

06

Anexos

En el presente capítulo se presenta un resumen de diferentes estudios realizados sobre la presa. Para más información se puede consultar el libro que, en 1996, editó el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente titulado *La Presa de Tous* cuyo autor es el director de la obra José Luis Utrillas. En esta obra se hace una descripción más amplia de los cálculos utilizados en el proyecto.

06

Anexos

Los cálculos estáticos

Cálculo de estabilidad

La estabilidad de la presa fue objeto de un profundo estudio contrastado por medio de varios cálculos diferenciados. El primero de ellos, incluido en el proyecto de construcción, partió de las características resistentes de los materiales estimadas antes de la construcción de la presa. Posteriormente, la Dirección de Obra consideró oportuno realizar un nuevo cálculo utilizando los datos de resistencia que los materiales iban aportando durante los numerosos ensayos que se realizaron durante la construcción.

Además de estos estudios, se contó con los resultados de la investigación realizada por el CEDEX; fueron unos innovadores ensayos de corte en células de 1 m³ que fueron realizados sobre la escollera caliza. Este segundo cálculo, que se destinó a confirmar la seguridad al deslizamiento del cuerpo de presa con datos del material colocado, está incluido en el *Estudio del comportamiento dinámico de la presa de Tous*, realizado bajo la dirección de José Luís Utrillas.

La estabilidad estática de la presa se estudió en las siguientes situaciones:

- Final de la construcción: taludes de aguas arriba y aguas abajo.
- Embalse lleno: taludes de aguas arriba y aguas abajo con el embalse a las cotas 130, 145 y 162.
- Desembalse rápido desde la cota 130 hasta la cota 80: talud de aguas arriba.

Los cálculos que recogieron los datos de construcción se destinaron a predecir la estabilidad estática y la pseudodinámica. Este último estudio se realizó simulando el sismo mediante unas fuerzas estáticas horizontales equivalentes, de valor 0,10 g.

Calculo tensodeformacional

Para estimar los niveles de tensión en el cuerpo de presa bajo solicitaciones estáticas fueron varios se utilizaron modelos bidimensionales y tridimensionales.

Para el modelo bidimensional se analizó la deformabilidad de los materiales de la presa bajo distintas solicitaciones, resolviéndose las situaciones acerca de los movimientos, tensiones y deformaciones de la presa en diferentes supuestos referidos tanto a las etapas constructivas como a la situación de su explotación. Para simular el comportamiento de los materiales se utilizó un modelo hiperbólico tensión-deformación.

Por lo que respecta al modelo tridimensional, se optó por la utilización de dos tipos diferentes de elementos: por un lado 2.206 elementos de tipo Solid (tridimensionales de 8 nodos) y por otro, 64 elementos tipo Shell (bidimensionales de 4 nodos). Para los cálculos se utilizó un programa desarrollado por el profesor Edward L. Wilson de la Universidad de California en Berkeley que asume una relación elástica entre tensiones y deformaciones.

Cálculo de la torre de acceso

La hipótesis de que la torre se mueve y deforma solidariamente con el cuerpo de presa supone que, para dimensionar sus elementos, se precisa conocer con suficiente aproximación las tensiones y deformaciones en el material de la presa alrededor de la torre. Para ello se acometió un análisis por elementos finitos contemplando distintas situaciones con dos secciones: una perpendicular al eje de presa y otra normal a esta. Para este cálculo se utilizó un modelo elástico-lineal en deformación plana, simulando tanto la construcción de presa como el llenado del embalse por etapas.

Para caracterizar los materiales del cuerpo de presa, los parámetros de deformación teóricos fueron contrastados y calibrados con los datos reales que se iban obteniendo en el proceso de auscultación de la presa a la cota 100.

Modelización contactos núcleo - hormigón

Dada la especial transcendencia y singularidad que para esta presa representan los contactos del núcleo impermeable con los estribos de la antigua, así como con otras estructuras de hormigón contra las que apoya (el desagüe intermedio y el aliviadero), se dedicó una particular atención a su estudio. Al efectuar un análisis numérico, no solo se ha tratado de prever su comportamiento sino también de valorar la incidencia de algunos aspectos constructivos con el fin de verificar la seguridad de la presa frente a una posible fracturación hidráulica.

Los cálculos dinámicos

El primer paso para acometer el cálculo dinámico fue realizar un estudio de las **solicitaciones sísmicas**, determinando tanto los parámetros que caracterizan a los terremotos de comprobación como los espectros y los acelerogramas asociados a cada uno de ellos. En el caso de Tous se contemplaron los siguientes terremotos:

- Terremoto Máximo de Comprobación. Igual al Terremoto Máximo Creíble (TMC), siempre que sus efectos no sean menores que el terremoto de un período de retorno de 1.000 años (TP1.000). La presa o estructuras sometidas al TMC pueden sufrir daños importantes, siempre que no haya desbordamiento catastrófico del embalse ni desorganización general del cuerpo de presa.

- Terremoto Básico de Explotación (TBE). Terremoto con un período de retorno de 150 años (TP150). La presa o estructuras sometidas al TBE deben mantener intacta su funcionalidad, aunque pueden sufrir daños menores, fácilmente reparables.

- Terremoto de Comprobación Estructural (TCE). Terremoto con un período de retorno de 1.000 años (TP1.000). Se aceptan daños en la presa o estructuras siempre que no se produzca su colapso.

Por otro lado y para definir con exactitud la presa y su cimentación, se realizó una **caracterización dinámica de los materiales**, para lo que se realizaron tanto ensayos in situ como ensayos en laboratorio. El objeto principal de estos estudios fue obtener las curvas de diseño dinámico que permitieron conocer cómo varían los módulos de deformación y su amortiguamiento histerético.

Con estos trabajos previos se realizaron cálculos dinámicos simplificados y cálculos dinámicos por elementos finitos.

Las conclusiones referidas al **cuerpo de la presa** fueron las siguientes:

- Los movimientos permanentes que pueden resultar en la coronación de la presa tras un terremoto son estos: movimientos horizontales de hasta unos 30 cm en el TP1 000 y unos 75 cm en el TMC, en cuñas que afectan únicamente a la coronación de la presa, completamente por encima del nivel de embalse de referencia (cota 130).
- Los movimientos horizontales esperables en cuñas que atraviesen al núcleo en todo su ancho a la cota de embalse de referencia (cota 130) son, a lo sumo, de unos 5cm en el TP1000 y pueden alcanzar unos 30 cm en el TMC. Estos valores pueden verse incrementados por efecto de la pérdida de resistencia en el filtro de aguas arriba, que puede licuar en los terremotos de cálculo.
- Los movimientos horizontales previsible en el TP1 000 son moderados o incluso pequeños y se comparan muy favorablemente con el límite propuesto por Seed para ser considerados un problema (90 cm aproximadamente). No comprometerán la seguridad de la presa ni requerirán actuaciones importantes en ella tras este terremoto.
- Los movimientos previsible en el TMC son relativamente grandes, pero se considera que no pondrán en peligro la seguridad de la presa, aunque puedan ser necesarias reparaciones de cierta importancia en la coronación y sus proximidades.
- Si el terremoto moviese la falla de Tous o la de Sumacàrcer, la presa sufriría deformaciones acompañando al movimiento en la zona de falla, pero sería estable. Podrían producirse fugas por el cimientado e incluso un cizallamiento del núcleo, pero no de los filtros por no ser cohesivos.
- El fallamiento de la cerrada podría afectar al aliviadero, especialmente si se mueve la falla de Sumacàrcer. También se podría producir la rotura de alguna galería, pero no afectaría al desagüe intermedio.
- Tanto para el TP 1000 como para el TMC es de esperar que se produzca la licuación del filtro saturado de aguas arriba. No obstante, y dada la pequeña contribución del filtro a la estabilidad resistente de la presa, no influiría de manera decisiva en el daño que pudiera producir el sismo en la misma.

Por lo visto anteriormente, puede concluirse que en ningún caso el terremoto sería capaz de rom-

per la presa, liberar el embalse y crear una avenida de aguas abajo.

Los cálculos destinados a evaluar la afección de un sismo en **las estructuras** arrojaron las siguientes conclusiones:

En el grupo formado por la torre de toma, la pila intermedia y la torre de compuertas se observa que el dimensionamiento y armado de las tres estructuras es correcto y cumple las condiciones definitivas de los dos terremotos de comprobación. En todos los cálculos ejecutados se han obtenido esfuerzos y desplazamientos máximos tales que no comprometen la estabilidad y funcionalidad de las estructuras.

En la pasarela de acceso a torres, el máximo desplazamiento absoluto obtenido en el cálculo ha sido de 24 cm. Por ello se considera que existe una garantía tal que no se producirá una rotura irreparable y que la funcionalidad queda asegurada tras la ocurrencia del terremoto.

En el desagüe intermedio, los cálculos confirman que se mantiene la funcionalidad de la estructura estudiada frente a la acción del TMC.

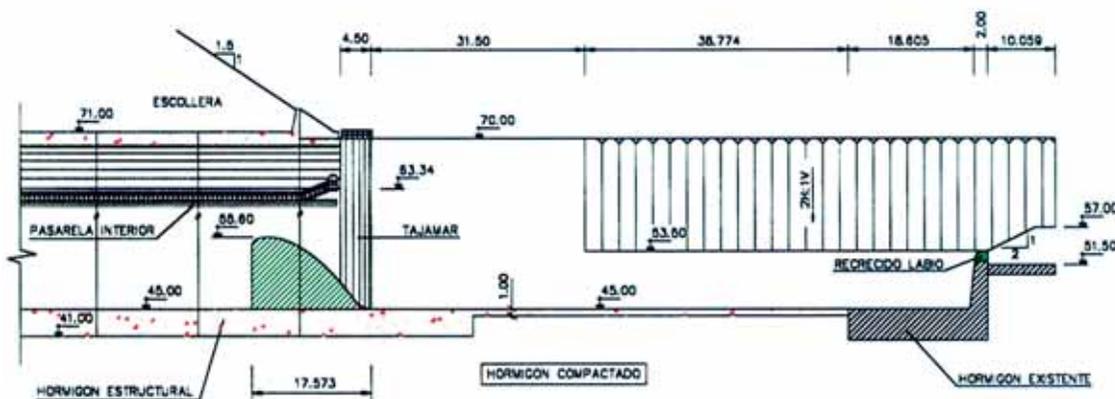
El aliviadero se estudió en sus diferentes apartados. Sobre los muros de embocadura todos los métodos indican que tienen coeficientes de seguridad superiores a los considerados habitualmente como admisibles, lo que garantiza su buen funcionamiento durante la actuación del terremoto de comprobación. Con respecto al puente sobre el aliviadero, hay que indicar que presentó unos cálculos más complejos por su tipología. El resultado de estos estudios fue la toma de estas decisiones: se redimensionaron los elementos de suspensión y anclajes con las sollicitaciones dinámicas establecidas y se coartó la libertad de movimientos de dicha estructura, encastrándola en los apoyos laterales.

Los ensayos en modelo reducido

Estos estudios se realizaron para comprobar el funcionamiento hidráulico de los diferentes órganos de desagüe de la presa.

Desviación del río durante la construcción de las obras

Este primer trabajo se realizó para conseguir que lo que iba a ser el desagüe intermedio, funcionara en la fase inicial como un aliviadero capaz de desaguar en torno a los 5.500 m³/s en caso de avenida. Para comprobar su comportamiento, se efectuó el



Perfil longitudinal por eje conducto de salida del desagüe intermedio
Escala 1:1000

ensayo en modelo reducido en el Laboratorio Nacional de Engenharia Civil de Lisboa.

La institución citada construyó un modelo a escala 1/60 en el que se mostraba la estructura del desagüe intermedio parcialmente ejecutada, según las previsiones del proyecto. El estudio debía emitir conclusiones sobre dos aspectos: en primer lugar si era necesario o no construir estructuras provisionales para mejorar el funcionamiento hidráulico y para aumentar la capacidad de desagüe; en segundo lugar, saber qué efecto tendrían la ejecución de determinadas obras sobre la capacidad de desagüe en esa fase inicial.

Los ensayos ejecutados permitieron comprobar la formación de ciertas perturbaciones en el flujo en la zona de entrada, particularmente junto al cajero izquierdo, pero que no implicaban disminución de la capacidad de desagüe. También aconsejaron realizar diferentes modificaciones que, una vez consideradas, lograban que esta estructura parcialmente construida funcionara de forma totalmente correcta incluso para caudales de desagüe más elevados de los previstos.

Aliviadero

El ensayo, que se realizó en el CEDEX, debía analizar estos elementos:

- En la obra de embocadura, venía determinada la curva de niveles de embalse-caudales de descarga.
- En el canal de descarga se precisaba un análisis de los fenómenos ondulatorios, un estudio de las

necesidades de aireación y la obtención del perfil correspondiente al máximo caudal de descarga.

- En la obra de reincorporación al cauce era preciso confirmar el funcionamiento del trampolín, las condiciones de lanzamiento, las erosiones en el cauce y la sensibilidad del comportamiento hidráulico del aliviadero frente a posibles variaciones de niveles del río.

El modelo reducido, que se construyó a escala 1/80, se puso a prueba con una extensa gama de caudales, detectándose algunos problemas en el diseño original, lo que provocó varias correcciones que fueron llevadas a la práctica.

Desagüe intermedio

En este caso, el ensayo en modelo reducido se realizó en el Laboratorio Nacional de Engenharia Civil de Lisboa y, debido a las especiales características de este desagüe, se construyeron dos modelos, uno a escala 1/60 para estudiar todo el desagüe y otro a escala 1/30 para analizar los conductos.

Aliviadero y desagüe intermedio en funcionamiento conjunto

Una vez optimizados por separado el funcionamiento hidráulico del aliviadero y el desagüe intermedio, se consideró conveniente realizar un estudio del funcionamiento conjunto, pese a que durante la explotación de la presa no está previsto que esto pueda suceder.

Este nuevo ensayo se realizó en el CEDEX con los

modelos a escala 1/80 utilizados previamente y, desde los primeros ensayos, se detectó que para el adecuado funcionamiento de los desagües tenían una importancia esencial los niveles a pie de presa.

En efecto, se comprobó que, para caudales inferiores a 2.500 m³/s, el control de niveles a la salida de los túneles se encontraba en la sección del cauce inmediatamente aguas abajo del desagüe intermedio, con cota teórica 57,00. Para caudales superiores, en cambio, se verificó que el amortiguamiento de energía era bueno y que el chorro producido por el trampolín de lanzamiento del aliviadero no afectaba al funcionamiento del desagüe intermedio. A pesar de ello, podían producirse riesgos de cavitación en la zona de los dientes de rotura de energía, pues el resalto se barría hacia aguas abajo, máxime si por efecto de erosiones se variaba la cota de la sección del cauce de la teórica prevista.

Por todo ello se propusieron y definieron unos azudes en su zona final que alcanzarían la cota 55,60 y que conseguirían eliminar los desplazamientos del resalto. También se estudió el recrecido del labio del vertedero del antiguo aliviadero a la cota 53,50,

al objeto de facilitar el agotamiento del cuenco y permitir su inspección, comprobándose que no afectaba al funcionamiento del desagüe. Estas propuestas han sido ejecutadas recientemente en las obras de terminación de la presa.

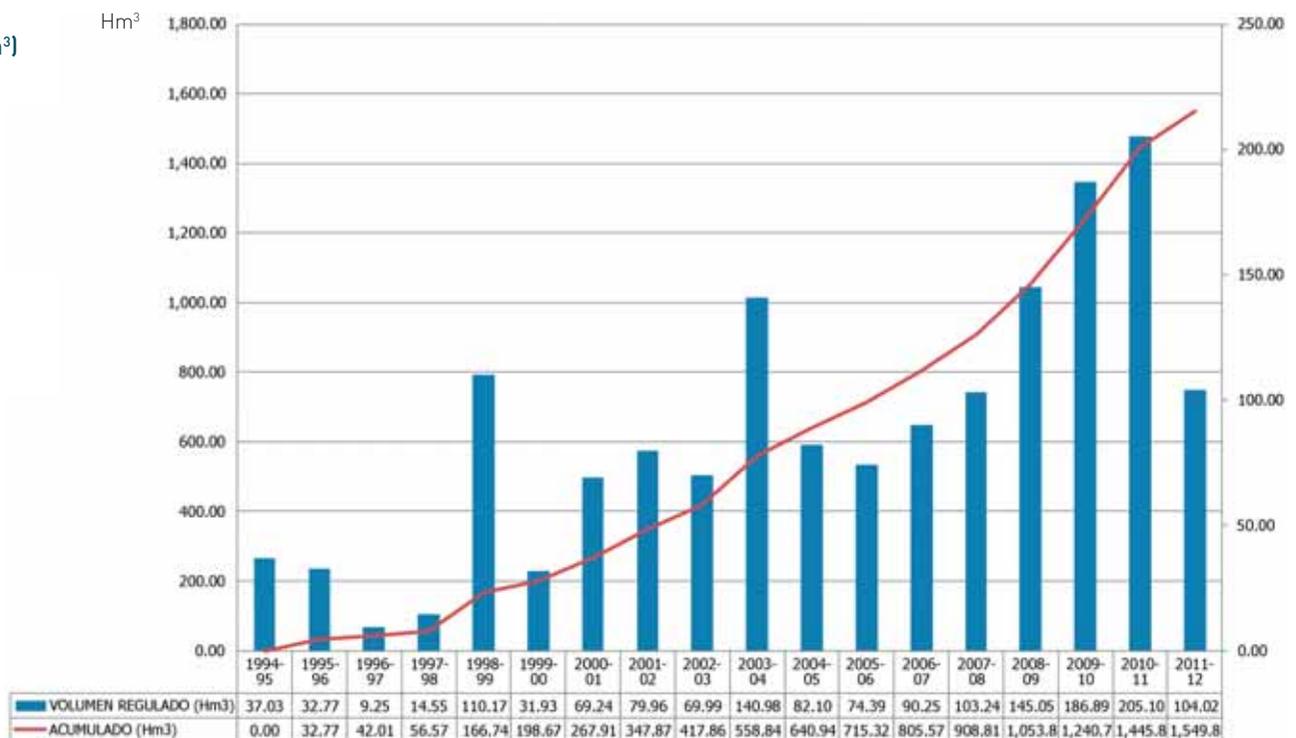
Toma de agua. Disipación de energía. Válvulas Howell-Bunger.

La conducción de toma, desde el embalse, descarga en un estanque de regulación mediante tres conductos de 1.500 mm de diámetro controlados por válvulas Howell-Bunger que funcionan sumergidas, descargando en un cuenco amortiguador de energía.

El proyecto de construcción preveía la disposición de dos válvulas, pero realizada la comprobación de cálculo con diferentes hipótesis de funcionamiento, se observó la necesidad de introducir una válvula más para garantizar el suministro en caso de posible avería de cualquiera de ellas y con cualquier nivel de embalse.

También se discutió la viabilidad de que los deflectores que se iban a disponer fuesen cónicos o cilíndricos. Por ello, y ante la necesidad de ve-

Volumen regulado embalse de Tous (Hm³)



rificar el correcto funcionamiento del sistema, se consideró conveniente la realización de ensayos en modelo reducido.

Tras diversas pruebas se concluyeron como modificaciones fundamentales las siguientes:

- Disponer un cuenco amortiguador de energía de 24 m de longitud.
- Variar la geometría de los muros separadores a la salida de válvulas: debían modificarse tanto en longitud, para disponer ataguías, como en altura, para evitar que, debido a las oscilaciones de nivel de agua, esta pasase por encima de dichos muros.
- Introducir losas deflectoras de flujo cerca del techo de los cuencos amortiguadores.
- Eliminar aletas en los deflectores.
- Introducir tres conductos de aireación por deflector con toma de aire desde el exterior.

Con todo ello se consiguió un correcto funcionamiento del sistema estableciéndose como limitación que cuando el estanque de regulación esté vacío o con nivel de agua muy bajo, deberá procederse, siempre que sea posible, a su llenado con pequeños caudales. En el capítulo 5, dentro de la

sección dedicada a los cambios en el estanque de regulación, se describe el problema surgido en las válvulas Howell-Bunger (vibraciones de gran magnitud) y la solución aportada mediante un deflector cilíndrico, construido a partir del modelo reducido, que sustituye al original, cónico.

El volumen regulado por Tous

Estamos diciendo de forma permanente que el objetivo de la presa de Tous es la laminación de avenidas. No obstante, desde la misma se suministra agua para abastecimiento humano de Valencia, su área metropolitana y Sagunto, y para el riego de más de 50.000 hectáreas de cultivo.

A estas necesidades de agua para abastecimiento y riego la presa de Tous está contribuyendo gracias a la regulación que es capaz de llevar a cabo. Desde el año 1994 en el que se cerró el túnel del desvío y la presa entró en explotación, se han regulado caudales que han supuesto un incremento de reservas del orden de 1.500 Hm³, con un valor máximo en un año de 200 Hm³, esto supone más que el volumen embalsado en estos momentos, abril 2013, entre los embalses de Alarcón, Contreras y Tous.

agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a Dragados y Ferrovial-Agroman, las empresas que se ocuparon de la construcción de la presa y que también han llevado a cabo las obras de terminación. Mi felicitación por la magnífica labor llevada a cabo.

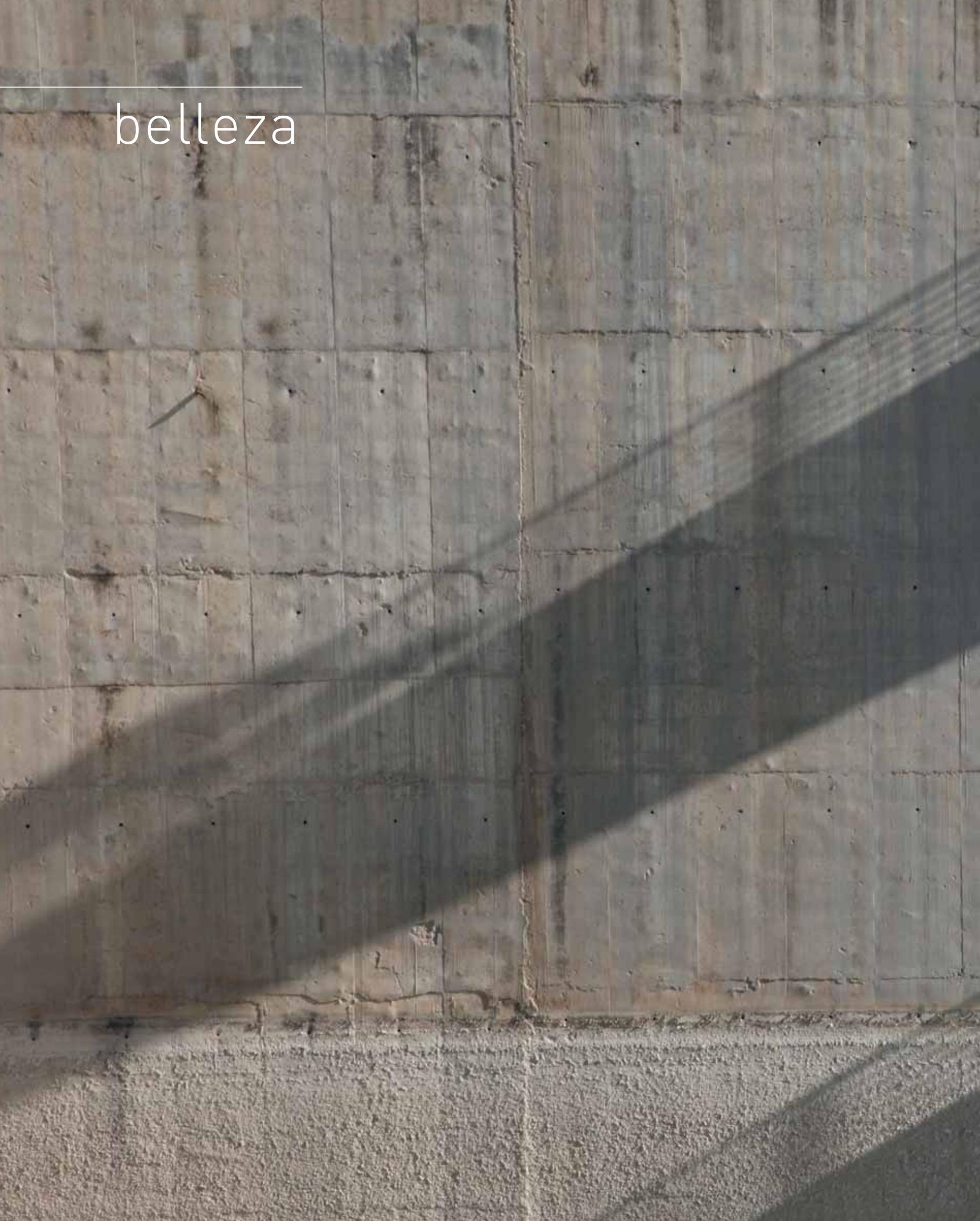
También quiero dejar constancia de mi reconocimiento a quienes trabajaron hace veinte años en la construcción de la obra que describimos en este libro: Victorino Delgado, Jorge Pacciarotti, José Luis Melgar, Luís R. Fernández, Juan Luís Blanco, Antonio Soriano y Ángel Gamo, pues sin ellos hubiera sido imposible hacerla realidad. Y debo nombrar también a quienes ahora se han ocupado de las obras de terminación: a José Valero, no solo por su eficaz ayuda en estas tareas, sino especialmente por su labor de mantenimiento y explotación de la presa. A él y a la empresa MS Ingenieros, en las personas de Francisco Javier Sopeña, David Armas, Luis Oliete y Enrique Boix, mi reconocimiento por estos nuevos trabajos y por hacer posible el nacimiento de este nuevo libro.

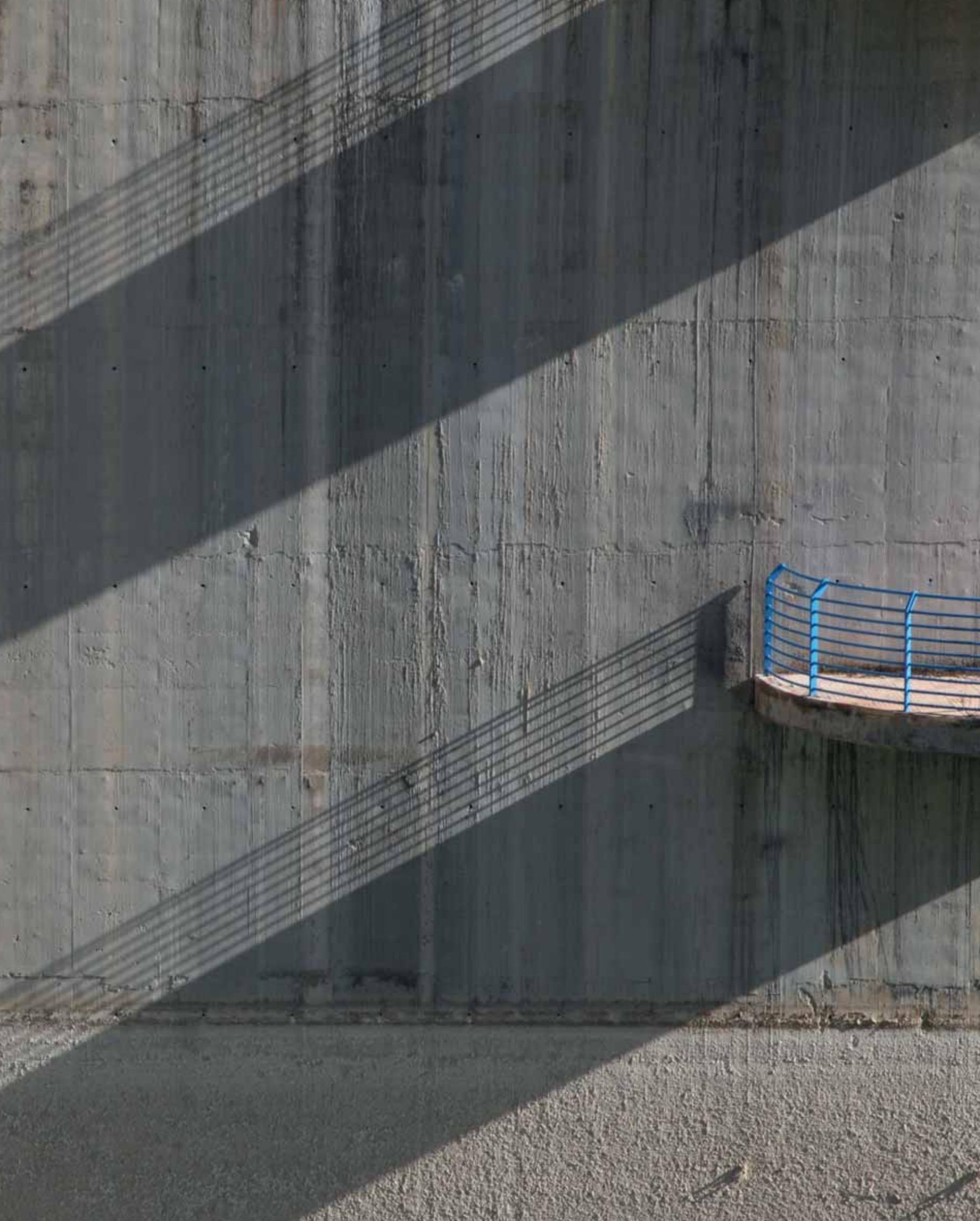
Finalmente, quiero reconocer la colaboración de Concha Baeza y Soledad Torija en esta publicación destinada a describir las obras y el funcionamiento de la presa de Tous. Ellas han redactado el capítulo I de este libro y han contribuido a dar un aire de modernidad a un texto técnico que quiere acercarse al lector con su cara más amable.

A los colaboradores de hace veinte años y a los de ahora, sinceramente, muchas gracias.

José Luis Utrillas

belleza

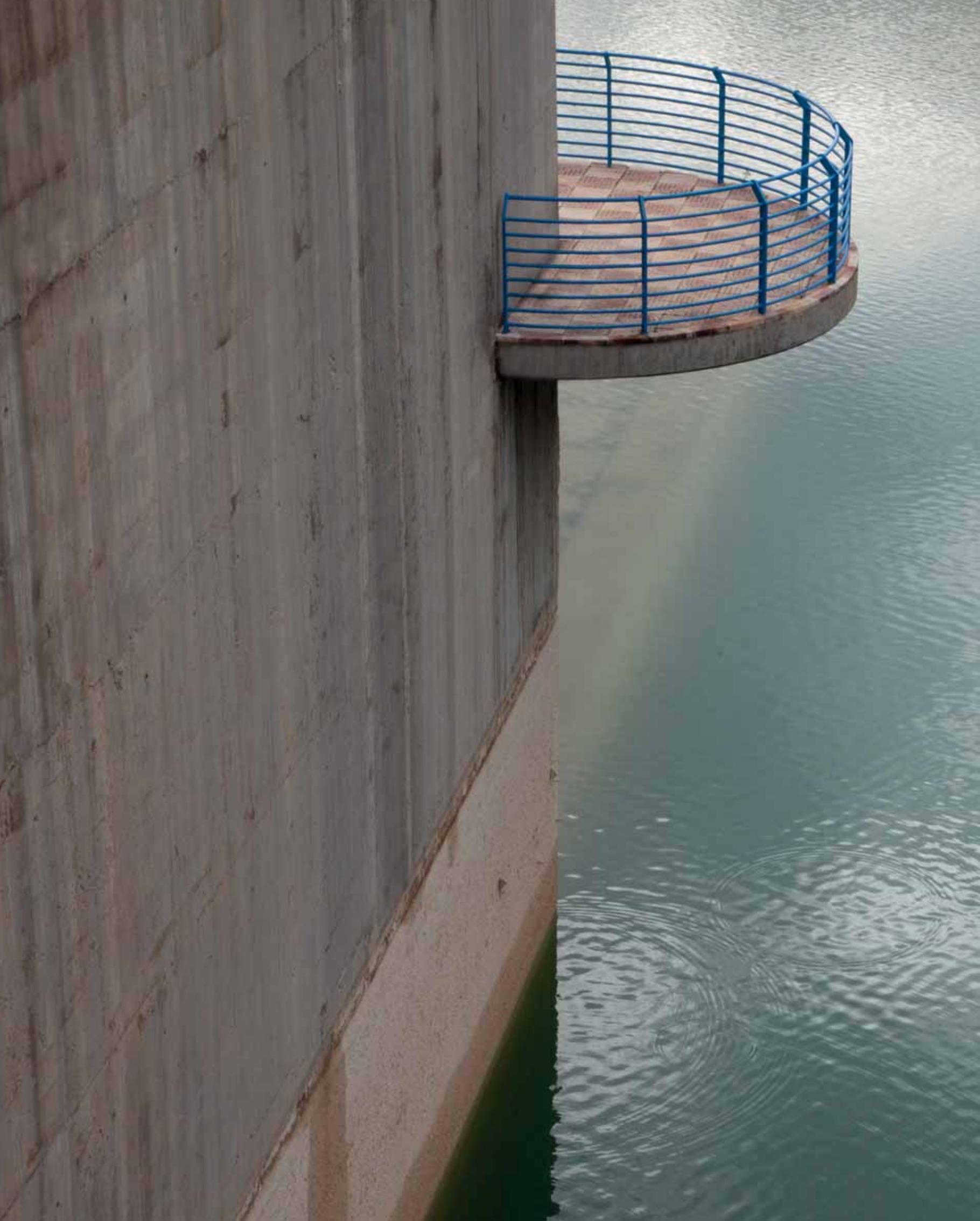






planificación







desarrollo











GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL JÚCAR