

EL COMPORTAMIENTO DE LA PRESA DE BOVEDA DE SUSQUEDA DURANTE SU SEGUNDO DECENIO: 1981-1990

Arturo Rebollo, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, (EEICCPM);
Arquitecto, (ETSAB); Lcdo. en C.C. Geológicas, (UB);
Graduado Superior en Ingeniería Geológica, (UPC-UB).

«El toreo no es graciosa huida sino apasionada entrega».

José Alameda

Se quiera aceptar o no se quiera aceptar, la realidad es que la Presa de Susqueda es la única presa española que ha expuesto a la luz pública todos los pormenores de su Proyecto, todos los pormenores de su Construcción, y lo que es más insólito, todos los pormenores de su Comportamiento; con el presente trabajo se completan los resultados y observaciones de su auscultación durante los primeros 25 años de su puesta en servicio.

¿Por qué no se dispone de literatura técnica que incluya esos pormenores del Proyecto, la Construcción y el Comportamiento de las Presas más significativas? Deben ser muy poderosas y complejas las razones para permanecer inexplicablemente asistidos de esta desinformación. Aunque puede traslucirse una disculpa muy comprensible. Recopilar miles de datos, ordenarlos, proceder a su síntesis, dibujarlos, embarcarse en su análisis y entablar entre ellos una reflexión seria y una crítica rigurosa, da mucho, pero que mucho trabajo.

1. Antecedentes. Interés de este trabajo

Hidroeléctrica de Cataluña, S.A. comenzó a hormigonar esta obra en enero de 1965, concluyéndose tres años más tarde. En este período se procedió a la implantación de los sistemas de auscultación para el control del comportamiento de la estructura y macizo rocoso, por lo que desde el inicio de la construcción se contó con un dilatado caudal de información sobre dicho comportamiento.

Toda esta documentación fue, año tras año, debidamente analizada y rigurosamente ordenada; sin embargo, en 1986, al cabo de veinte años de acumular datos se tomó conciencia de la pérdida de perspectiva crítica y agilidad analítica en la interpretación de toda aquella documentación. Esto

planteó la necesidad de organizar un estudio síntesis que abarcara un período de tiempo suficientemente amplio sobre el que se pudiera emplazar con mayor exactitud y claridad la situación y tendencias del comportamiento de la Presa.

El período decenal estaba perfectamente en concordancia con aquellos planteamientos, ya que durante ese tiempo se podían observar en la Presa, con toda probabilidad, ciclos completos de carga-descarga que propiciarían el análisis de los intervalos globales para los máximos y mínimos de sus desplazamientos y sobre todo la posibilidad de evaluar las deformaciones remanentes en la estructura y cimientó.

Con esta idea se redactó, en aquella fecha, el primer Estudio-síntesis decenal sobre el comportamiento de la Presa, abarcando todas las obser-

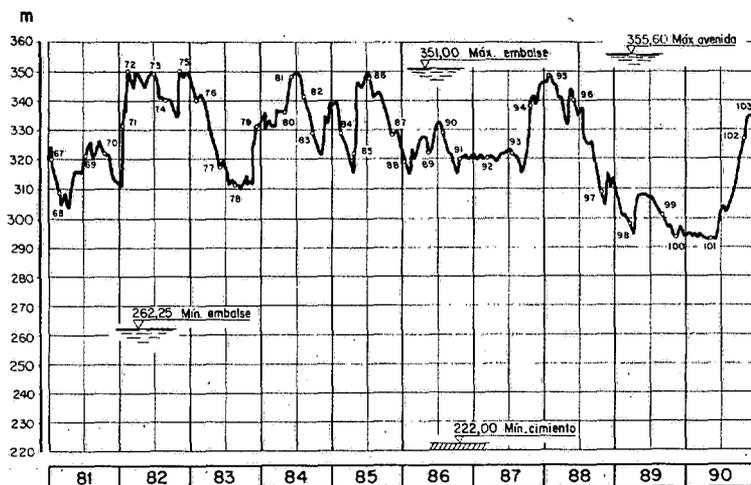


Figura 1. Curva de embalse. La numeración se corresponde con las fechas en que se han realizado las mediciones más características de los desplazamientos generales de la estructura y macizo rocoso.

vaciones realizadas desde la propia construcción de la obra hasta el año 1980.

Con este precedente surge, en consecuencia, la redacción de este segundo Estudio decenal sobre el comportamiento de la Presa, con idénticas pautas, aunque revisadas e incluso ampliadas. Por ello, después de estos veinticinco años de observaciones, desde 1967, se ha puesto de manifiesto el interés que ha supuesto la redacción de estos estudios decenales, no sólo por las enseñanzas que de ellos se han extraído, sino por las múltiples ventajas que presenta su redacción, entre las cuales cabe destacar las siguientes:

■ **Primera.** Suponen la posibilidad de cualquier consulta inmediata sobre datos, conceptos o acontecimientos en la vida estructural de la presa.

■ **Segunda.** Sitúan cualquier fenómeno estructural en la perspectiva real de su evolución, enmarcando así un análisis riguroso de sus tendencias y por lo tanto permitiendo adoptar decisiones adecuadas para su prevención o corrección, lo que redundará no sólo en una mayor seguridad para la obra, sino también en una mayor garantía económica para su explotación.

■ **Tercera.** Desembocan en un mayor conocimiento técnico del funcionamiento estructural de la Presa, especialmente por parte de los integrantes del equipo que lleva a cabo su auscultación. Ventaja ésta por sí sola para reclamar la elaboración de tales estudios.

■ **Cuarta.** Van a suponer para todos aquellos técnicos que en el futuro hayan de relevar a los que actualmente tienen la responsabilidad del control de esta obra, una inestimable ayuda para asumir su cometido y un decisivo estímulo para proseguir estos trabajos.

En vista de lo expuesto, ¿no sería deseable que la redacción de estos estudios síntesis decenales fuera contemplada en la Instrucción de Grandes Presas? y el Ingeniero responsable de la auscultación de una Presa ¿no debería empeñar su sentir profesional en llevar a cabo sistemáticamente este trabajo?; ¿es que acaso no es de importan-

cia capital para las Grandes Presas españolas que puedan compararse entre sí los resultados obtenidos por la auscultación de las presas de similares características?

2. Organización del control estructural de la presa

2.1. Personal técnico

Se ha reducido a cuatro el número de operarios encargados de la realización de las medidas; de este equipo ha seguido haciéndose cargo el técnico en auscultación J. López-Arenas. Los trabajos geodésicos y topográficos, se han contratado, en los últimos años, a la empresa Civiltec, S.A.

2.2. Medidas y observaciones

La toma de datos ha estado dirigida sobre cuatro objetivos básicos.

El primero se refiere a las acciones o cargas que actúan o pueden actuar sobre la estructura y el macizo rocoso. El segundo se centra en el tema de las tensiones en el hormigón. El tercero se proyecta sobre los desplazamientos que se presentan en la estructura y en la roca de apoyo. El cuarto va enfocado hacia el control de la estabilidad de la ladera de la margen derecha, que si bien no implica un efecto directo sobre la estructura de la presa, su hipotética inestabilidad podría significar un riesgo para las torres de la toma de agua y por tanto para la explotación de la central eléctrica.

Es preciso resaltar que todas las medidas y observaciones que se realizan para desarrollar el control de estos cuatro objetivos, han de realizarse por los operarios encargados de la auscultación de forma personal y directa, acudiendo hasta el punto donde se halle ubicado el aparato de medida o la base de observación, con objeto de que necesariamente sea recorrido y visitado con asiduidad y frecuencia todo el entorno interior y exterior de la Presa. Es decir, se ha desestimado, como norma, toda posibilidad de centralización o informatización de las medidas a distancia.

2.3. Archivos técnicos

Cuando se realizó el proyecto de esta obra, allá por los años 1961-1962, y luego posteriormente mientras se realizó la construcción, se generó una profusa y heterogénea documentación que fue preciso recogerla por separado en dos apartados distintos; el primero lo constituyó el «Archivo técnico de Proyecto»; el segundo el «Archivo técnico de Construcción». En ellos están recogidos todos los pormenores de la gestación de esta obra.

Pues bien, de forma análoga, cuando ya durante la propia construcción se empezaron a obtener datos sobre el control estructural de la presa, y luego posteriormente a lo largo de los años se continuaron acumulando nuevos datos sobre dicho control, fue necesario organizar un tercer apartado con toda esta dilatada documentación, el denominado «Archivo técnico de Auscultación».

2.4. Estudios-síntesis anuales

Todo este cúmulo de datos sobre la auscultación del complejo presa-terreno, cuyo fatal destino se resumía en engrosar, por acumulación ordenada y progresiva, las estanterías del Archivo Técnico de auscultación, planteó desde un principio la necesidad de realizar con ellos una síntesis que tuviera carácter no sólo valorativo o cuantitativo sino fundamentalmente interpretativo y crítico. Esto se resolvía con la idea de redactar un Estudio-síntesis de carácter anual, que si bien no podía responder a ningún ciclo de la carga hidrostática, coincidía en cambio, con toda seguridad, con el ciclo térmico completo de evolución ambiental. Con esta intención se redactó en 1969 el primero de estos Estudios, en el que se recogieron además todos los pormenores del comportamiento estructural de la obra durante la construcción. Siguiendo aquella pauta en años sucesivos, se han venido realizando sistemáticamente los respectivos Estudios síntesis hasta 1990, por lo que hasta esa fecha se cuenta con 22 Estudios de carácter anual, donde ha quedado rigurosamente plasmada la vida estructural de esta Presa.

3. Acciones sobre la estructura y el macizo de apoyo

3.1. Peso propio

Se comprende que actúa siempre invariablemente unido al resto de las acciones que inciden sobre la Presa. Sus efectos quedan reflejados, esencialmente, en los desplazamientos según el eje vertical, que se detallarán más adelante, y que, naturalmente, vendrán originados en parte por los asentamientos de la roca de cimentación y en parte por la fluencia del propio hormigón, lo que quiere decir que dichos desplazamientos tienen carácter irreversible.

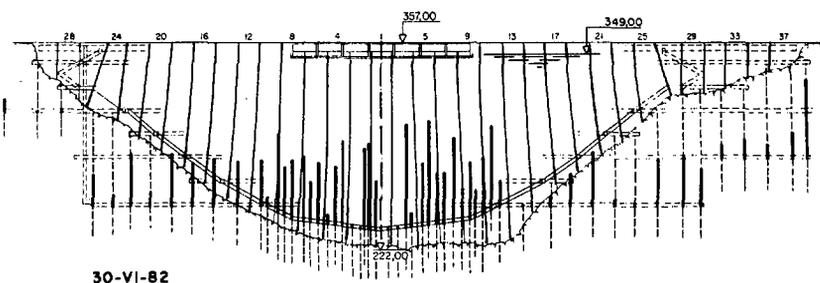
3.2. Carga hidrostática

3.2.1. La evolución del embalse

En la fig. 1 se representa la curva de embalse correspondiente a este decenio. Sobre ella van numeradas las lecturas más características de las mediciones globales de los desplazamientos de la estructura y macizo rocoso.

3.2.2. Las subpresiones. Revisión de las pantallas de drenaje

En los comienzos del decenio las subpresiones en la zona central de la Presa ya presentaban valores máximos del orden del 50 % de la carga del embalse, fig. 2. En el transcurso de los siguientes años se produjeron dos tendencias en los valores de aquellas subpresiones; mientras que unos valores iban aumentando progresivamente hasta alcanzar aproximadamente los 2/3 de la carga del embalse, otros valores prácticamente se extinguían, sin duda por la presencia de con-



30-VI-82

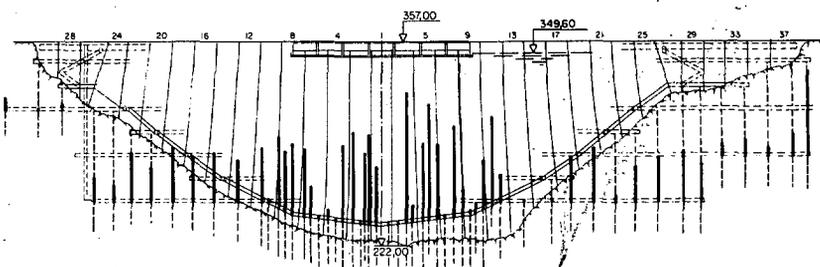
creciones calcíticas en los taladros de los drenes, lo que puede comprobarse en la fig. 3, donde se representan las alturas piezométricas a principios de 1988 con el embalse casi a su nivel máximo.

Estas circunstancias aconsejaron la revisión y limpieza de las pantallas de drenaje y control de movimientos, realizándose estos trabajos, a partir del segundo trimestre de 1989 hasta principios del siguiente año, por I.F.C. Española, S.A. Hay que señalar que la última actuación sobre estas pantallas se realizó en 1973. Estos trabajos de revisión y limpieza consistieron fundamentalmente en las siguientes operaciones:

- 1) Eliminación del emboquillado de todos los taladros que conformaban las referidas pantallas. Este emboquillado consistía en tubos de acero embutidos en el hormigón, tubos que, por oxidación, habían quedado prácticamente inservibles para el acoplamiento de los manómetros.
- 2) Sustitución de dicho emboquillado por otro de P.V.C., Ø100, sellado a la fábrica de hormigón. Sobre este entubado de P.V.C. se acopló una pieza del mismo material para permitir no sólo el rosado del manómetro sino también las futuras limpiezas de los taladros.
- 3) La reperfusión de la caña de todos los taladros para eliminar en ellos todas las concreciones de carbonato cálcico. En algunas ocasiones estas concreciones obstruían totalmente el dren correspondiente.
- 4) Sustitución de todos los manómetros de la pantalla de drenaje por otros de acero inoxidable.

Figura 2. Alturas piezométricas en el interior de la roca de cimentación, con el embalse a la cota 349 m., obtenidas el 30 de junio de 1982.

Figura 3. Alturas piezométricas en el interior de la roca de cimentación, con el embalse a la cota 349.6 m., obtenidas el 22 de enero de 1988. Puede observarse, con relación a la figura anterior, un aumento substancial en las mismas sobre los bloques 20, 2, 3, 17 y 23; mientras que dichas alturas decaen radicalmente en algunos drenes de los bloques 6, 4, 7 y 9, sin duda por su obturación, a causa de las concreciones calcíticas.



22-I-88

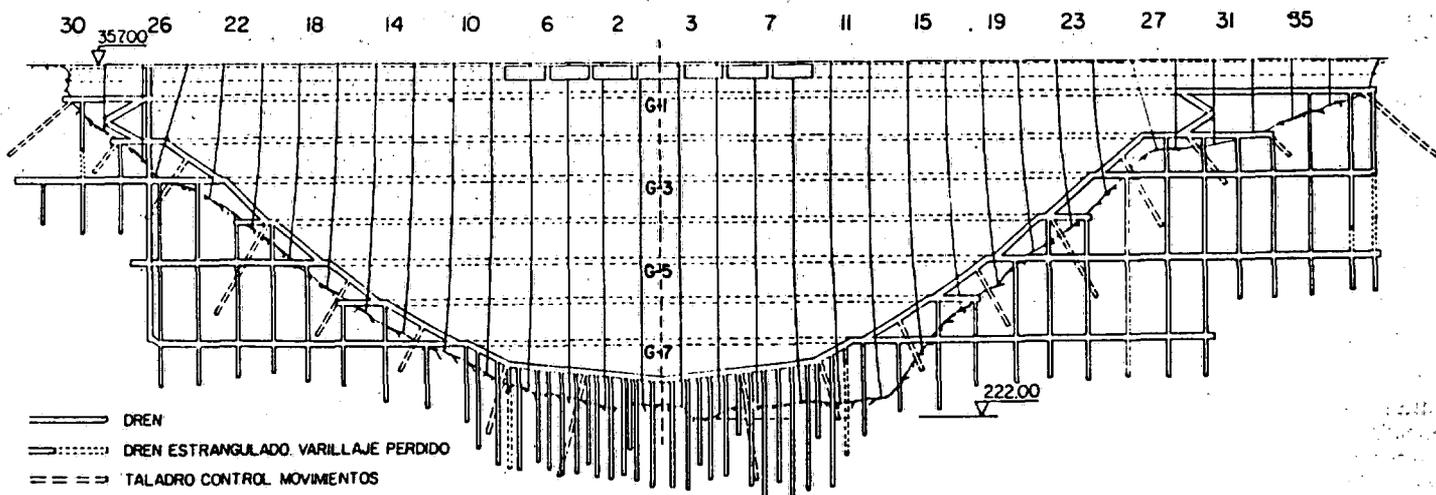


Figura 4. Desarrollo actualizado, en diciembre de 1989, de las pantallas de drenaje y de control de movimientos, después de concluidos los trabajos de su limpieza y revisión.

En la fig. 5 se representan las alturas piezométricas, sobre la pantalla de drenajes, obtenidas a finales de 1990; es patente el efecto favorable de los anteriores trabajos.

3.2.3. Las filtraciones y drenajes

Los aforos de los caudales recogidos en los taladros de las pantallas de drenaje y control de movimientos han arrojado unos valores normales, que se representan en la fig. 6. Su evolución está en total concordancia con la curva de embalse.

3.3. Efecto térmico

3.3.1. La temperatura ambiente

Sobre la margen izquierda de la Presa se halla instalada una estación meteorológica, enlazada a la red catalana, que suministra datos diariamente.

3.3.2. La temperatura del agua

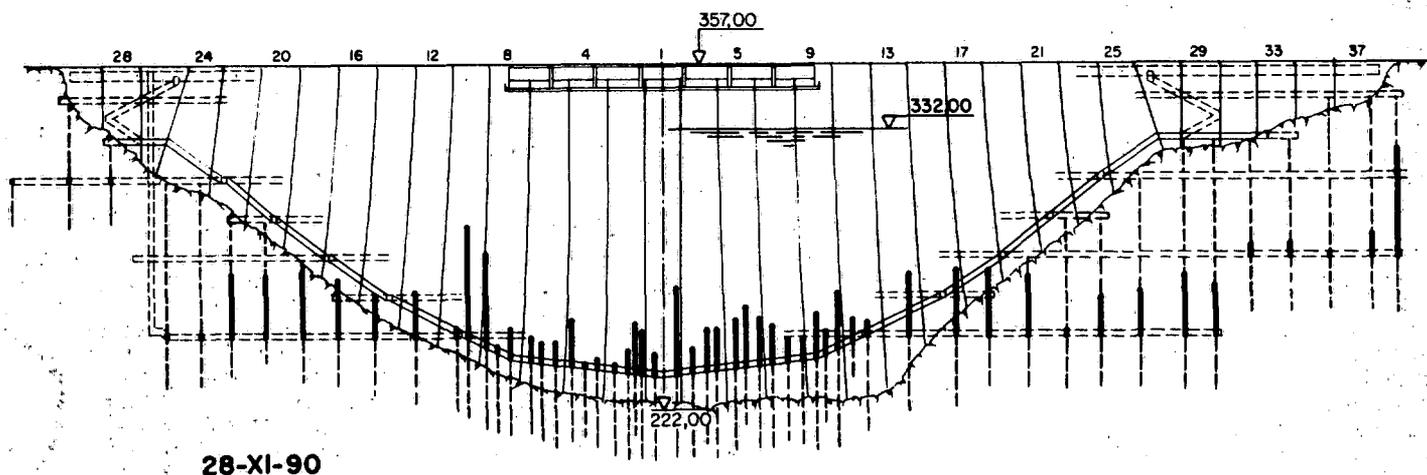
El agua del embalse, al estar en contacto con el paramento de aguas arriba, transmite una varia-

ción al gradiente térmico del hormigón en el interior de su masa; factor por lo tanto que hay que tener en cuenta a la hora de analizar con detalle el comportamiento de la estructura debido a los cambios de temperatura.

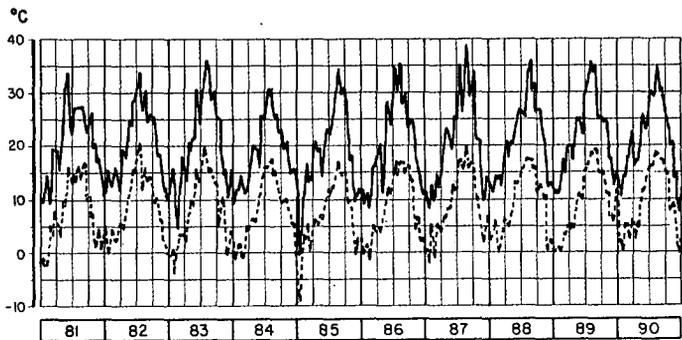
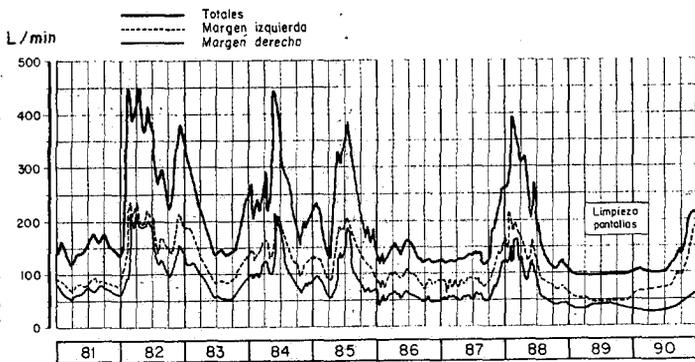
Para dar una idea de esta influencia, en las curvas de la fig. 8 se representa la evolución de la temperatura en diferentes puntos situados tan sólo a 75 centímetros de dicho paramento y a diferentes cotas. Es notable la repercusión en la zona del paramento por encima de la cota 300 m., singularmente en el año 1989, al recibir con mayor intensidad, que en cotas inferiores, la influencia del asoleo, dada la orientación de este paramento hacia el mediodía.

3.3.3. La temperatura del hormigón

El control de la temperatura en el interior de la masa de hormigón se organizó con cierta amplitud, fundamentalmente por no haber dispuesto sistema de refrigeración durante su puesta en obra. También fue preciso tener en cuenta que se había previsto un embalse parcial, hasta la cota 300 m., para poner en marcha la central hidro-



28-XI-90



léctrica, pero sin inyectar las juntas, en espera de concluir la construcción y contar con una situación térmica favorable.

En la fig. 9 se representa la situación y colocación de los diferentes grupos de termómetros eléctricos en el cuerpo de la Presa, cuyo número sobrepasa los 400.

A partir de la inyección de las juntas, en 1968, la Presa entró de lleno en un período de estabilización térmica, influido exclusivamente por los ciclos de temperatura ambiental invierno-verano y por la eventual presencia del agua del embalse. Las posibilidades de combinación de estas dos acciones resultan sumamente variadas y complejas, por lo que también resultarán muy diversificados sus correspondientes efectos en la estructura.

En la actuación de estos ciclos térmicos se advierte claramente el fenómeno de la inercia térmica, por lo que los máximos y mínimos dentro del cuerpo de la Presa no coinciden con los correspondientes de las temperaturas ambientales, sino que están diferidos respecto a ellos; en general vienen a coincidir con el final del invierno y con el final del verano. Por ello se han tomado las fechas de «1 de abril» y de «1 de octubre» como más características de los estados térmicos prototípicos correspondientes a «invierno» y «verano», respectivamente.

3.4. Sismicidad

La Presa se encuentra ubicada en la denominada Zona Olotina, región sísmica de especial interés dentro de la Península Ibérica; la configuración de su estructura geológica, aún sujeta a particulares acomodaciones tectónicas, la convierten en una fuente continua de respuestas sísmicas. En ese sentido resulta obligado recordar que en los años 1427 y 1428 las series de terremotos, acompañados incluso de vulcanismo, provocaron la total destrucción de numerosos pueblos de la comarca, ocasionando centenares de víctimas; hechos sobre los cuales hoy día no se ha reflexionado lo suficiente.

La vigilancia sísmica de la Presa cubre dos aspectos: El control de la sismicidad local y el control de los efectos dinámicos de esta sismicidad sobre la estructura-roca de cimentación. La sismicidad se registra en un sismógrafo instalado a unos 300 m. de la Presa, en la margen izquierda; los efectos dinámicos quedan detectados por

cuatro acelerógrafos sincronizados, de funcionamiento simultáneo, situados en el cuerpo y cimiento de la estructura. En la fig. 14 se indica la situación de estas unidades de registro.

El equipo de acelerógrafos ha sido totalmente renovado en 1990, habiendo realizado su instalación Ofiteco, S.A. Además de los datos correspondientes a las direcciones e intensidades de las aceleraciones sísmicas, estos aparatos pueden registrar, ante una eventual acción sísmica, los diagramas de los desplazamientos de los puntos de la estructura y cimiento donde se hallan instalados, en las tres direcciones del espacio.

4. Tensiones en el hormigón

4.1. Datos de tensímetros y extensómetros. Su utilidad

Los resultados obtenidos por los 9 tensímetros instalados, que vienen en función del módulo de elasticidad del hormigón, han sido extraordinariamente dispersos, sin la menor posibilidad de análisis. En la fig. 17 se recuerda su situación en el cuerpo de la Presa.

A su vez se instalaron algo más de 200 extensómetros repartidos por todo el cuerpo de la bóveda, situados muy próximos a los paramentos, 70-80 cm., aunque concentrados sobre el con-

A la izquierda. Figura 6. Aforos totales de los caudales, en litros/minuto, recogidos por las pantallas de drenaje y de control de movimientos. A la derecha. Figura 7: Evolución de los valores medios de las temperaturas ambiente diarias, máxima y mínima, obtenidos según la media de los diez últimos días, incluido el propio.

Figura 8. Influencia del agua del embalse sobre la temperatura del hormigón en distintos puntos situados a diferentes cotas y a 75 cm. del paramento de aguas arriba. Puede observarse cómo en el año 1989, debido a los bajos niveles del embalse, se agudiza el salto térmico, desde abril hasta octubre, en la zona superior del paramento de aguas arriba.

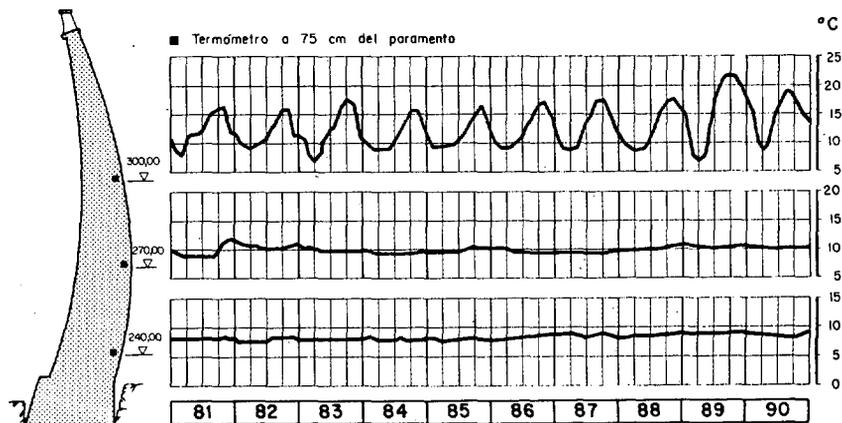


Figura 9. Distribución de los termómetros eléctricos en el cuerpo de la Presa. Esquemas puntuales de colocación.

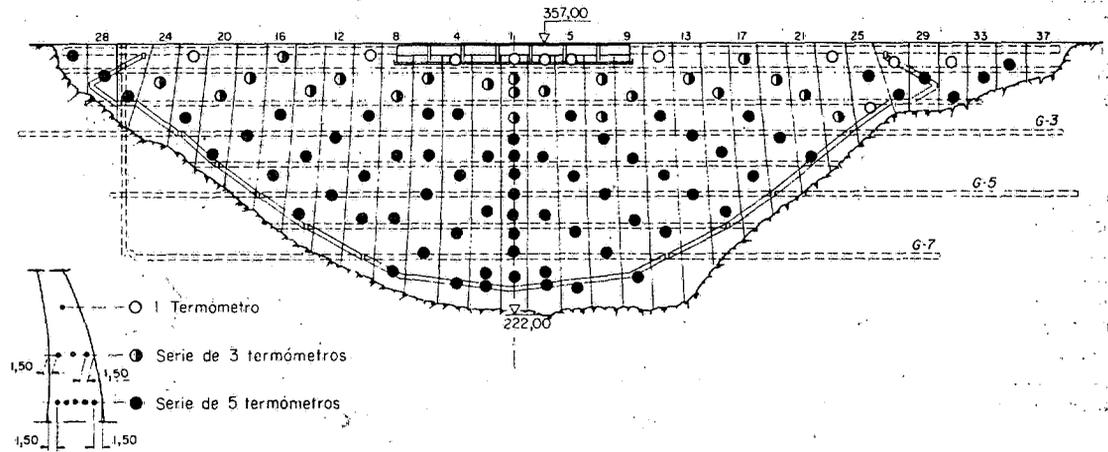


Figura 10. Temperaturas medias del hormigón en °C, el 1 de abril de 1988, con el embalse a la cota 341 m. Isotérmicas correspondientes a los bloques 20, 10, 1, 11 y 21. Estado térmico prototípico correspondiente a «invierno lleno».

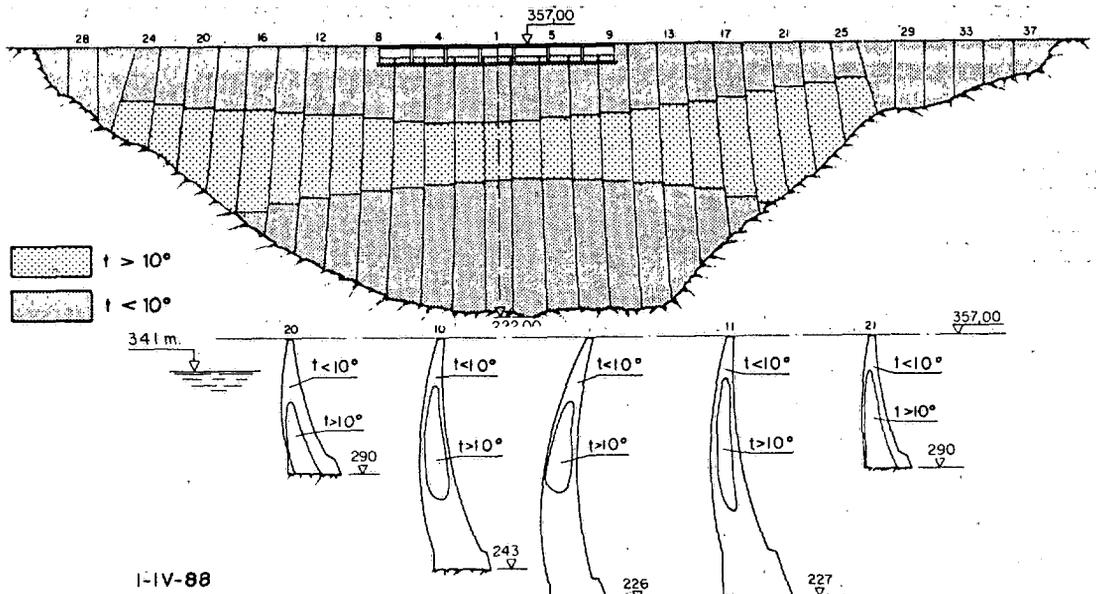
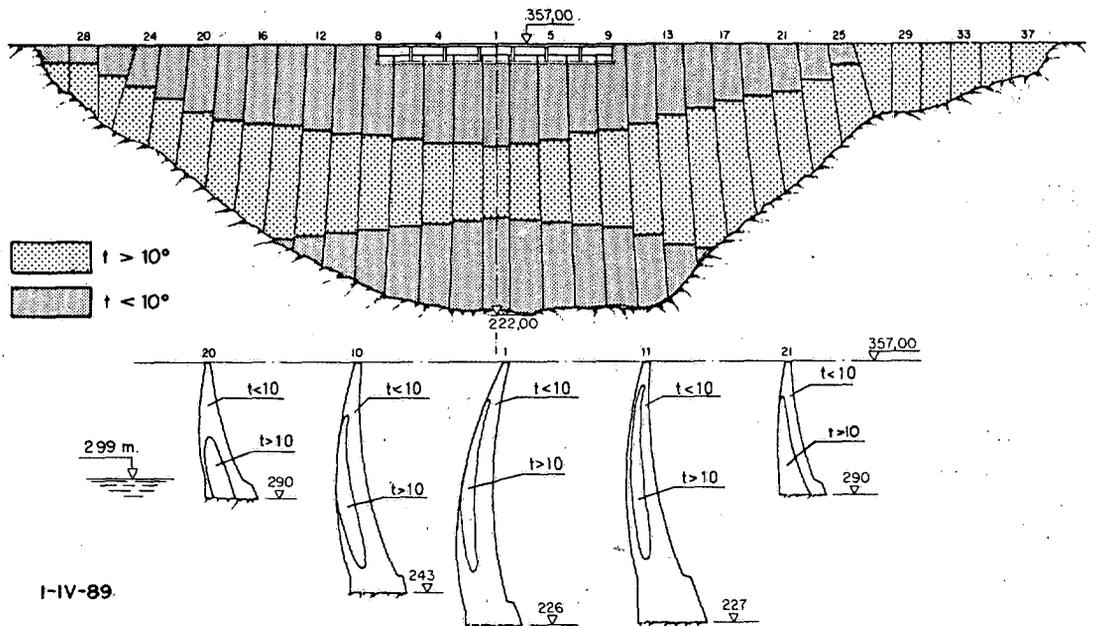


Figura 11. Temperaturas medias del hormigón en °C, el 1 de abril de 1989, con el embalse a la cota 299 m. Isotérmicas correspondientes a los bloques 20, 10, 1, 11 y 21. Estado térmico prototípico correspondiente a «invierno vacío». No se aprecia diferencia substancial con el estado «invierno lleno» representado en la fig. 10.



torno de la cimentación. Se colocaron aislados; en grupos de dos, es decir horizontal y vertical; o en rosetas de cuatro, o sea horizontal-vertical y a 45°. En todos los puntos de ubicación se acompañó cada grupo de un extensómetro corrector o de tensión nula. Su distribución se indica en la fig. 18.

Estos extensómetros suministran deformaciones unitarias; a partir de ellas se deducen las tensiones en paramentos a través de las ecuaciones que aporta la teoría de la elasticidad. Sin embargo previamente ha sido necesario efectuar en las medidas que suministran dichos aparatos la corrección por temperatura; ha sido también necesario, en el caso de la disposición en rosetas, ajustar los resultados de aquellas deformaciones de tal forma que la suma de las deformaciones en

las dos direcciones ortogonales fuera invariante; ha sido preciso introducir la tensión de corrección calculada a partir de los datos suministrados por los extensómetros de tensión nula; ha sido preciso corregir el efecto de la fluencia; ha sido necesario introducir el módulo de Poisson; y en fin ha sido también necesario introducir en el proceso de cálculo el hipotético valor del módulo de elasticidad, teniendo en cuenta además su variación media a lo largo del tiempo.

Al reflexionar sobre las diversas etapas de que constan los procesos del análisis de estas tensiones, y al considerar los intervalos de error en que se mueven la diversidad de parámetros y funciones que en ellos intervienen, se deduce que los valores que se obtienen para dichas tensiones pueden presentar un elevado grado de disper-

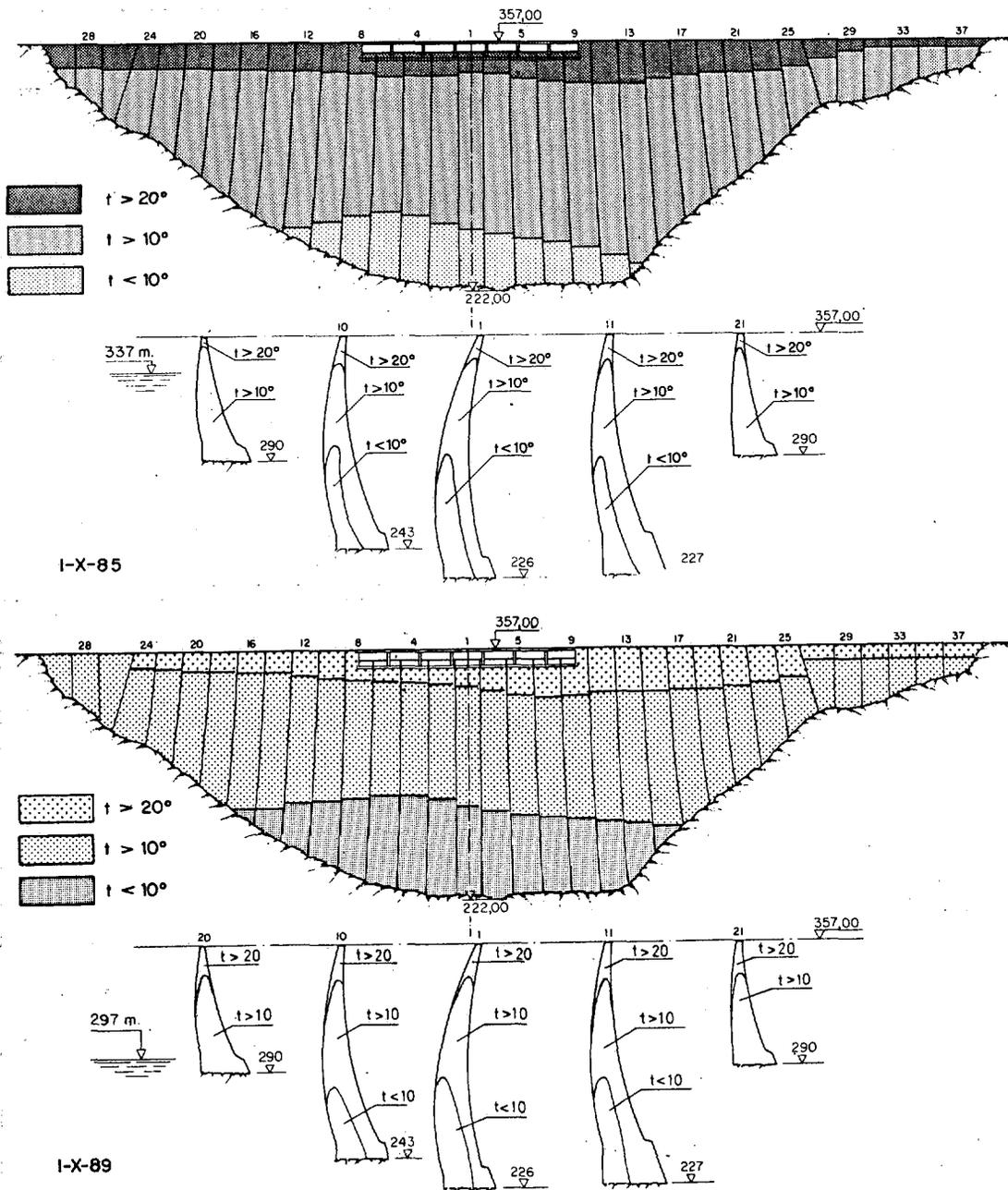
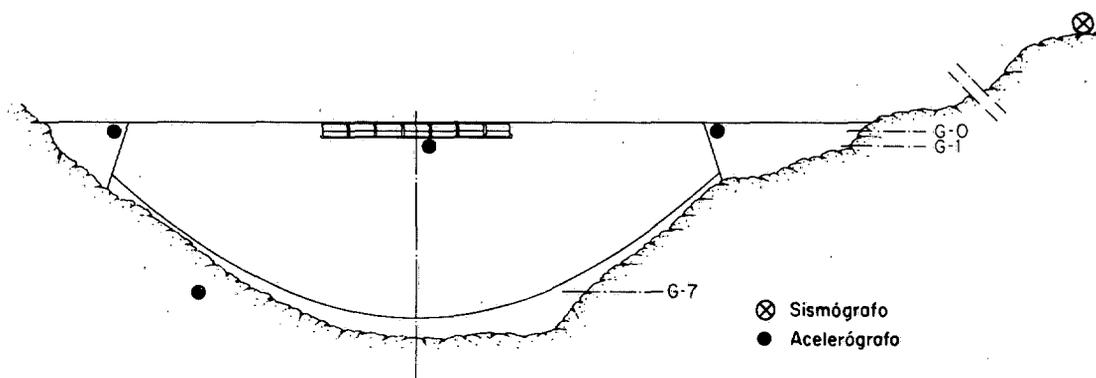


Figura 12. Temperaturas medias del hormigón en °C, el 1 de octubre de 1985, con el embalse a la cota 337 m. Isotérmicas correspondientes a los bloques 20, 10, 1, 11 y 21. Estado térmico prototípico correspondiente a «verano lleno».

Figura 13. Temperaturas medias del hormigón en °C, el 1 de octubre de 1989, con el embalse a la cota 297 m. Isotérmicas correspondientes a los bloques 20, 10, 1, 11 y 21. Estado térmico prototípico correspondiente a «verano vacío». Tampoco se aprecia una diferencia substancial con el estado «verano lleno» de la fig. 12. Sin embargo el paso de «invierno» a «verano» supone cada año un cambio radical en el estado térmico de la estructura.

Figura 14. Situación de las diferentes unidades de registro para la vigilancia sísmica de la Presa. Los acelerógrafos pueden suministrar, además, los diagramas de los desplazamientos, en las tres direcciones del espacio, de los puntos de la estructura y macizo rocoso donde se hallan instalados.



sión, por lo que su interpretación puede llegar a ocasionar notables equívocos sobre el comportamiento de la estructura.

Como, por otro lado, puede suceder que se presente bien en la estructura, o bien en el macizo rocoso, un hipotético principio de fisuración e incluso de rotura, no lo detectarán bajo ningún aspecto ni la contemplación de los valores de las tensiones ni la de su variación temporal, debido a que la consecuente redistribución tensional en todo el cuerpo de la Presa no alterará aquellos valores, es decir se seguirá produciendo un estado tensional correcto. De ahí que el análisis de los valores de estas tensiones ya no podrá tomarse como indicador en la toma de las graves decisiones que puede plantear la responsabilidad de una auscultación como la que aquí se realiza.

Es por todo ello, por lo que, una vez transcurridos los 25 primeros años de la puesta en carga de esta obra, hayan quedado relegados estos análisis al capítulo de la inoperancia.

Es por todas estas razones por las que la auscultación de esta Presa se haya concentrado fundamentalmente, en primer lugar sobre el seguimiento de las acciones exteriores e interiores que han incidido sobre la estructura y macizo de apoyo, y en segundo lugar sobre los consiguientes desplazamientos que aquellas acciones originan, como el único indicador verdaderamente objetivo del comportamiento de la obra. Añadiendo, por

supuesto, a estas consideraciones el inseparable hecho de la observación directa y personal, tanto de la estructura como del macizo rocoso.

5 Desplazamientos en la estructura y en el macizo rocoso

5.1. Aberturas en las juntas de construcción

Se han seguido controlando a través de medidores eléctricos, instalados sobre la zona media de la superficie de las juntas; y por comparadores mecánicos que miden la extensión de bases elongamétricas colocadas sobre las propias juntas.

En la fig. 19 se recogen las aberturas de las juntas hasta el momento de la inyección en 1968, obtenidas con los 48 medidores eléctricos instalados desde un principio en el cuerpo de la Presa. En la fig. 20 se indican los incrementos de dichas aberturas desde la inyección de las juntas hasta diciembre de 1989; y en la fig. 21 los incrementos también de dichas aberturas desde aquella inyección hasta finales de 1990, medidas en ambos casos con medidores eléctricos.

Los valores contenidos en estos tres gráficos suscitan las siguientes observaciones: En primer lugar que desde 1968 hasta los años 1989-90

Figura 15. Histograma de los registros sísmicos en Susqueda obtenidos durante 1981-1990. A la derecha. Figura 16. Frecuencias de la distribución espacial de los registros sísmicos en Susqueda obtenidos durante 1981-1990.

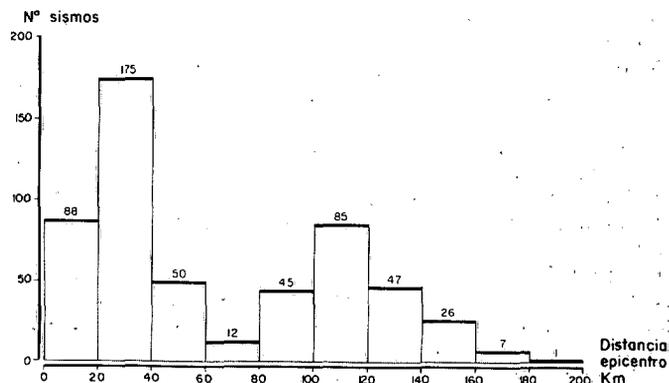
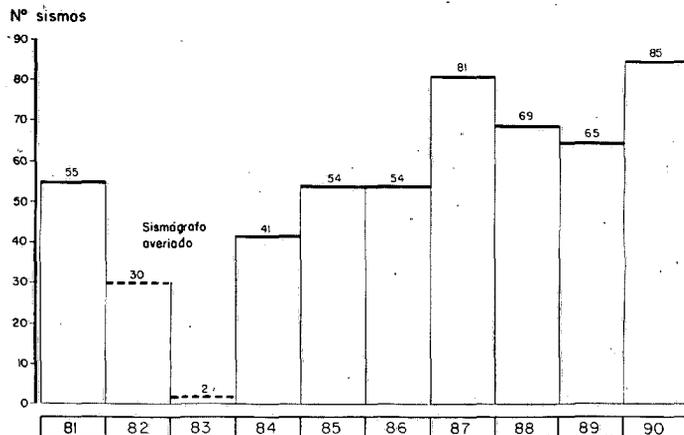
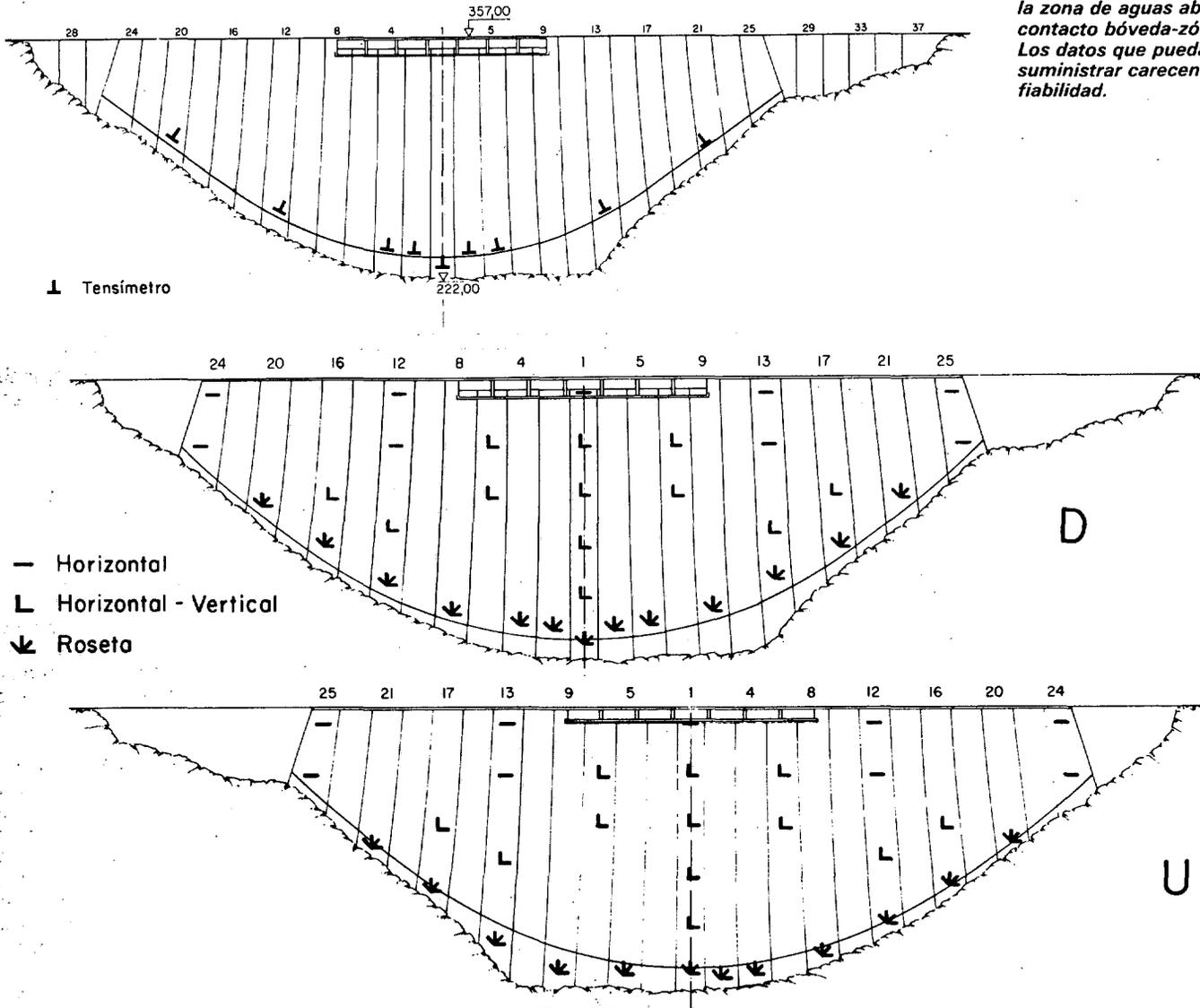


Figura 17. Situación de los 9 tensímetros instalados en la zona de aguas abajo del contacto bóveda-zócalo. Los datos que puedan suministrar carecen ya de fiabilidad.



han dejado de funcionar 8 aparatos, un 17 % de los inicialmente instalados; en segundo lugar que las diferencias de aquellos incrementos entre 1989 y 1990 llegan en algunos casos hasta 4-5 milímetros, lo que no parece estar acorde con la realidad.

Estos hechos, que ya se habían venido observando en años anteriores, aconsejaron la colocación progresiva de bases elongamétricas sobre las juntas en las zonas más características del cuerpo de la Presa; bases sobre las que era susceptible medir manualmente las aberturas en comparadores mecánicos, en los que se garantizaba un error inferior a 0,1 milímetros.

En la fig. 22 se refleja la situación de las citadas bases elongamétricas a final de 1990, que como se puede ver cubren el recorrido de la galería G-1 y galería perimetral, es decir el contorno de la estructura, juntamente con los tramos laterales de la galería G-3, además de los puntos más característicos de los dos estribos.

5.2. Aberturas en los taladros de la pantalla de control de movimientos

Esta pantalla está formada por una serie de taladros realizados desde la galería perimetral y penetrando 40 m. en la roca; son normales a la cimentación, con una inclinación de unos 30° hacia aguas arriba, y van dispuestos a razón de uno por cada dos bloques.

Tiene por finalidad detectar cualquier inicio de fisuración o rotura, progresivo o brusco, en el pie de aguas arriba, en la zona de influencia zócalo-roca. El registro de esta anomalía está encomendado al control de la variación de los caudales que suministran dichos taladros, dada su relación directa con las eventuales aberturas en los posibles procesos de fisuración o fracturación.

Tal como se señaló en 3.2.2, en 1989 se procedió a la reperfusión y limpieza de los taladros de dicha pantalla, dado que existían fundadas

Figura 18. Distribución de los extensómetros en ambos paramentos de la bóveda; colocados a 70-80 cm. de la superficie. D, U, paramentos de aguas abajo y aguas arriba respectivamente. Los datos por ellos suministrados han dejado de tener interés.

Figura 19. Incrementos, en mm., de las aberturas de las juntas hasta el momento de su inyección en el primer trimestre de 1968. Obtenidos con los 48 medidores eléctricos instalados sobre la zona media de la superficie de las juntas.

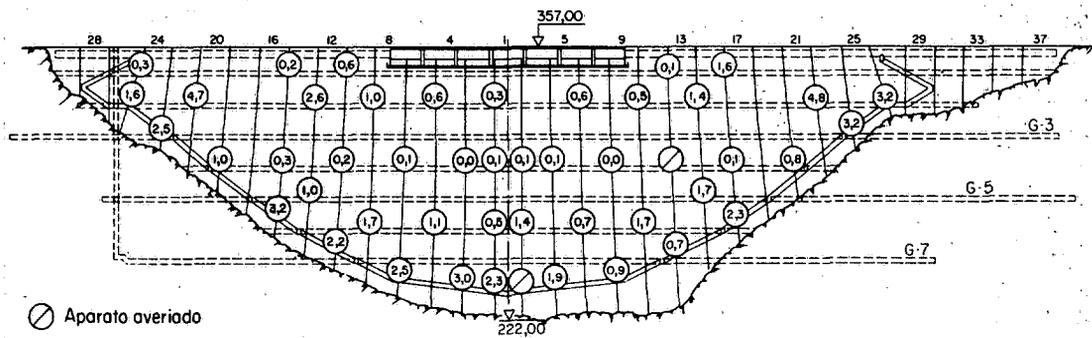


Figura 20. Incrementos, en mm., de las aberturas de las juntas desde el momento de la inyección en 1968, hasta el 31 de diciembre de 1989. Obtenidos con medidores eléctricos, 8 de los cuales han quedado fuera de servicio, un 17 % de los inicialmente instalados.

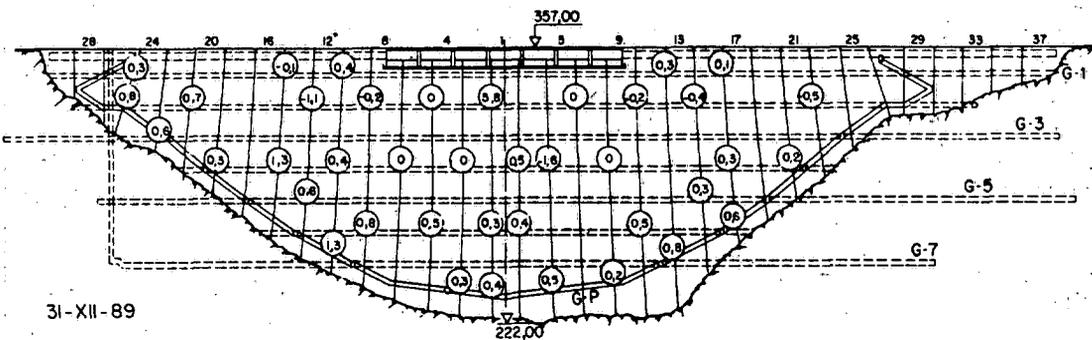


Figura 21. Incrementos, en mm., de las aberturas de las juntas desde el momento de la inyección en 1968, hasta el 31 de diciembre de 1990. Obtenidos con medidores eléctricos. Las ostensibles diferencias con algunas medidas del año anterior, fig. 20, corroboran el interés de haber establecido una instalación complementaria de bases elongamétricas sobre las juntas, en las zonas más características del cuerpo de la Presa.

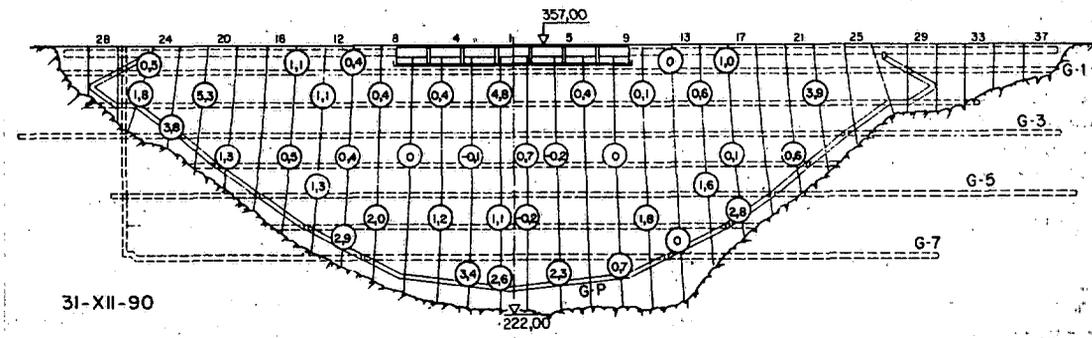
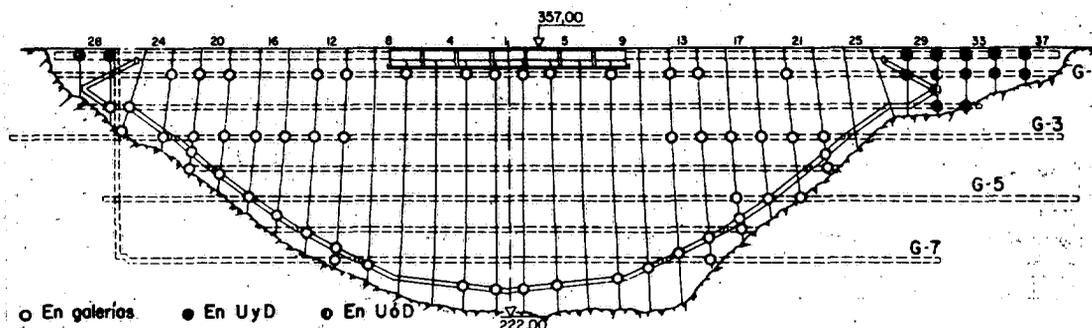


Figura 22. Situación de las bases elongamétricas en juntas a final de 1990.



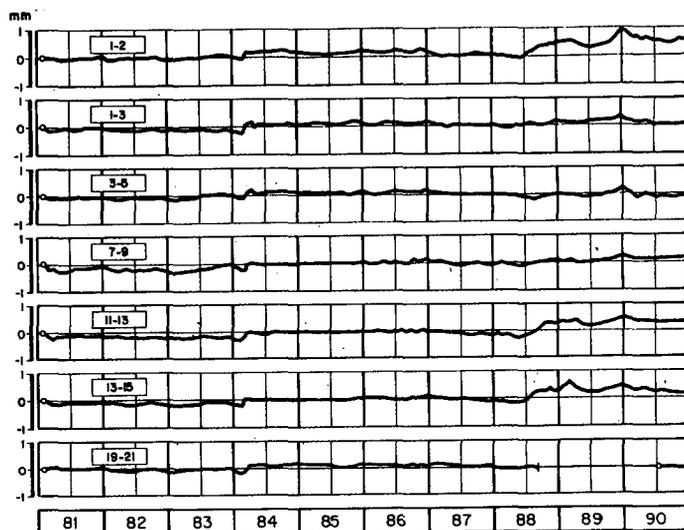
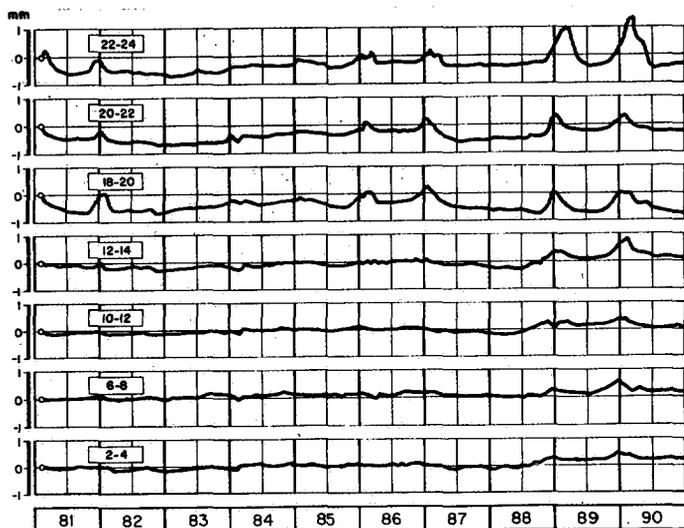


Figura 23. Variación de las aberturas de distintas juntas situadas a la altura de la galería G-1, obtenidas por medio de comparadores mecánicos. Margen derecha. A la derecha. Figura 24. Variación de las aberturas de distintas juntas situadas a la altura de la galería G-1, obtenidas por medio de comparadores mecánicos. Margen izquierda. A la izquierda. Figura 25. Variación de las aberturas de distintas juntas situadas a la altura de la galería perimetral, obtenidas por medio de comparadores mecánicos. Bloques 9 a 17. A la derecha. Figura 26. Variación de las aberturas de la junta 29-31 del estribo izquierdo a la altura de las galerías G-0, G-1, G-1,2, y G-2, obtenidas por medio de comparadores mecánicos.

Figura 23. Variación de las aberturas de distintas juntas situadas a la altura de la galería G-1, obtenidas por medio de comparadores mecánicos. Margen izquierda. A la izquierda. Figura 25. Variación de las aberturas de distintas juntas situadas a la altura de la galería perimetral, obtenidas por medio de comparadores mecánicos. Bloques 9 a 17. A la derecha. Figura 26. Variación de las aberturas de la junta 29-31 del estribo izquierdo a la altura de las galerías G-0, G-1, G-1,2, y G-2, obtenidas por medio de comparadores mecánicos.

Figura 23. Variación de las aberturas de distintas juntas situadas a la altura de la galería perimetral, obtenidas por medio de comparadores mecánicos. Bloques 9 a 17. A la derecha. Figura 26. Variación de las aberturas de la junta 29-31 del estribo izquierdo a la altura de las galerías G-0, G-1, G-1,2, y G-2, obtenidas por medio de comparadores mecánicos.

Figura 23. Variación de las aberturas de la junta 29-31 del estribo izquierdo a la altura de las galerías G-0, G-1, G-1,2, y G-2, obtenidas por medio de comparadores mecánicos.

sospechas de que algunos de ellos habían quedado obturados por las progresivas concreciones de carbonato cálcico.

No se advierte, durante el decenio, ninguna variación brusca en dichos caudales; éstos guardan una total concordancia con la variación de los niveles del embalse.

5.3. Desplazamientos según el plano horizontal

Estas medidas están suministradas por la auscultación geodésica, por los péndulos y por las colimaciones que se realizan en el interior de las galerías de drenaje.

La auscultación geodésica se realiza desde bases exteriores sobre puntos de control colocados en la estructura. Estas bases exteriores están situadas aguas abajo de la Presa y son de dos tipos: unas, más alejadas, consideradas fijas, en número de 6, y otras más cercanas, consideradas hipotéticamente móviles, en número de 4. Desde estas últimas se observan por trisección los 11 puntos de control que barren todo el alzado de la estructura.

Al mismo tiempo desde el interior de las galerías de drenaje, alguna de las cuales penetra hasta un centenar de metros en la roca, se ha situado toda una cadena de puntos de colimación considerando como referencia fija una base ubicada en el fondo de dichas galerías. Como quiera que estas cadenas de colimación van completadas con las correspondientes cadenas de nivelación, se tienen así establecidos dentro de estas galerías unos auténticos «péndulos horizontales».

A las lecturas más características, en las que se han realizado mediciones globales de todos los desplazamientos de la obra, se les ha dado una numeración correlativa que viene expresada sobre la curva de embalse en la fig. 1, contabilizándose así en este decenio un total de 37 lecturas de este tipo, cifra más bien escasa.

Estos desplazamientos son la consecuencia de la influencia conjunta del peso propio; carga hidrostática y subpresiones; efecto térmico; y de la suma de todos los desplazamientos remanentes.

Del análisis de las medidas registradas por las colimaciones en las tres galerías de drenaje, G-3, G-5 y G-7, que están grafiadas en las figs. 33, 34

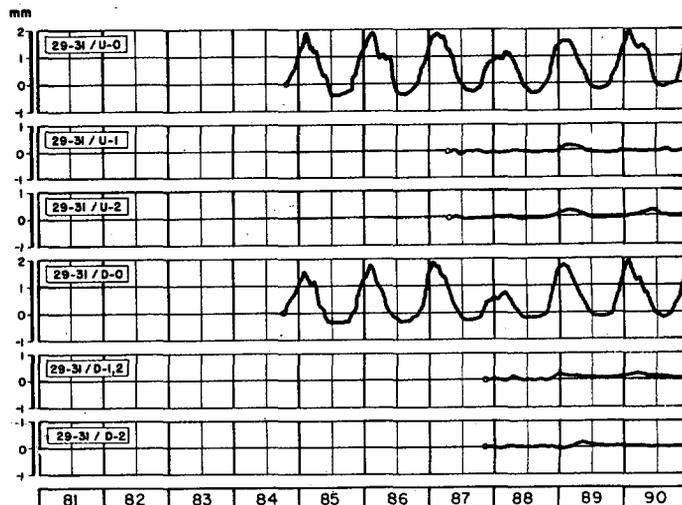
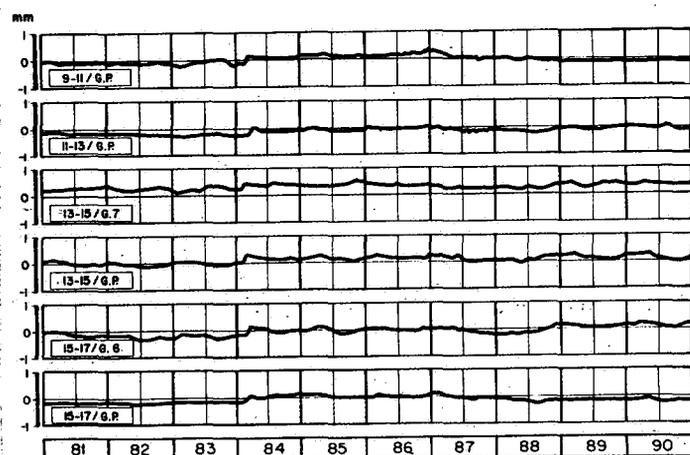


Figura 27. Variación de los caudales más significativos en los taladros de la pantalla de control de movimientos de la margen derecha.

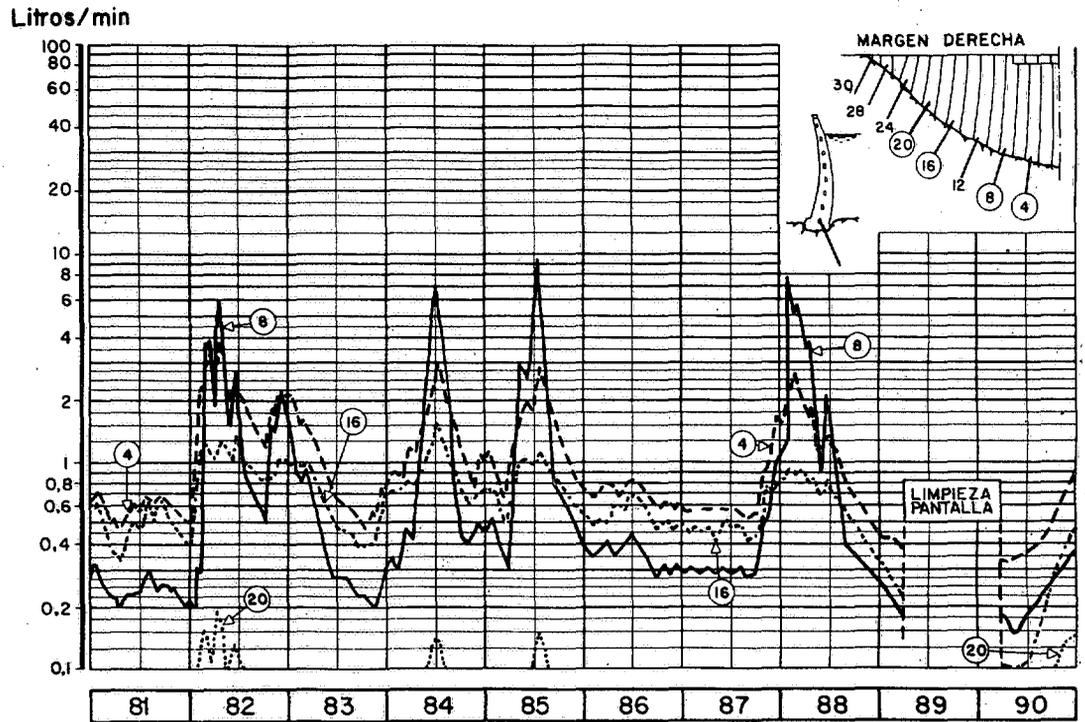
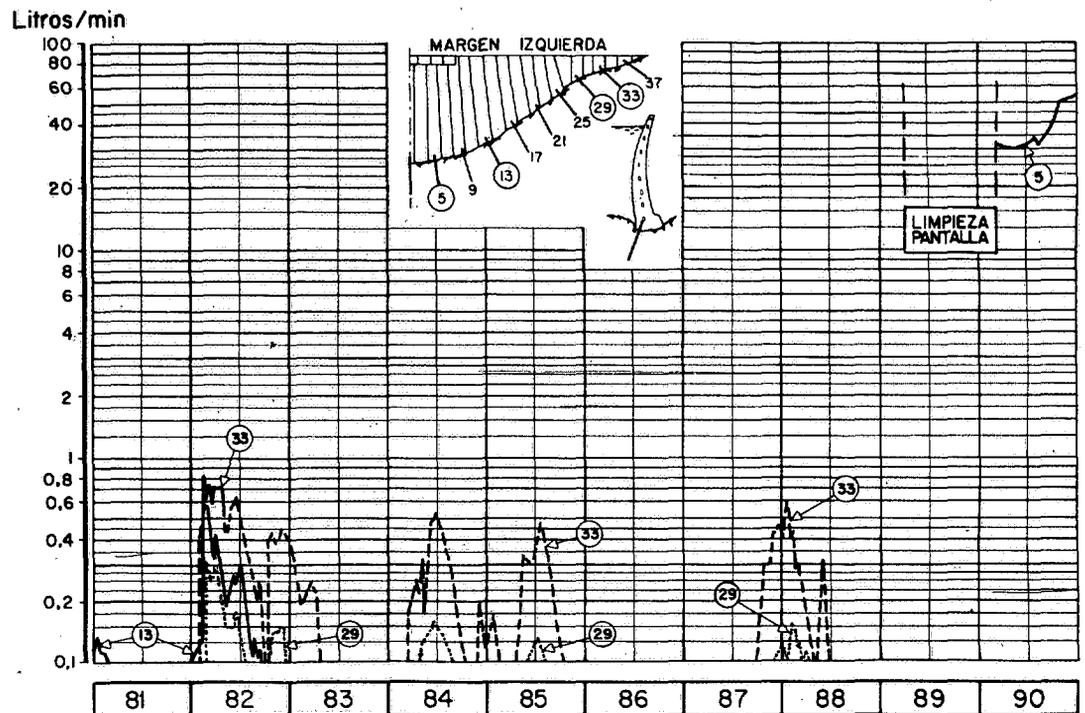


Figura 28. Variación de los caudales más significativos en los taladros de la pantalla de control de movimientos de la margen izquierda.



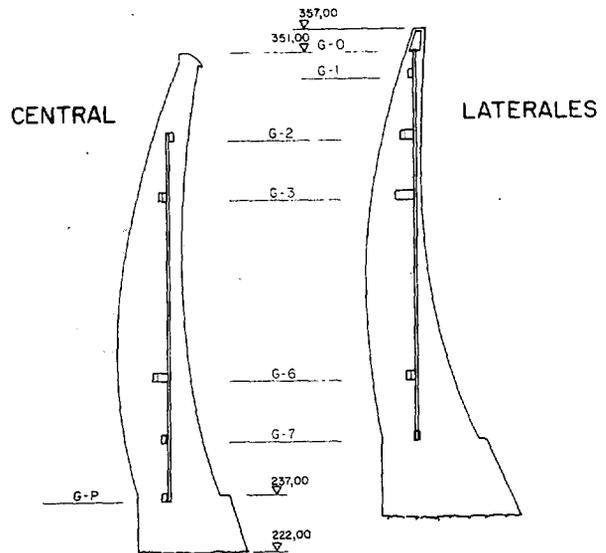
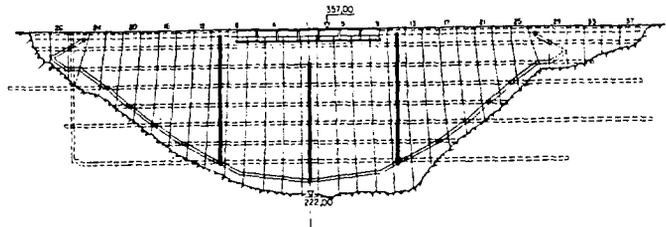
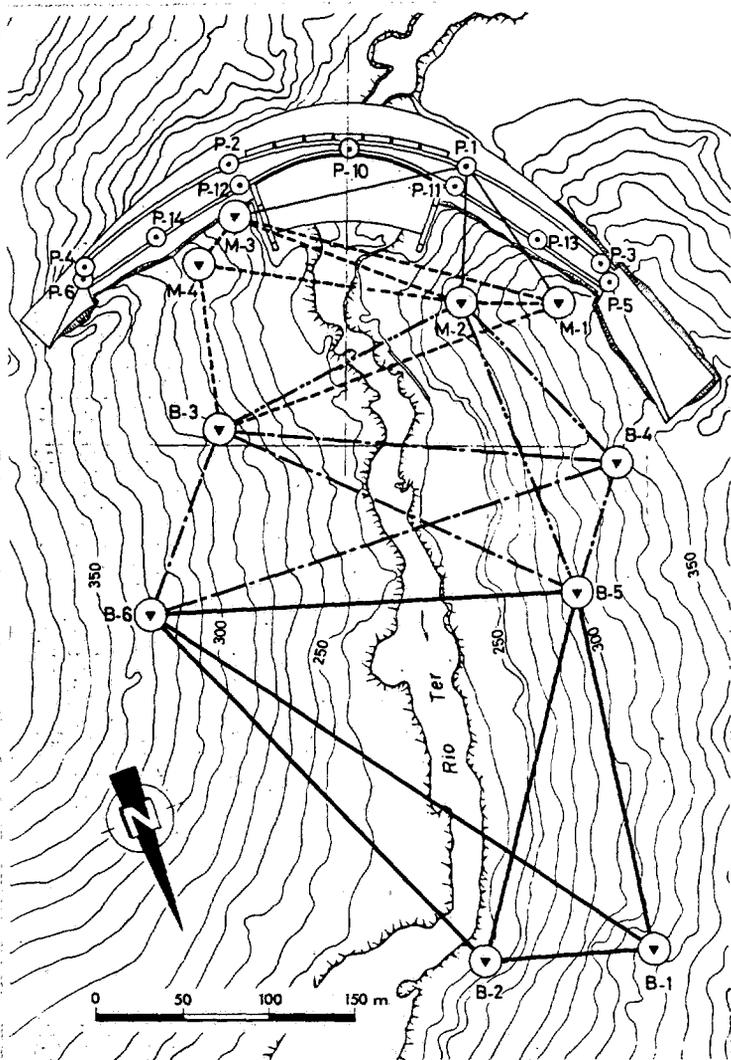


Figura 29. Esquema general de la auscultación geodésica. B, bases fijas; M, bases hipotéticamente móviles; P, puntos de control en el cuerpo de la Presa. A la derecha. Figura 30. Esquema general de la instalación de los tres péndulos en el cuerpo de la bóveda.

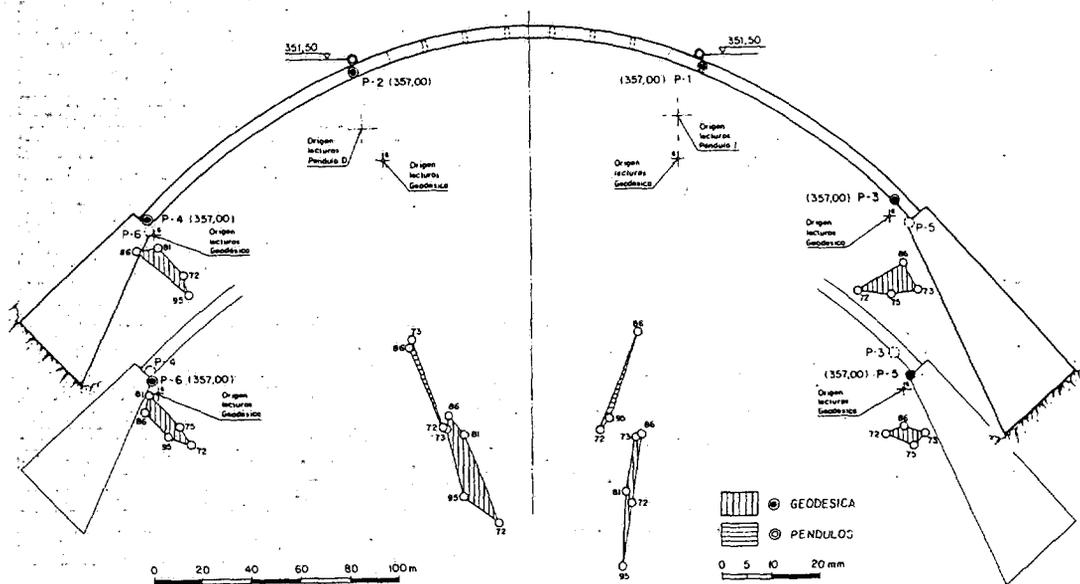
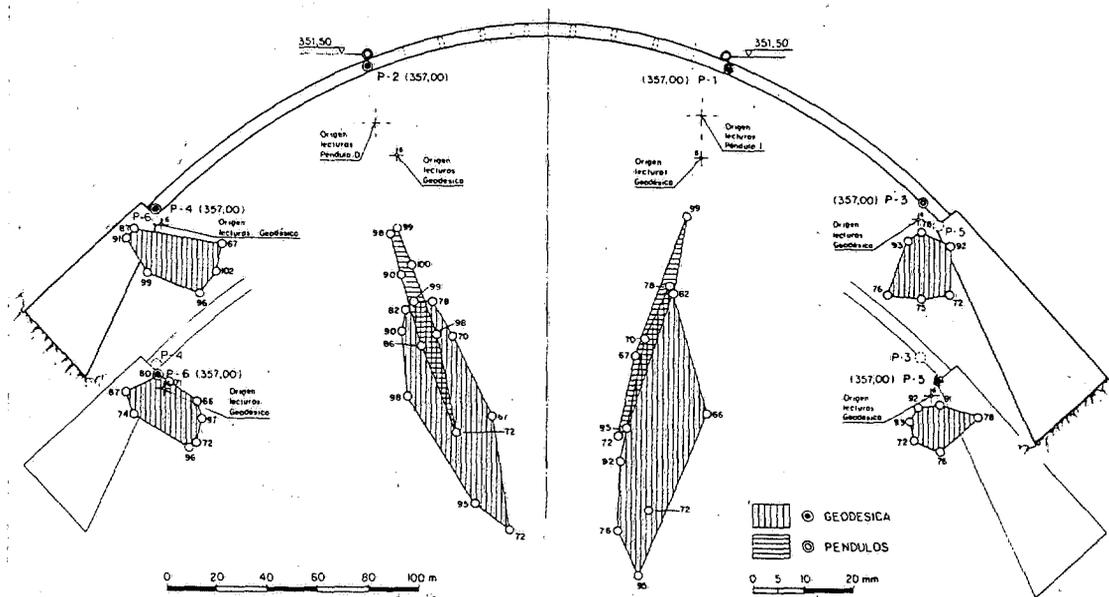


Figura 31. Areas envolventes de los desplazamientos en el arco de coronación, 357 m., bajo carga constante del embalse a sus niveles máximos, en el entorno de la cota 350 m. Medidas 72, 73, 75, 81, 86 y 95.

Figura 32. Areas envolventes de los desplazamientos globales en el arco de cota 357 m., bajo todas las acciones que han incidido sobre la estructura y macizo de apoyo durante el decenio.



y 35, se desprende que estos desplazamientos, radiales a los arcos, o sea, tangenciales al cimientto, presentan valores nunca superiores a 1 centímetro, incluso en la galería G-3 absolutamente inapreciables, y siempre dirigidos hacia aguas abajo.

Es interesante observar como estas deformaciones en el macizo rocoso, aunque muy reducidas, se han hecho notar, como ocurren en la margen izquierda de la galería G-5, hasta 60 metros de profundidad.

5.3.1. Los desplazamientos en la clave

Uno de los parámetros más característicos de la Presa es el desplazamiento de la clave y concretamente, su desplazamiento máximo.

Este resultado ha sugerido compararlo retrospectivamente con los de otros desplazamientos de la clave característicos en la historia de la Presa, para lo cual en la fig. 37 se ha representado conjuntamente con las siguientes deformadas: La correspondiente al modelo homogéneo realizado en 1963 en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa; la resultante del modelo geomecánico realizado en 1968 en el Instituto ISMES de Bérgamo y la que resultó del cálculo analítico de la estructura, realizado en 1963 por el método de las «trial load».

De la observación de estos gráficos se desprenden básicamente dos reflexiones: La primera se refiere a la gran disparidad en los resultados de los ensayos en modelo con el cálculo analítico y la realidad. La razón fundamental estriba en que en los modelos no se introducen efectos térmicos, y éstos por sí solos pueden llegar a producir desplazamientos del mismo orden que la carga hidrostática.

La segunda se centra en la sorprendente coincidencia de los resultados del cálculo analítico con la máxima deformada real. Es evidente que en

esta deformada real no ha actuado la máxima carga hidrostática, es decir han faltado escasos metros para el nivel de la máxima avenida, pero están incluidas el resto de todas las acciones que inciden sobre la estructura y terreno, dejando las sísmicas aparte. Por ello resulta de gran interés comprobar que este método de cálculo, considerando simplemente el ajuste radial de arcos —ménsulas en el campo elástico, y habiendo hecho intervenir como acciones la carga hidrostática, subpresión, los efectos térmicos uniforme y diferencial, el peso propio y la deformabilidad del cimientto, haya dado resultados tan satisfactorios y tan concordantes con la realidad; por lo que se puede concluir sobre su amplia, sobrada y rigurosa utilización para un proyecto de este tipo.

Siguiendo estos análisis de los desplazamientos prototípicos de la clave, en la fig. 38 se recogen todas las medidas del decenio que han dado los desplazamientos más altos en coronación; a todos ellos se les añade las correspondientes medidas de estos mismos desplazamientos, pero recogidas en el decenio anterior, desde el momento de la puesta en carga, con lo que se tienen reunidos en un mismo gráfico todos los resultados de los desplazamientos máximos, cada uno según la fecha en que fue registrado. A todo este conjunto de valores se le ha trazado la envolvente superior, dando la curva que se grafía en la mencionada fig. 38.

Esta curva envolvente engloba los resultados de todos los ciclos de carga-descarga de la estructura, desde su puesta en carga, dando unos valores máximos que no han superado los 14 centímetros y que están de acuerdo con lo previsto en el cálculo analítico de la estructura. Sin embargo en ella se aprecia una pequeña, aunque marcada progresividad, a lo largo de estos dos decenios, que pone de manifiesto la componente irreversible de los desplazamientos, de la que se tratará en el próximo apartado 5.5.

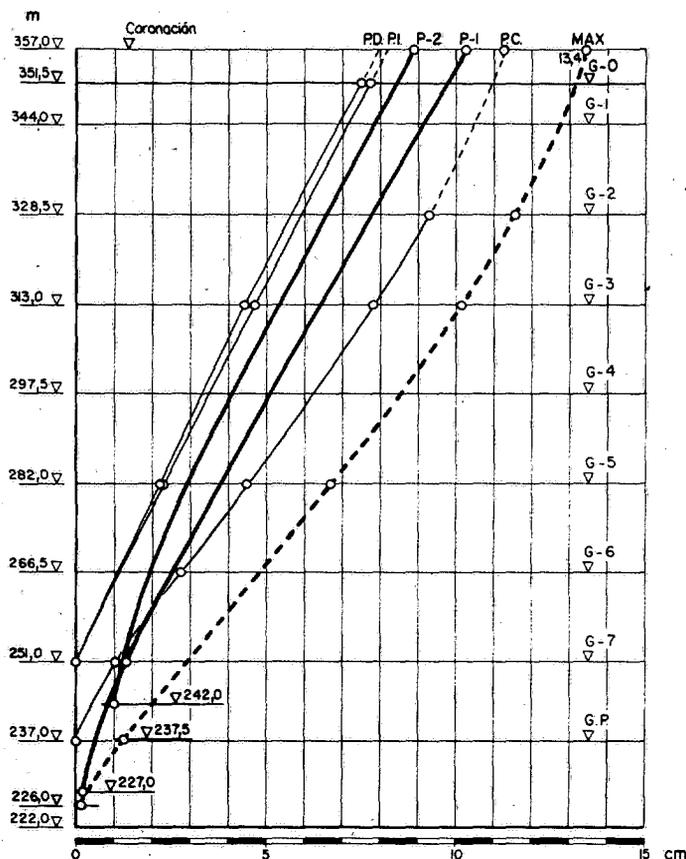


Figura 36. Desplazamiento máximo en la clave suministrado por la medida n.º 95, realizada el 25 de enero de 1988. P.I.; P.D., péndulos laterales; P.C., péndulo central, extrapolado hasta coronación; P-1, P-2, desplazamientos laterales según las medidas geodésicas; MAX, desplazamiento máximo en clave, de acuerdo con la deformada del péndulo central y la proporcionalidad media entre los péndulos laterales con la geodésica de P-1 y P-2. A la derecha. **Figura 37.** Desplazamientos más característicos de la clave durante la historia de la Presa: LNEC, obtenido a través de un modelo homogéneo en el Laboratorio Nacional de Engenharia Civil de Lisboa, 1963; ISMES, obtenido en el modelo geomecánico realizado en el Laboratorio ISMES de Bérgamo, 1968; TLM, según el cálculo analítico de la estructura realizada por el método de las «trial load», 1963; MAX, máxima deformada real registrada hasta la fecha por los sistemas de auscultación, 1988.

Esta curva envolvente representa por sí sola lo que podría denominarse el D.R.I. de la Presa, es decir, su Documento Racional de Identidad; en él viene fielmente reflejado su estado de juventud-vejez. ¿A cuántas presas españolas se le ha expedido este sencillo documento?

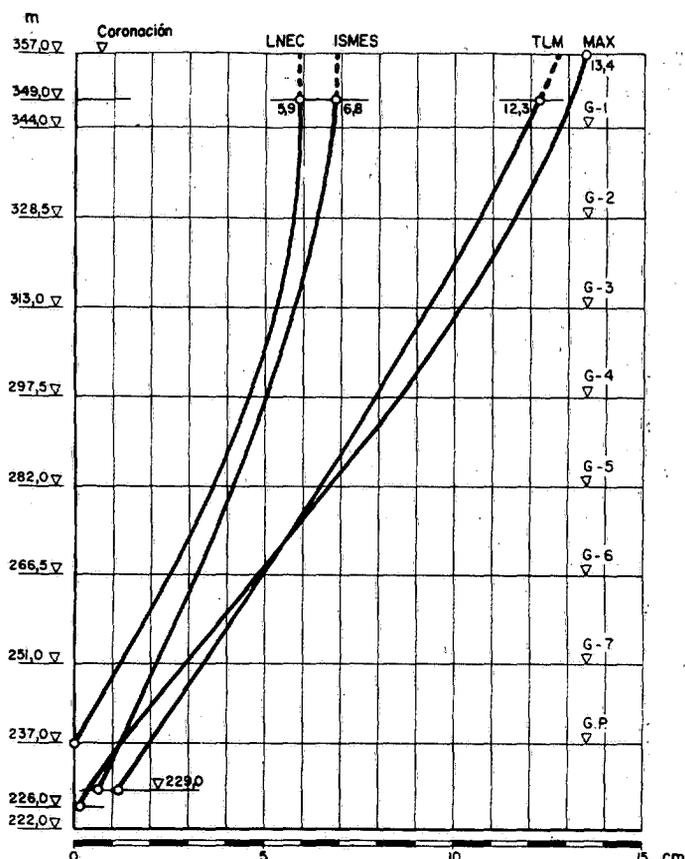
5.4. Desplazamientos según el eje vertical

En la fig. 40 sobre un alzado desarrollado de la estructura y terreno, se representan en cada uno de los puntos nivelados sus intervalos globales de oscilación durante el decenio. Estos intervalos de oscilación en la zona de cimentación no superan la amplitud de ± 3 milímetros, mientras que en la coronación alcanzan en la zona central amplitudes de hasta ± 1 centímetros, valores todos ellos sin relevancia dada la envergadura de la obra.

5.5. Desplazamientos remanentes

En el contorno de la Presa, es decir la zona de estribos y cimientos, al analizar las áreas globales de desplazamiento de todas las medidas realizadas durante el decenio, se observa cómo siguen existiendo medidas próximas al origen de cada punto de control, lo que quiere decir que los desplazamientos remanentes reales tendrán muy poca entidad.

Por lo que respecta al cuerpo central de la estructura, controlado por los tres péndulos y las medidas geodésicas de los puntos P-1 y P-2, los



posibles desplazamientos remanentes parecen tener mucha mayor entidad dado el alejamiento que presentan las áreas globales de desplazamientos de los puntos de origen; p.e. en la zona de coronación, fig. 32. Pero la problemática inicial de su valoración subsiste al no poder repetir los estados iniciales de carga, tanto por los niveles del embalse como por la identidad del estado térmico. Sin embargo si se analiza la fig. 38, donde se ha grafiado la envolvente límite superior de todos los desplazamientos de la clave desde el inicio de la puesta en carga, tal como se expuso en 5.3.1., se observa una progresividad desde su inicio, que denota la presencia de los desplazamientos de remanencia, bien debidos a la fluencia del hormigón o a la deformabilidad irreversible del cimientó; los incrementos diferenciales en esta curva a lo largo del tiempo denuncian la aproximación más objetiva a dichos desplazamientos. Este hecho indica de este modo, que dichos desplazamientos remanentes en la clave son del orden de 3 a 4 centímetros, lo que no reviste una relevancia especial en una obra de estas dimensiones.

En cuanto a los desplazamientos remanentes según el eje vertical, en la fig. 40 están grafiados los intervalos globales del decenio. Es muy claro comprobar como en la coronación todos han quedado ya por debajo de la línea que contiene el origen de puntos de control. El desplazamiento desde dicho origen hasta el centro de los intervalos daría el desplazamiento remanente medio en cada punto. Como se aprecia, en la zona central de la

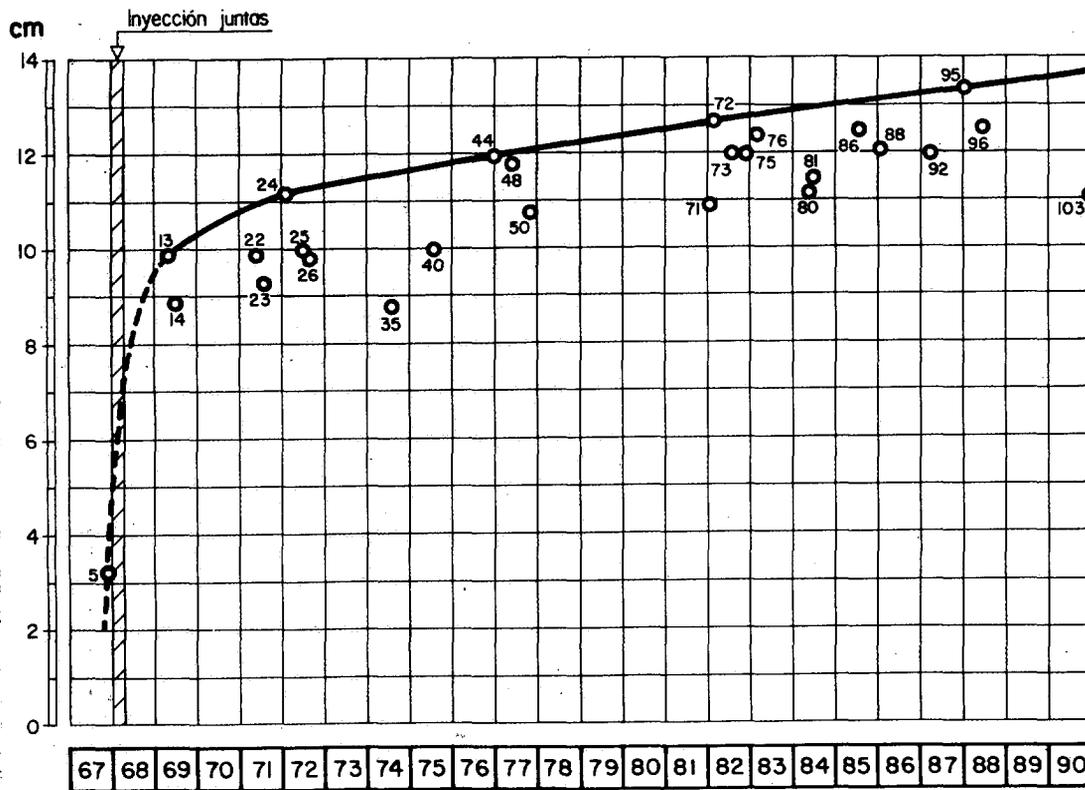


Figura 38. Desplazamientos máximos de la clave en coronación, 357 m. La envolvente límite-superior engloba los resultados de todos los ciclos de carga-descarga de la Presa y marca la tendencia de los desplazamientos remanentes. Constituye su fiel «Documento Racional de Identidad», D.R.I. ¿A cuántas presas españolas se le ha expedido?

Presa se encuentran los máximos, que son del orden de 1 centímetro.

Se comprende que para el futuro será interesante proseguir con el planteamiento de estos análisis globales para cuya confección se tendrán mayor número de datos, siendo así posible a través de ellos conocer y evaluar con mayor objetividad los resultados de estos procesos de remanencia, cuya evolución es de capital interés en el control del complejo estructura-terreno.

6. Fisuras observadas en el hormigón

6.1. Localización y características

Durante la construcción de la obra fueron observadas una serie de fisuras debidas a la combinación de los procesos térmicos de la retracción del hormigón con la temperatura ambiental. Dichas fisuras fueron claramente analizadas y consecuentemente controladas, por lo que este principio de patología quedó referido exclusivamente a aquellos años de 1965-1968.

No se observaron más fisuras en el hormigón hasta veinte años más tarde, a finales de 1988. Durante 1989, después de una inspección sistemática de este fenómeno, se procedió a su cartografía detallada, bloque por bloque, con lo que se pudieron analizar sus características básicas.

Se localizaron en la bóveda y en el estribo izquierdo; en el estribo derecho no se observaron

en parte alguna. Su localización en la bóveda estaba referida a la zona superior del paramento de aguas arriba entre las cotas 344 m.-347 m., coincidentes con el desarrollo de la galería G-1; a su vez se observaron también en el interior de la referida galería G-1, pero sólo en el hastial de aguas arriba. Por el contrario en el estribo izquierdo se observaron profusamente en el paramento de aguas arriba y también de forma análoga en la galería G-1, en su tramo paralelo y próximo al paramento de aguas arriba, con marcada preferencia en el hastial de aguas arriba, aunque en alguna ocasión también se reproducían sobre el hastial de aguas abajo.

Hay que señalar que el espesor de las fisuras observadas en la propia galería G-1 no sobrepasaba el medio milímetro; mientras que el espesor de las fisuras observadas en el paramento de aguas arriba no resultó ser superior a un milímetro, una vez que pudieron ser observadas desde una barca.

Todas estas fisuras presentan un marcado desarrollo horizontal, y siempre están ubicadas en la zona de aguas arriba, tanto en la bóveda como en el estribo izquierdo. En los bloques donde aparecen su desarrollo es total o parcial, marcando las juntas de construcción discontinuidad en ese desarrollo, pero sin mostrar tipología de corte o cizallamiento en aquellos puntos.

Existen dos grupos de fisuras claramente diferenciadas. El primero se refiere a aquellas fisuras netamente limpias, que, en principio, indican una formación reciente; el segundo lo forman aquellas

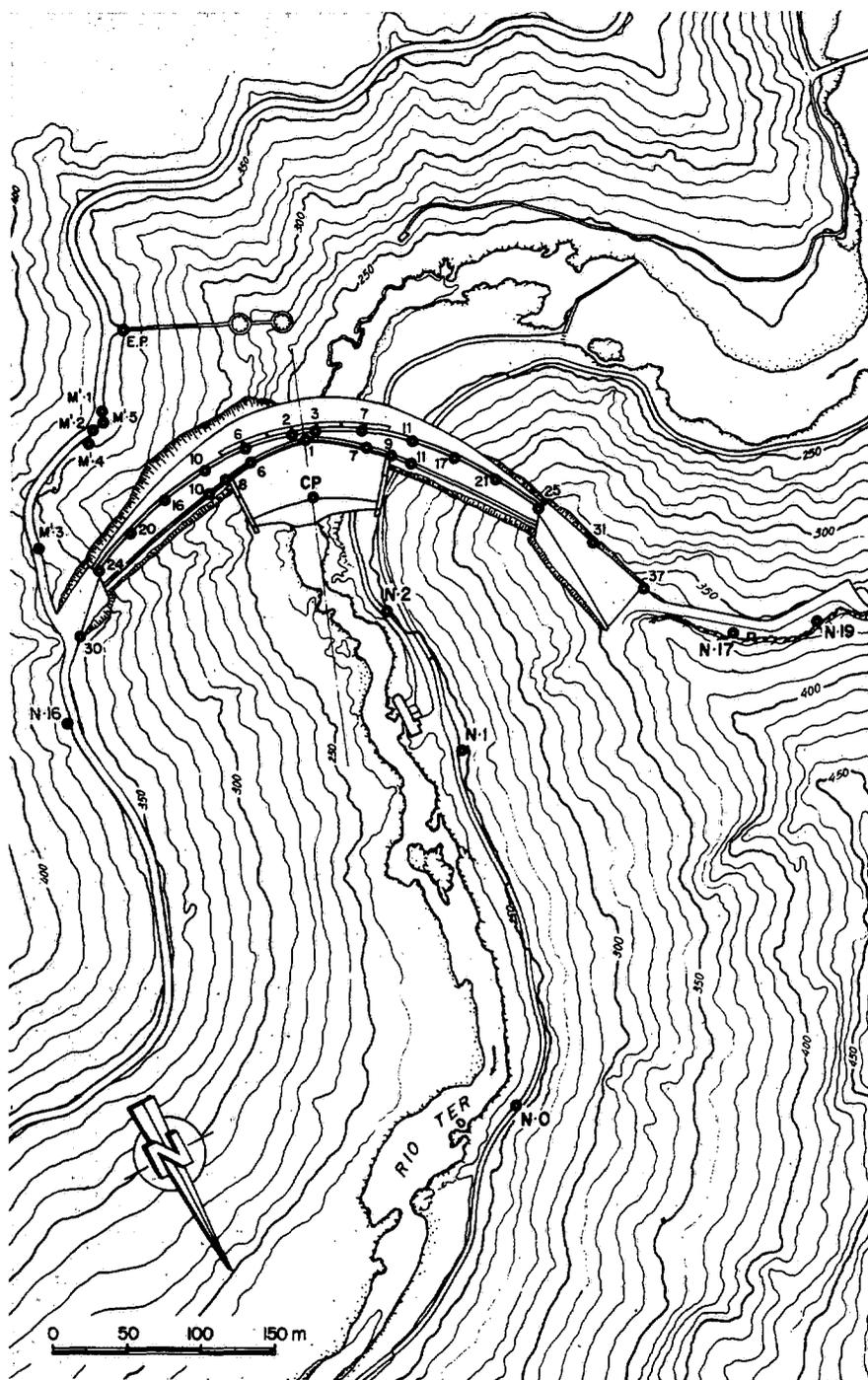


Figura 39. Situación de las bases fijas y de los puntos de observación en el exterior de la Presa, para el control de sus desplazamientos según el eje vertical.

otras fisuras que aparecen selladas por concreciones calcíticas y por lo tanto sugieren una formación en un período muy anterior a las primeras. Sin embargo es preciso puntualizar que estas concreciones se refieren exclusivamente a reducidos procesos de goteo, lo que indica que el paso del agua a través de dichas fisuras se realizó con cierta dificultad. Fig. 43.

El análisis numérico de dichas fisuras demuestra que 24 de los 34 bloques de construcción, es decir un 71 %, presentan fisuras con extensión parcial o total, bien en el paramento de aguas arriba o bien en la galería G-1. Pero los índices más

sugerentes son los siguientes: De esos 24 bloques, 5 (21 %) presentan mayor extensión de fisuración en el paramento de aguas arriba que en G-1; 7 bloques (29 %) presentan una extensión de fisuración similar en el paramento y en G-1; y los 12 bloques restantes (50 %) presentan mayor extensión de fisuración en la G-1 que en el paramento.

Hay que señalar que dado el escaso espesor de las fisuras observadas no se ha realizado ningún control sobre su evolución, limitándolo a la observación visual, y a la extensión y desarrollo definidos en la fig. 42. Tampoco se ha llegado a una conclusión sobre la profundidad de las fisuras en la masa de hormigón, a pesar de algunas catas realizadas; únicamente cabe resaltar que cuando el embalse ha alcanzado e incluso superado aquellas cotas, se han producido, en algunas fisuras, señales de humectación acompañadas de los referidos procesos de carbonatación.

6.2. Causas de la fisuración

Dada la particular homogeneidad y direccionalidad de la ubicación y localización de estas fisuras, en bóveda y estribo, se deduce que las causas originarias de su aparición no pueden ser achacables al peso propio, a la fluencia, a deformaciones del cimient o a las acciones sísmicas, ni tampoco a procesos de expansividad por la reacción alcalina de los áridos, o por la formación de geles silicatados expansivos, o simplemente de ettringita, aspectos últimos que han sido plenamente descartados por recientes análisis mecánicos, químicos y difractométricos; trabajos que han sido realizados en el INTEMAC y en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Universitat Politècnica de Catalunya.

No sólo por exclusión, sino precisamente en función de aquellas particulares características de ubicación y localización, cabe concluir que su origen es térmico, es decir, se produce por una determinada conjunción de la temperatura climático-ambiental y de la temperatura que el agua del embalse transmite a la Presa, contando con los procesos de la inercia térmica que se producen en el interior de la masa de hormigón.

Este conjunto de variaciones y oscilaciones térmicas se traduce en dos aspectos concretos. El primero se refiere al efecto térmico uniforme, que naturalmente incide de manera homogénea sobre la estructura; el segundo al efecto térmico diferencial, es decir, de la punta térmica que sobresale del anterior efecto uniforme.

6.2.1. Los efectos térmicos diferenciales

Estas categorías se resumen en un efecto térmico diferencial entre paramentos, y en un efecto térmico diferencial entre núcleo y paramentos. El efecto térmico entre paramentos se debe a la circunstancia de la orientación que el paramento de aguas arriba tiene hacia el mediodía, por lo tanto sometido a un fuerte asoleo especialmente en verano y cuando el nivel del embalse está bajo; por contra, el paramento de aguas abajo está orientado hacia el norte, lo que condiciona en él una temperatura muy inferior. Por ello el gradiente tér-

Figura 40. Intervalos globales de los desplazamientos según el eje vertical en la estructura y macizo de apoyo, según todas las medidas características realizadas en el decenio.

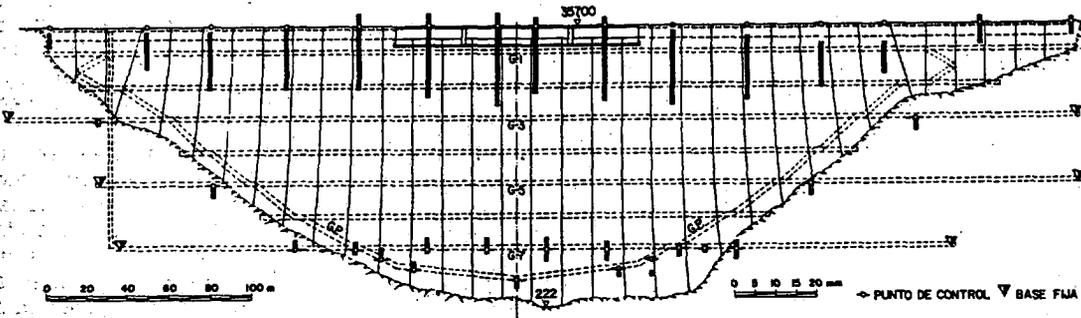


Figura 41. Situación general de las fisuras, observadas en el hormigón, sobre unas secciones transversales tipo de la bóveda y estribo izquierdo. Anclajes de cosido.

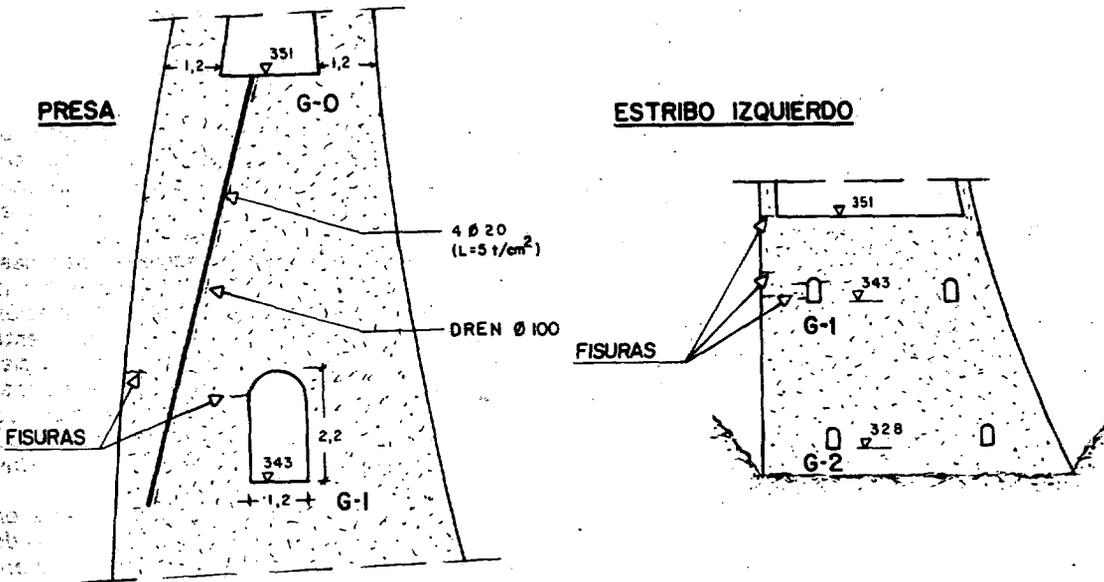


Figura 42. Cartografía de las fisuras observadas en el hormigón durante 1988-89 en el paramento de aguas arriba y en la galería G-1. Anclajes de cosido.

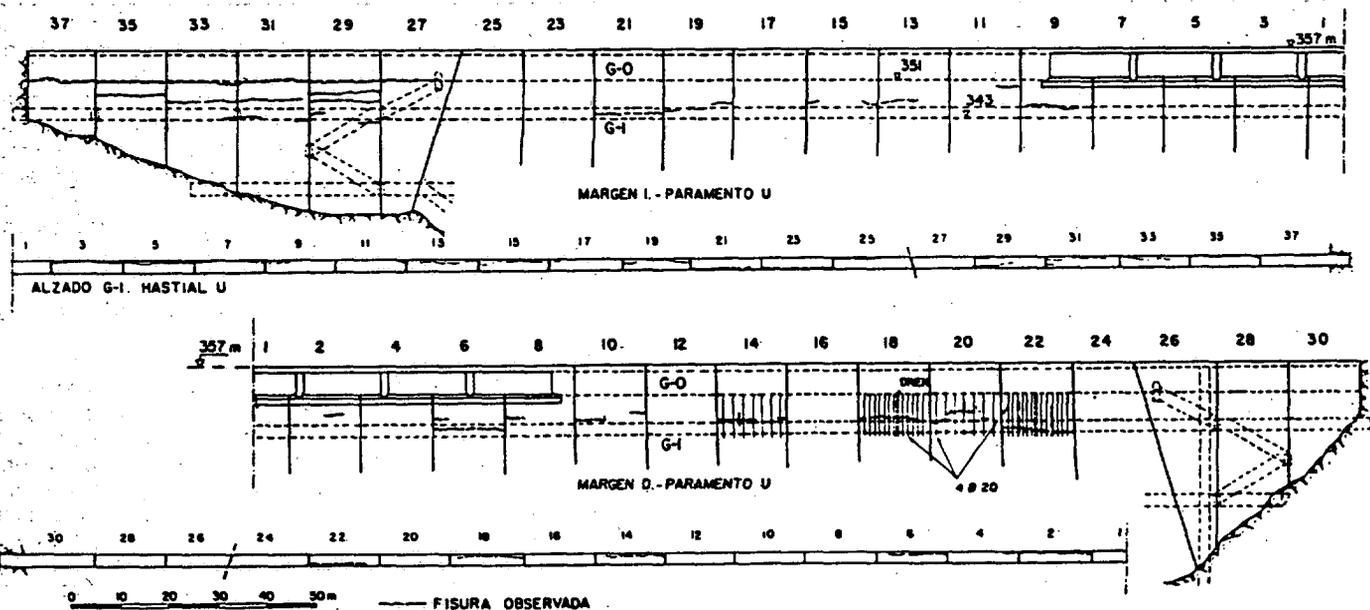


Figura 43. Aspecto de una fisura en el hastial de aguas arriba de la galería G-1. Las concreciones por goteo de carbonato cálcico indican: 1) La dificultad de humectación de la fisura al estar toda aquella zona en compresión por efecto de la carga hidrostática. 2) Que dicha fisura se produjo con anterioridad a 1987, es decir en un episodio térmico anterior al recientemente observado, con fisuras limpias. Fotografía cedida por Félix de la Fuente.

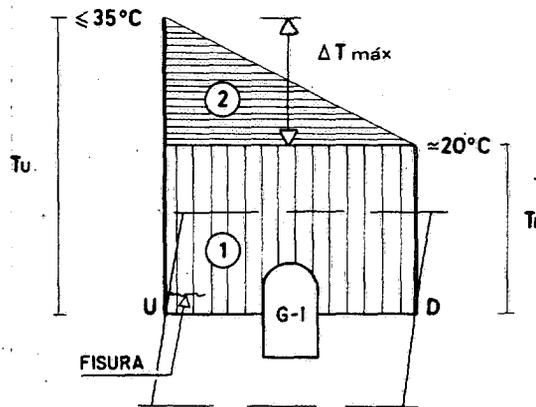
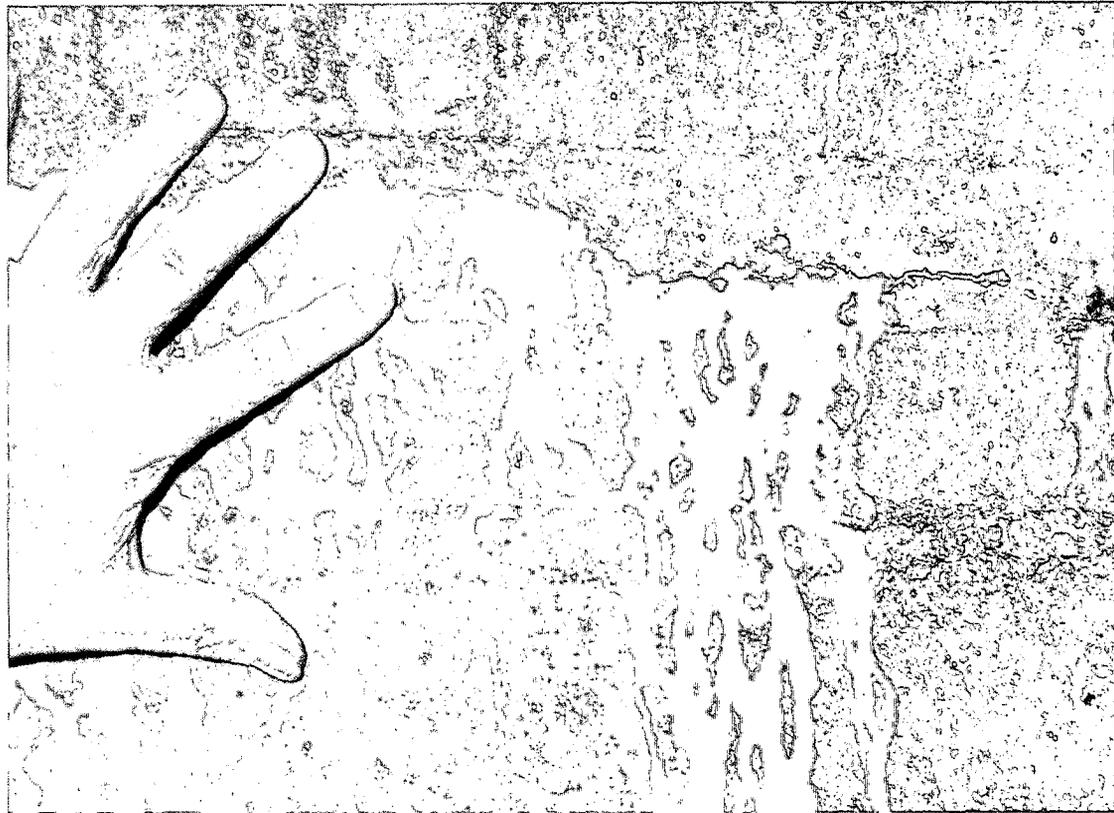
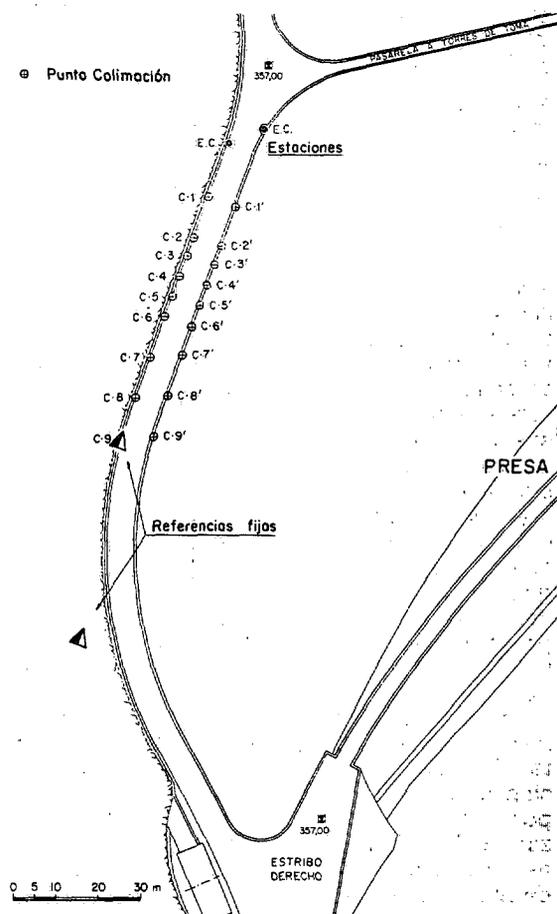
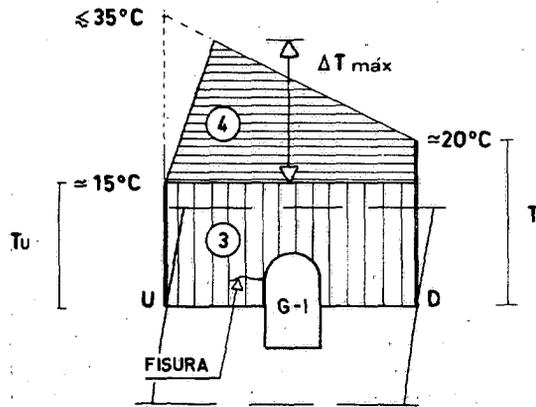
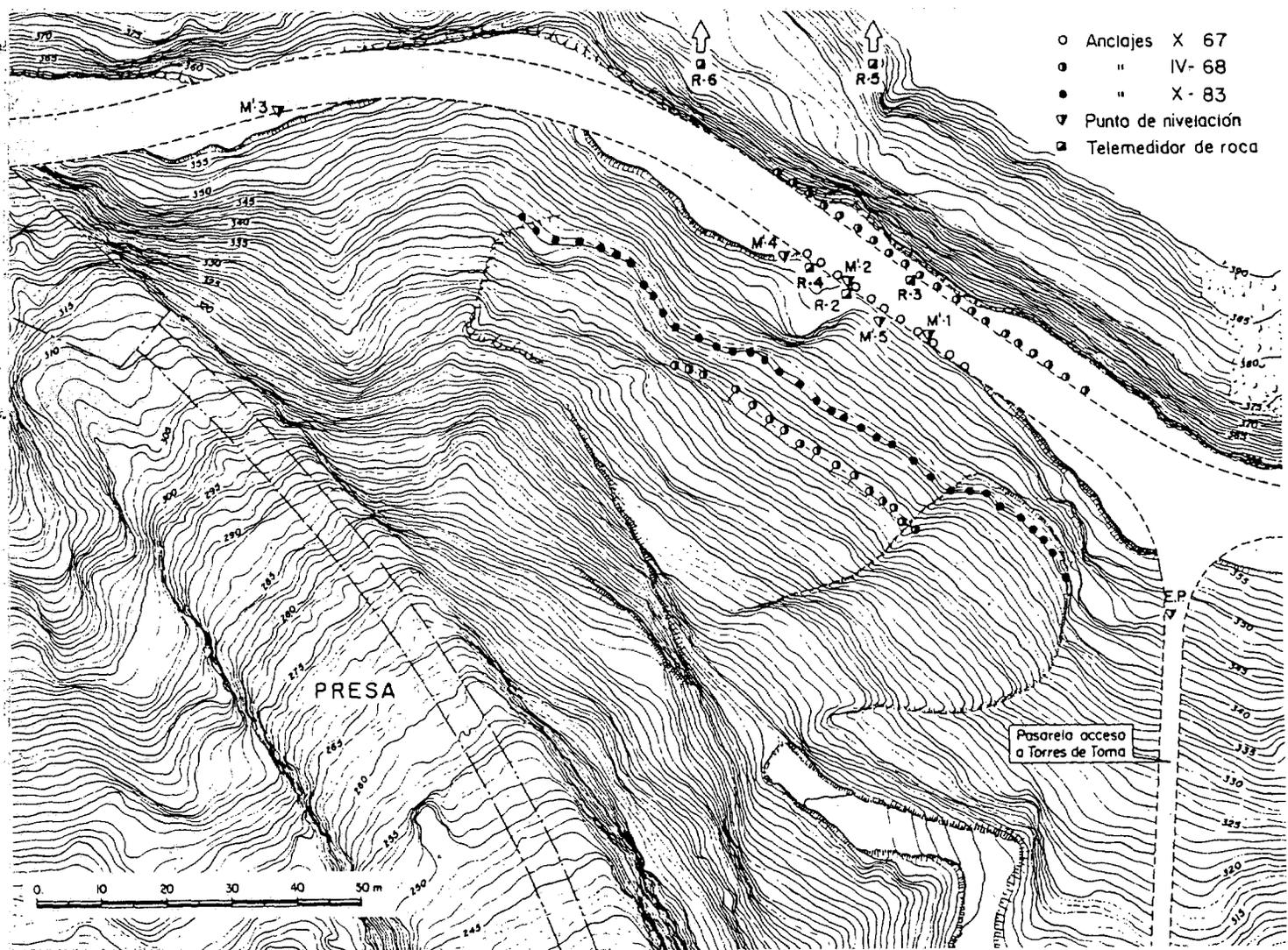


Figura 44. Esquemas de los diagramas de temperaturas, lineales o no, de los efectos térmicos diferenciales, sobre una sección de la Presa a la altura de la galería G-1. 1), 3) Efectos térmicos uniformes; 2) efecto térmico diferencial entre paramentos; 4) efecto térmico diferencial entre núcleo y paramentos. Fisuras observadas en concordancia con estos efectos térmicos diferenciales. A la derecha. Figura 45. Situación de los sistemas de colimación establecidos para el control de la estabilidad de la ladera de la margen derecha.





mico entre ambos paramentos puede resultar hasta de 20°C, o más, lo que condiciona un giro en la ménsula, es decir un momento contenido en el plano radial, que originará en el borde de aguas arriba las correspondientes tracciones perpendiculares al plano horizontal, y por consiguiente una eventual fisura, en el paramento de aguas arriba, del tipo de las observadas; zona que coincide precisamente con la sección más estrangulada de la ménsula, la que se corresponde con la galería G-1; razonamiento que también puede hacerse extensivo a las fisuras observadas en el estribo izquierdo; y por supuesto a la ausencia de fisuras del estribo derecho, más resguardado del asoleo por la topografía de la ladera, y por lo tanto con un efecto térmico entre paramentos más atenuado.

Por otro lado el efecto térmico diferencial entre núcleo y paramentos surge cuando a un estado térmico como el anterior se le superpone la acción del agua del embalse que haga descender en poco tiempo la temperatura del hormigón en la zona del paramento de aguas arriba, originando así en el núcleo una punta térmica hacia la zona de aguas arriba, que originará tracciones en aquella zona de la galería G-1, más estrangulada; trac-

ciones que pueden originar la consiguiente fisuración, solamente en la galería, tal como ha sido observada.

En la fig. 44 se representan sobre una sección a la altura de la galería G-1, los esquemas de los diagramas térmicos, lineales o no, de estos efectos térmicos diferenciales, juntamente con las eventuales fisuras que cada uno de ellos puede llegar a producir.

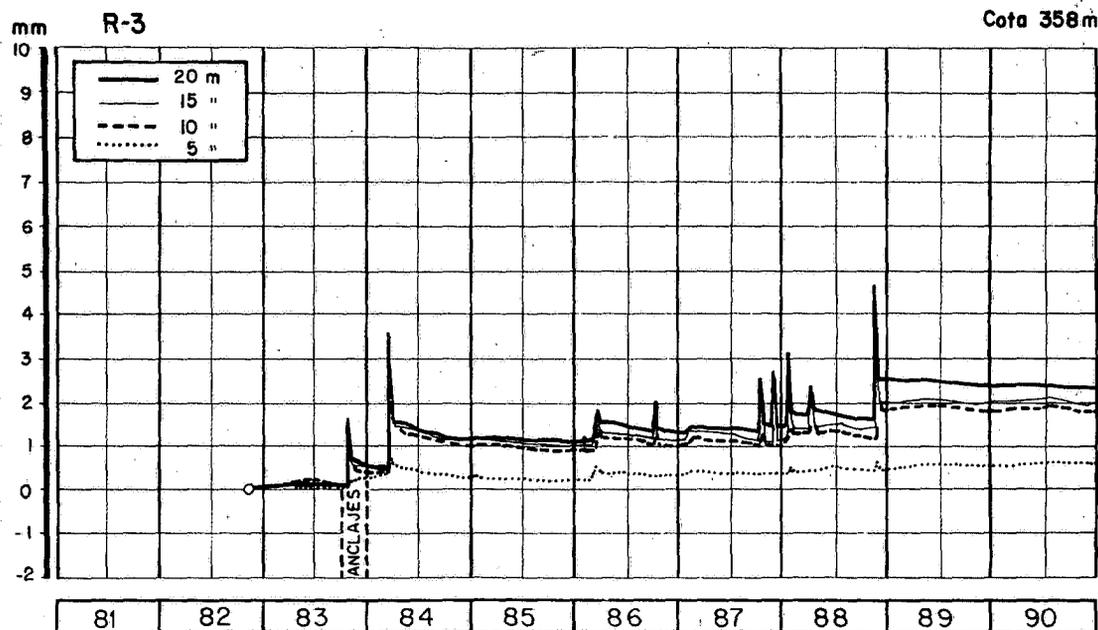
Toda esta exposición ha provocado lógicamente un sustancial «cambio cualitativo» en la apreciación del conjunto de efectos térmicos que pueden incidir sobre la Presa.

6.2.2. Orden de magnitud de las tracciones

Intentar una aproximación rigurosa al cálculo de las tensiones que estos fenómenos térmicos producen en la estructura puede resultar muy aleatorio, dada la complejidad de las numerosas variables y parámetros que sería preciso introducir en el proceso. Más práctico e ilustrativo resulta tratar de evaluar la tensión máxima que en el hormigón pueden llegar a producir estas acciones. Esta

Figura 46. Ladera de la margen derecha. Zona inferior del talud. Diferentes actuaciones con series de anclajes pasivos. Situación de los telemedidores R de roca y puntos M' de nivelación.

Figura 47. Evolución de las elongaciones del telededor de roca R-3, referidas a 5, 10, 15 y 20 m. de profundidad.



tensión vendrá directamente provocada por un incremento de temperatura diferencial del orden de:

$$\Delta\sigma \text{ máx} = 15^\circ \text{ C}$$

La deformación unitaria que esa temperatura provoca en una longitud de 1 m. en el hormigón, con un coeficiente de dilatación térmica de 10^{-2} mm. por 1 m. y por 1° C , será:

$$\epsilon = 10^{-2} \text{ mm. } 15^\circ \text{ C} : 1 \text{ m}/1\text{m} \cdot 1^\circ \text{ C} = 0,15 \text{ mm}$$

La tensión en el hormigón que origina esa deformación en la misma longitud será:

$$\sigma = \epsilon \cdot E/1 \text{ m}$$

donde E es el módulo de elasticidad del hormigón para el que se toma el valor medio:

$$E = 250.000 \text{ Kg/cm}^2$$

Así pues:

$$\sigma = 0,15 \text{ mm} \cdot 250.000 \text{ Kg/cm}^2/1\text{m} = 37,5 \text{ Kg/cm}^2$$

es decir que esta cifra, da el orden de magnitud en que se mueven las tensiones máximas en el hormigón a causa de un efecto térmico diferencial.

Como la capacidad resistente del hormigón a la tracción está precisamente en ese mismo orden de magnitud, y como su puesta en obra ha influido de forma dispersa sobre dicha capacidad re-

sistente, no es extraño que aparezca una determinada heterogeneidad en la fisuración observada, más aparente que real, en función de la dispersión de aquella resistencia a la tracción que presenta el propio hormigón en los distintos bloques y en las diferentes zonas de la Presa.

6.2.3. La reiteración del fenómeno

Se comprende que siempre que se vuelvan a repetir, en mayor o menor medida, las condiciones climático-ambientales y las condiciones de embalse para dar lugar a los efectos térmicos diferenciales entre paramentos, o entre núcleo y paramentos, y que a su vez provoquen tracciones en el hormigón del orden de $35-40 \text{ Kg/cm}^2$, no habrá otra solución que aceptar la presencia reiterada del efecto de fisuración, dado que la capacidad resistente a tracción del hormigón de la Presa está oscilando sobre esas mismas cifras.

6.3. Sellado de las fisuras

Como se ha señalado las fisuras observadas no llegan nunca a 1 milímetro de espesor, normalmente se mantienen incluso por debajo de los 0,5 milímetros. Por otro lado se ha visto que estas fisuras se presentan en buena parte, selladas, impermeabilizadas y monolíticas con la masa de hormigón, por concreciones de carbonato cálcico, por lo que parece coherente esperar a que las fisuras limpias se colmaten a base de estas concreciones.

El proceso de carbonatación surge siempre que el agua humecta dichas fisuras; en este medio acuoso siempre se encuentra disuelto el anhídrido carbónico atmosférico, que naturalmente reacciona con la única fase cristalina que se produce en la hidratación del portland, y que aparece en la

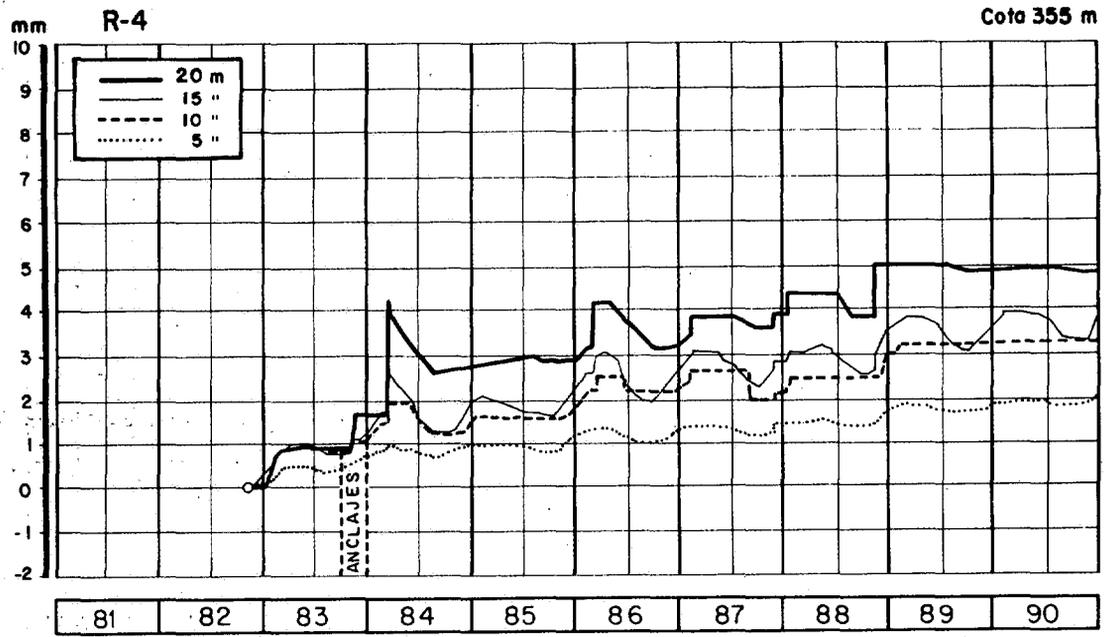
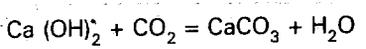


Figura 48. Evolución de las elongaciones del telemetador de roca R-4, referidas a 5, 10, 15 y 20 m. de profundidad.

forma de hidróxido cálcico, o portlandita, originando la reacción:



por lo que a la larga siempre se asegura el sellado de dichas fisuras.

Vale la pena recordar como algunos de los taldros de la pantalla de drenajes han quedado to-

talmente obturados a lo largo del tiempo por la colmatación de estas concreciones carbonáticas, según se señaló en 3.2.2.

6.4. Las tracciones originadas por los efectos térmicos diferenciales: ¿Un vacío legal?

Son muy ilustrativos no sólo el caso del estribo izquierdo de la Presa que, con un perfil muy conservador de presa de gravedad, presenta las fisu-

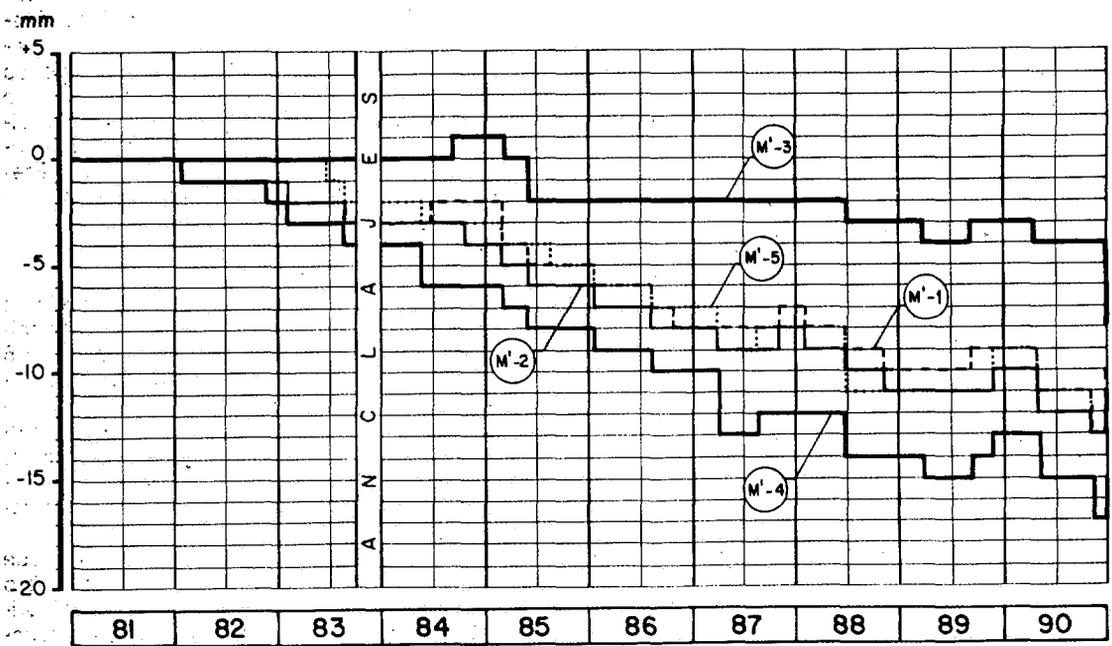


Figura 49. Evolución de las nivelaciones en los diferentes puntos M' a lo largo del decenio.

ras que se han relacionado en 6.1., localizadas en la zona de aguas arriba, sino, con la misma similitud, el propio cuerpo de la bóveda. Estas fisuras, como se ha señalado en 6.2.2., están en total concordancia con las tensiones de tracción, del orden de 30-40 Kg/cm², originadas bien por el efecto térmico diferencial entre paramentos, bien por el efecto térmico diferencial entre núcleo y paramentos. El hecho contradictorio es que estas tracciones no cumplen con la Instrucción vigente de Grandes Presas, y a su vez el funcionamiento estructural de la Presa ha sido normal durante 25 años.

Es evidente que estas tracciones, situadas fuera de la Instrucción oficial, pueden presentarse en cualquier presa de hormigón, cuando las condiciones de asoleo, embalse vacío y llenado rápido, originen gradientes térmicos análogos a los esquematizados en 6.2.1.

En las presas de gravedad o gravedad aligerada, dichas tracciones o sus efectos de fisuración, solamente pueden preocupar cuando se produzcan en la zona de aguas arriba, mientras que si se producen en la zona de aguas abajo quedarán compensadas a embalse lleno por las tensiones de compresión de la carga hidrostática. Por el contrario en las presas bóveda, cuando la fisuración se localiza en el paramento de aguas arriba, queda compensada a embalse lleno por el efecto de compresión de la carga hidrostática; en cambio más complejo resulta el problema si la fisuración aparece en el paramento de aguas abajo, cuando su orientación es precisamente hacia el Sur, ya que dichas tracciones se superponen con aquellas otras que en muchos casos produce la carga hidrostática en dicho paramento.

El tratamiento de estas tracciones con armaduras pasivas es especialmente costoso por las elevadas cuantías mecánicas a que da lugar; el pretensado además crearía importantes tracciones en el paramento contrario.

¿Cómo deberán normalizarse estas situaciones?

7 Ladera de la margen derecha. Su estabilidad

Desde el principio de las excavaciones de la obra se pusieron de manifiesto las delicadas características topográficas y geológicas que iba a presentar el talud de esta ladera, para lograr su empotramiento adecuado en la implantación de la Presa. Su desnivel definitivo alcanzó los 200 metros y su excavación comportó una extracción de 350-400.000 m.³ de roca.

Su inestabilidad afecta directamente a la pista de enlace con el vecino Salto de Sau, y sobre todo puede afectar seriamente la estructura de la pasarela de acceso a las torres de toma, lo que comprometería la normal explotación de la central hidroeléctrica.

Es necesario observar cómo las diferentes acciones que actúan sobre el talud, especialmente las aguas de lluvia, las condiciones térmicas ambientales, la descompresión del macizo rocoso y las variaciones del embalse, introducen unos ciclos de carga-descarga en sus presiones intersti-

ciales que se traduce en un notable proceso de fatiga sobre su estabilidad. Todo ello sin contar con las acciones esporádicas de los eventuales movimientos sísmicos.

Por ello se ha establecido, desde el primer momento, un sistema de auscultación sobre los desplazamientos de este talud, que se refiere en primer lugar al control de la nivelación de un grupo de puntos situados sobre el mismo; y en segundo lugar a la implantación de los correspondientes telemedidores de roca, sensiblemente horizontales, que detectan las elongaciones, positivas o negativas, del macizo a diferentes profundidades.

Cuando los movimientos detectados sobre el talud lo han aconsejado se han venido aplicando sobre el mismo diversas series de anclajes pasivos que han conseguido estabilizar temporalmente dicha ladera.

Esta sucesión de observaciones y correcciones, han obligado a revisar y ampliar sucesivamente los sistemas de control establecidos; de esta forma en 1985 se completaron dichos sistemas con dos cadenas de colimaciones sobre los muros de la carretera de acceso a las torres de toma, cuya situación y características se refleja en la fig. 45.

Los resultados de las colimaciones, elongaciones y especialmente de las nivelaciones denotan un grado de progresividad en los últimos años que es necesario seguir de cerca en el futuro para poder decidir en el momento preciso las actuaciones de corrección y consolidación más convenientes.

8 Consideraciones y conclusiones

Desde hace algunos años se vienen manifestando en las presas una serie de patologías que han empezado a causar serias preocupaciones y que han sido objeto de muy variados estudios. Estas patologías están referidas en su mayoría al comportamiento químico de los áridos y cementos de los hormigones, a los complejos efectos térmicos sobre la estructura y, sobre todo, a la deformabilidad del macizo rocoso de apoyo. Todas estas patologías son exclusivamente enfermedades de juventud; no en vano las modernas presas son un producto del siglo XX. Lo que no quiere decir que por ser joven no se tengan enfermedades incurables o accidentes mortales.

Pero además hay que considerar las futuras patologías del envejecimiento, concepto en ocasiones equívocamente utilizado.

El envejecimiento en una presa se dará cuando ésta vaya agotando su capacidad de deformabilidad y de remanencia, como consecuencia de toda la serie de ciclos carga-descarga que originan todas las acciones que inciden sobre la estructura y macizo rocoso. Estas patologías todavía no se han tipificado, pero pueden aparecer a la vuelta de la esquina.

Pues bien, como se ha podido constatar Susqueda no se ha librado de las patologías térmicas, pero además ha definido su direccionalidad hacia su etapa de madurez. Véase la fig. 38.

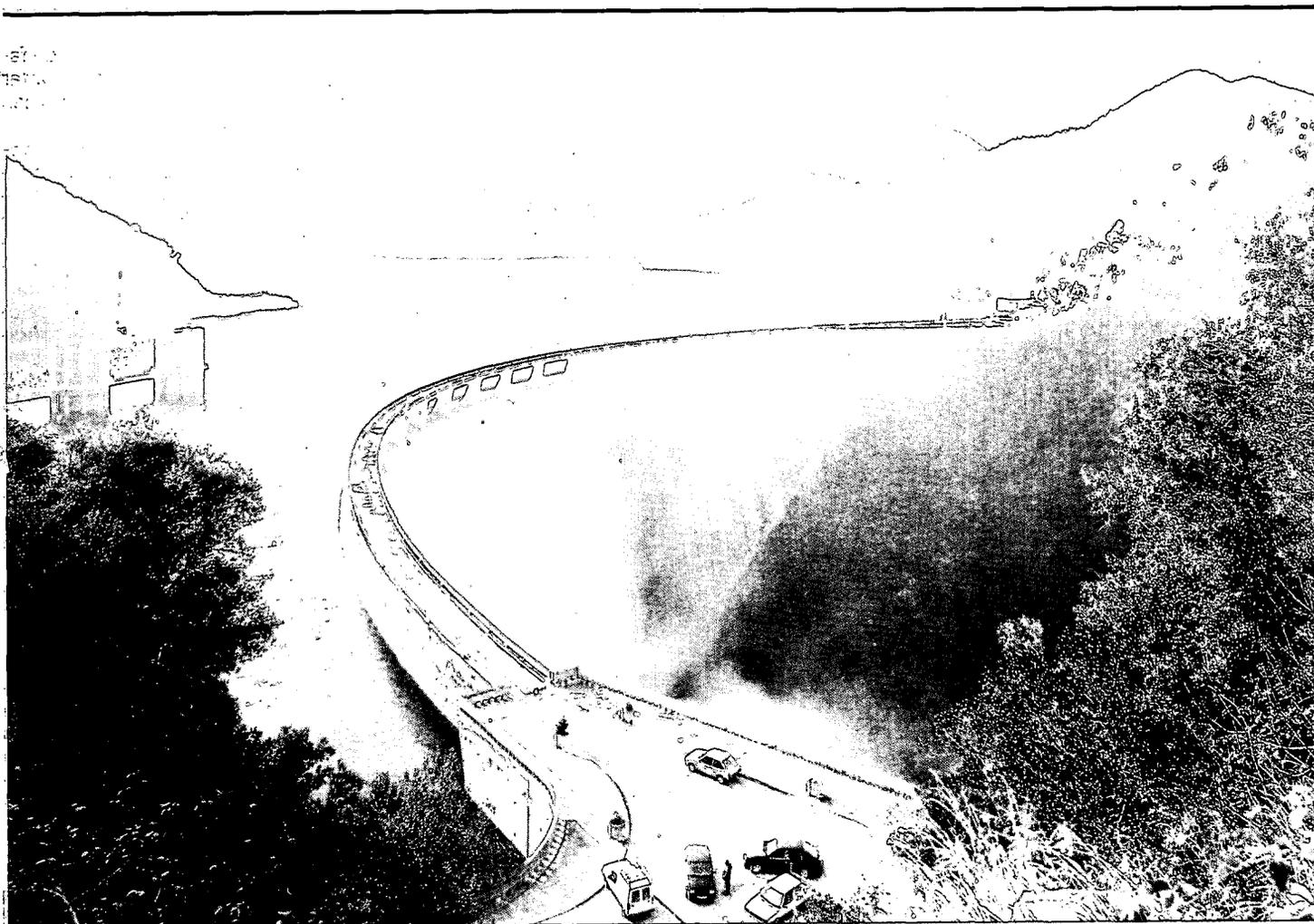


Figura 50. Vista general de la Presa de Susqueda durante un vertido libre en diciembre de 1991. Foto Sans.

¿Qué quiere decir todo esto? Sencillamente que después de los resultados presentados en este trabajo cabe concluir:

■ **Primero.** Es esencial la precisión y el rigor en la obtención de las medidas de los sistemas de auscultación, lo que sólo se logra con personal muy profesional y muy cualificado.

■ **Segundo.** Es esencial mantener a ultranza la filosofía de realizar las medidas de los desplazamientos de la estructura y del macizo de apoyo, por dos procedimientos diferentes, que no sólo aseguren su fiabilidad, sino que eviten a toda costa una falsa alarma.

■ **Tercero.** Es esencial que las medidas suministradas por los sistemas de auscultación se realicen «in situ» de forma personal y directa, desestimando, como norma, la centralización o informatización de las medidas a distancia.

■ **Cuarto.** Es muy de desear que en Susqueda se introduzca el sistema de Auditoría Técnica para contrastar y sancionar sus metodologías, sistemas y resultados.

Evidentemente estos cuatro puntos comportan unos gastos que suscitan cualquier tipo de sentimiento menos el de entusiasmo, y sin embargo es lo más rentable que puede hacerse por la economía de la explotación y el mantenimiento de estas estructuras.

Finalmente, ¿qué puede adelantarse para el 3er decenio? Evidentemente será preciso resolver con rigor y profundidad el reto de los efectos térmicos diferenciales. Y por supuesto completar los datos del D.R.I. Sería una suerte para el que suscribe lidiar durante este 3er decenio este hermoso ejemplar llamado Susqueda, fig. 50, y prestar otro servicio más a la colectividad. Aunque hay que contar con el permiso de la Autoridad y naturalmente... si el Tiempo no lo impide.■

9. Bibliografía básica

Rebollo, A. «La Presa bóveda de Susqueda. Su Proyecto, Construcción y Comportamiento». Instituto Eduardo Torroja. Madrid, 1972. 1 Volumen 400 págs. y 330 gráficos y fotografías. Prólogo de José Torán.

Rebollo, A. «Ingeniería y Arquitectura del hormigón. Instantáneas sobre el Salto de Susqueda». Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona, 1974. 1 Volumen 175 págs. y 145 fotografías.

Rebollo, A. «El comportamiento de la Presa de Susqueda durante el primer decenio. Hasta 1980». Revista de Obras Públicas. Madrid, abril 1987.