia (ambos documentos fueron remitidos en 2003). En 2005 el Canal de Isabel II remitió a la Confederación Hidrográfica del Tajo el "Estudio de la presa de El Atazar y su cimentación".

En diciembre de 2005 el Grupo de Trabajo resolvió que el Canal de Isabel II presentase un Plan de Puesta en Carga Total. En abril de 2007 se remitió a la Confederación Hidrográfica del Tajo el "Programa de puesta en carga total de la presa de El Atazar", según el cual se alcanzaría la cota 870 en cinco etapas o inviernos en los que se dispongan de recursos hídricos suficientes para realizarlo en el periodo invernal. El Programa fue discutido en mayo de 2007 en el seno de Grupo de Trabajo, que lo consideró apto para llevar a cabo la primera campaña (hasta la cota 863).

El entorno ambiental

Todos los embalses de la Comunidad de Madrid, disponen de un Plan de Ordenación en el que se han definido los usos prohibidos y permitidos en su entorno, con objeto de preservar el frágil equilibrio de sus diferentes ámbitos y, especialmente, la calidad del agua,



Fig. 8. El Atazar
lleno y azul.
Calidad del
agua
embalsada.
(Foto F.
Blázquez –
10/07/2007).

destinada exclusivamente al abastecimiento a la población.

Las aguas del embalse de El Atazar presentan una baja mineralización (conductividades inferiores a 100 μ siemens/cm), alta transparencia (disco de Secchi de hasta 10 m), calificándose el embalse de oligotrófico (clorofila inferior a 5 μ g/l, con valores típicos de 1). Fig. 8.

A pesar de ello, en el verano de 2001 se produjo un fenómeno de proliferación de algas *Planktonix rubescens*. Este tipo de algas solo se encuentran en embalses de elevada calidad del agua, y se reproducen muy rápidamente cuando tienen unas condiciones de temperatura determinadas y concentraciones muy moderadas de fósforo (normalmente en El Atazar la concentración de fósforo es inferior a 5 microgramos/l). Ese año se produjo

un “bloom” de algas rojas que al reproducirse rápidamente afloraron a la superficie como se aprecia en la Fig. 9.

La gestión de la calidad, frente a este problema, consiste en minimizar, en la medida de lo posible, las concentraciones de fósforo (ya son concentraciones bastante reducidas), para lo cual los vertidos de los embalses de aguas arriba se realizan desde las tomas superiores, utilizando dichos embalses como decantadores de fósforo.

En cualquier caso, la aparición de otro bloom de algas rojas no sería un problema grave para el abastecimiento ya que, como se ha comentado, las algas flotan al morir y los caudales derivados para consumo se pueden tomar a profundidades diferentes donde las concentraciones son prácticamente nulas y la calidad del agua es excelente.



Fig.9. Bloom de algas rojas.
(Foto F. Blázquez – 30/05/2001).

Área recreativa

Con el fin de potenciar actividades lúdicas que no estén reñidas con el objetivo de mantener una calidad adecuada del agua se construyó el área recreativa de la “Marina de Cervera” situada en el término municipal de Cervera de Buitrago. En sus instalaciones se pueden practicar tres tipos de deportes: vela (incluido windsurf), piragüismo y remo.

Para ello dispone de plazas de varada y fondeo, la distribución de las 110 plazas de varada se ha efectuado entre usuarios colectivos (48 plazas) y usuarios individuales (62 plazas). En cuanto a las plazas de fondeo, se dispone de 51 utilizadas por 5 usuarios colectivos. En la Fig.10 se puede observar una vista general de las instalaciones.

A modo de conclusiones

Todo apunta a que el comportamiento de la cimentación desde 1990 es asimilable a un régimen elástico, sin que se hayan observado cambios en las propiedades resistentes del cimiento. La asimetría deformacional, derivada de la construcción de la viga zócalo de la margen derecha, tras el acomodo de la estructura ya no se manifiesta. El incremento de la carga hidrostática no induce incrementos diferentes en los movimientos radiales en una y otra margen. La fisura no sufre procesos de apertura ni subpresiones. A pesar de que está asentada en terreno difícil, su comportamiento al cabo de 36 años de explotación no se demuestra comprometido.

La actitud de los Técnicos responsables del Canal de Isabel II con la presa de El Atazar ha sido siempre



Fig.10. Marina de Cervera. (Foto Áreas Recreativas – 04/05/2005).

la análoga a la de un médico de cabecera: vigilar atentamente su comportamiento, auscultar sus síntomas, proporcionarle cuidados diarios y notables mejoras en sus elementos de control, mantener con exquisitez las instalaciones, propiciar los avances en el conocimiento de la realidad, reunir a los mayores expertos en las diversas materias, investigar constantemente con el mayor rigor del que hemos sido capaces, tratar de ser imparciales cuando el problema era el debate, crecer ante las dificultades, evitar soluciones drásticas y, en definitiva, proteger la “vida” de una gran presa que viene cumpliendo satisfactoriamente la función para la que fue construida hace más de 36 años.

Agradecimientos

Los autores se encuentran en deuda con numerosos compañeros del Canal de Isabel II con los que han

compartido a lo largo de tantos años y comparten en la actualidad, ocupaciones y preocupaciones en relación con la presa. Con estas líneas queremos dejar constancia de nuestro reconocimiento.

A José de Castro, que nos transmitió su serenidad, infundió confianza en nuestro trabajo y compartió “codo con codo” los problemas y cuidados de la presa.

A Bernardo López-Camacho, que ha colaborado estrechamente con los autores aportando su ingenio y sentido común.

A Vicente Gaitán, que ha promovido y materializado la aplicación informática Gestión de la Operación, Mantenimiento y Auscultación (GOMA) y que, con la colaboración de Diego Pérez-Cecilia y Tomas Labrador, se ocupa a diario del buen estado de las 16 grandes presas gestionadas por el Canal de Isabel II.

A los numerosos técnicos del Canal de Isabel II que participaron en el “día a día” de la conservación de



Fig. 11.
Vertiendo de
noche. Una
de las fotos
más
conocidas
de la presa.
(Foto M.A.
Gómez-
07/1988).

la presa en años anteriores, entre los que pueden citarse a Jesús Masip y Gerardo Díaz, así como a E. Vicente Muñoz y David Galán que, con sus conocimientos y empuje representan la savia nueva en el control y seguridad de la presa.

A los mandos intermedios y oficiales de la División de Explotación de Presas, que han realizado incan-

sablemente todas las tareas encomendadas de operación y mantenimiento.

Y al capataz de la presa Pablo Marín Herranz, que ha dedicado toda su vida a ella desde que participó en su construcción, conoce cada uno de sus mínimos detalles y constituye un auténtico archivo viviente de la historia de su comportamiento y vicisitudes. ♦

Referencias:

- 1. URBISTONDO, R y YGES L. "Presa de El Atazar, tratamiento de fisuras del paramento de aguas arriba", ROP nº 3202, Abril – Mayo, pp. 257-268.
- 2. Directriz Básica de Planificación de Protec-

- ción Civil ante el riesgo de inundaciones (Acuerdo del Consejo de Ministros de 9 de diciembre de 1994).
- 3. Reglamento Técnico sobre seguridad de Presas y Embalses (Orden de 12 de marzo de 1994)

- 4.XVIII Congreso Internacional de Grandes Presas. Durban Noviembre 1994. Q68 - R29. BLAZQUEZ PRIETO F, GARCÍA PÉREZ, JA. "Experiences in the applications of new technologies to the El Atazar Dam."