



ACUEDUCTO DE ALLOZ / PRESA DE CANELLES

AQUEDUCT AT ALLOZ / CANELLES DAM

ACUEDUCTO DE ALLOZ

El acueducto, situado en Navarra sobre el río Salado, se proyectó con la idea básica de evitar la fuga de agua debido a la aparición de fisuras en el cajero. Torroja concibió una estructura a base de tramos de 40 m de longitud —de directriz parabólica— apoyados sobre dos soportes separados entre sí 20 m, lo que suponía que los extremos del dintel quedaban en voladizo, 10 m a cada lado del soporte. Conseguía de esta manera un adecuado reparto de esfuerzos en la estructura: los momentos debidos a la flexión de la viga son negativos en toda su longitud, nulos en los extremos de las ménsulas y en el centro de la viga central, y máximos sobre los apoyos. Esta disposición estructural permite, mediante un postensado longitudinal de los bordes superiores, conseguir compresiones longitudinales en toda la sección; además la compresión es mayor en la parte inferior de la sección, precisamente donde mayor es la presión del agua.

El estado de compresión transversal —en el paramento interno en contacto con el agua— se conseguía mediante la colocación de unos tensores de rosca, separados entre sí 4 m, en los bordes superiores de la U que constituye la sección. La actuación sobre los tensores produce compresiones en el paramento interno y tracciones en el externo, soportadas por la armadura exterior.

Torroja, que no disponía de sistema de anclaje ni de puesta en carga de los cables, se las ingenió una vez más para solucionar el problema que le planteaba el postensado longitudinal: dispuso un ensan-

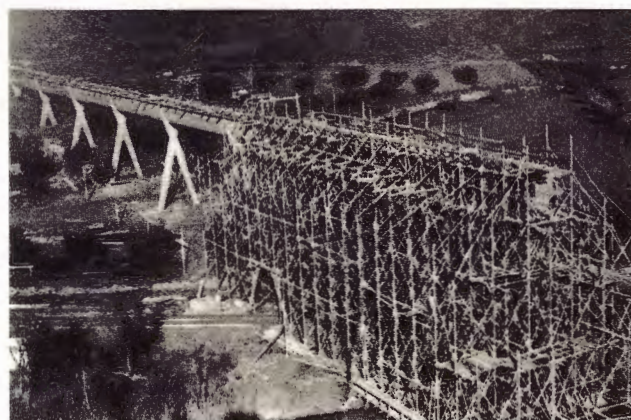
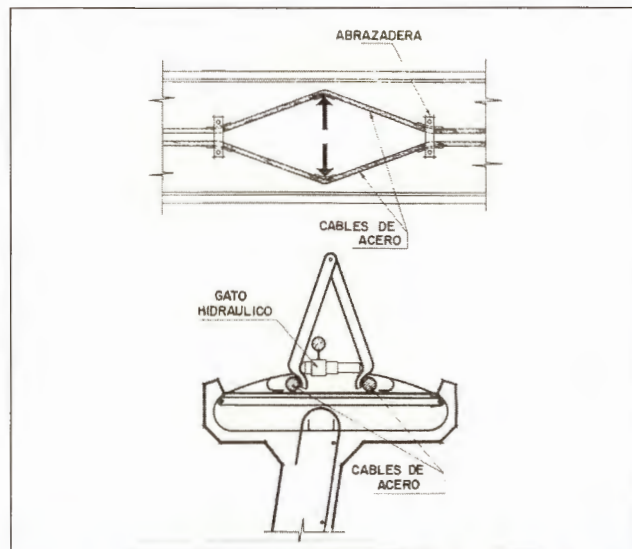
AQUEDUCT AT ALLOZ

Torroja's primary concern in the design of this aqueduct, built over the Salado River in the Spanish province of Navarre, was to prevent leakage due to fissures in the channel. The basic structural unit was a 40-m length of essentially U-shaped channel resting on two struts spaced at 20-m intervals in such a way that it would cantilever for 10 m on one side of each strut. This ensured a suitable load distribution, with bending moments that were negative along the entire length, nil at the ends of each cantilever and at mid-span between struts, and highest over the struts. Such a structural design, in conjunction with longitudinal post-tensioning along the upper edges, provides for longitudinal compression across the whole section. Moreover, the maximum compression is at the bottom of the section, where the water load would be greatest.

Provision was made for horizontal compression on the inner surface in contact with the water by positioning threaded tie rods at 4-m intervals across the top of the U-shaped channel. The load on the tie rods transmits compression stress to the inner, and tensile stress to the outer surface of the channel, which is borne by the outer-most reinforcement steel.

Torroja's ingenious solution for anchoring the twisted steel wire ropes used for longitudinal post-tensioning consisted in separating the wires at the end of each length, bending them into hooks and





chamamiento en las cabezas de los costeros de la sección en los que situaba un par de cables de alambre trenzado, que anclaba, mediante doblado en forma de gancho, a los costeros al hormigonarlos.

Los cables se sujetaban entre sí en dos puntos fijos, a modo de llaves, y en el punto medio entre ambos, mediante un aparato de tijera accionado con un pequeño gato hidráulico, se introducían dos fuerzas iguales y contrarias que aumentaban la separación entre los cables a la vez que se acortaba la distancia longitudinal entre las llaves. Cuando se alcanzaba la tracción prevista se colocaba un separador que mantenía los cables en posición. La anchura del cajero limitaba la separación máxima y por tanto la presión en el gato: en el caso de que no se hubiese alcanzado la presión prevista se repetía la operación en otra zona de la misma pareja de cables.

Los cables postensados se cubrían provisionalmente con arena, se comprobaba la presión transcurridas algunas semanas —y se corregía si era necesario debido a las pérdidas por fluencia del acero o retracción del hormigón—, y finalmente se hormigonaban los cables y la obra concluía cerrando las juntas entre ménsulas.

Los soportes, potentes y elegantes, conforman el conjunto de la estructura, y están formados por dos patas inclinadas que se prolongan en su parte superior abrazando la sección del cajero, por lo que además de un apoyo constituyen un verdadero refuerzo de la sección.

PRESA DE CANELLES

La Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana, concebida para el aprovechamiento integral de la cuenca del río Noguera Ribagorzana, y de la cual Torroja fue presidente desde su constitución en 1946 hasta su muerte, encargó, en 1956, el proyecto de esta presa en la provincia de Lleida.

anchoring them to the wings as the concrete was poured. The method for loading the ropes, which was no less ingenious, called for widening the upper edges or wings of the U-channel.

After the two ropes in each wing were clamped together at a certain distance, a pivot lever actuated by a hydraulic jack was positioned midway between clamps. The equal and opposite forces applied with this device separated the ropes and thereby shortened the inter-clamp distance. When the design tensile stress was reached, a spreader was placed between the two ropes to hold them apart permanently. Since the maximum separation between ropes and therefore the load measured by the jack were limited by the width of the channel wing, this operation was repeated as needed along the two ropes until the required load was reached.

The post-tensioned cables were provisionally covered with sand. The ropes were checked for load a few weeks later, corrected as necessary for losses due to steel creep or concrete shrinkage, and concreted. The work could then be completed by sealing the joints between adjacent cantilevers.

The upper arms of the strong, elegantly X-shaped struts that constitute the understructure grip the channel section, providing structural reinforcement in addition to support.

CANELLES DAM

The design of Canelles dam, located in the province of Lleida, was commissioned in 1956 by Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana, a state-owned hydroelectric company chartered for the comprehensive exploitation of the Noguera Ribagorzana river basin and presided by Torroja from its inception in 1946 until his death.

ACUEDUCTO DE ALLOZ

1939

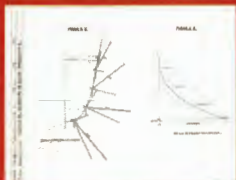
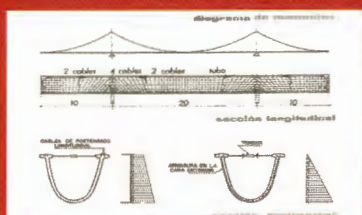
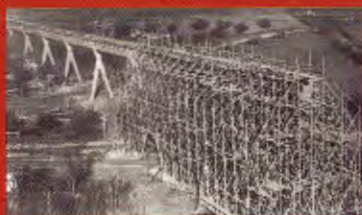


«La idea fundamental de este acueducto es la de suprimir la posibilidad de fisuración y de fugas, haciendo que el paramento en contacto con el agua esté sometido a compresión en todos los sentidos.

Para conseguir este resultado el acueducto está formado por elementos de 40 m de longitud apoyados sobre soportes a 20 m. De este modo, los momentos debidos a la flexión de la viga son negativos en toda su longitud; son nulos en los extremos de las ménsulas y en el centro de la viga central, y máximos sobre los apoyos. Basta, por consiguiente, establecer un postensado de los bordes superiores para lograr, en todas las secciones, leyes de compresiones longitudinales, que abarcan toda la sección y que son mayores abajo, donde la presión del agua es también mayor.»

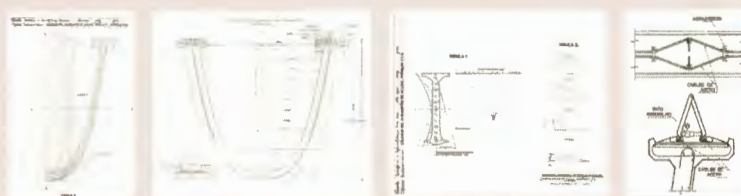
«Para lograr compresiones en la pared interior según la directriz normal a la directriz o longitud del tramo se disponen barras transversales en los bordes superiores de las U que forman la sección. Estas barras, distanciadas a 4 m unas de otras, llevan tensores de rosca. Al actuar sobre ellos, se producen momentos flectores transversales de la pared que producen también compresiones crecientes hacia el fondo. La armadura exterior queda en tracción y resiste no sólo estos momentos transversales, sino también, en los costeros los esfuerzos cortantes correspondientes a la flexión longitudinal de ménsulas y vigas. Estas armaduras transversales se encargan, por último, y especialmente en el fondo, de resistir las tracciones transversales que se producen al quedar este fondo, en cierto modo, colgando de los costeros que funcionan como las almas de la viga longitudinal o de las ménsulas.»

«Los soportes están formados por dos patas inclinadas que dan un cierto carácter al conjunto asegurando perfectamente su estabilidad. Los soportes se prolongan en forma de U alrededor de la sección, formando un arco de refuerzo y de sustentación de la viga con sus ménsulas. Vigas y ménsulas trabajan como una lámina cilíndrica entre los arcos de apoyo. Para la sección se eligió una curvatura en parábola de tercer grado, que da una buena sección hidráulica, y al mismo tiempo, una forma resistente aceptable.»



«Para lograr fácilmente el postensado longitudinal, se dispusieron dos pares de cables a lo largo de las cajas que forman las cabezas de la U, las cuales, a su vez, sirven de pasarelas o caminos de servicio, y de elementos de rigidez en los tirantes transversales.

Estos cables quedaban anclados en las paredes desde el momento de hormigonar el conjunto. Una vez que el hormigón había adquirido la resistencia prevista se tesaba cada pareja de cables por el siguiente procedimiento: los dos cables se sujetaban entre sí en dos puntos mediante llaves; después, en el punto medio entre estas dos llaves, se introducían dos fuerzas iguales y contrarias tendiendo a aumentar la separación de los cables y a acortar la distancia longitudinal entre las llaves. Esta operación se hacía fácilmente con un aparato de tijera entre cuyos brazos actuaba un pequeño gato hidráulico. Un ábaco preparado al efecto permitía determinar la tracción a que estaban sometidos los cables en función de la abertura alcanzada y de la presión del gato. Cuando se había llegado a la tracción prevista, se colocaba un separador que mantenía los cables en esa posición; y si era necesario, se repetía la operación en otro punto.»



PRESA DE CANELLES

1956



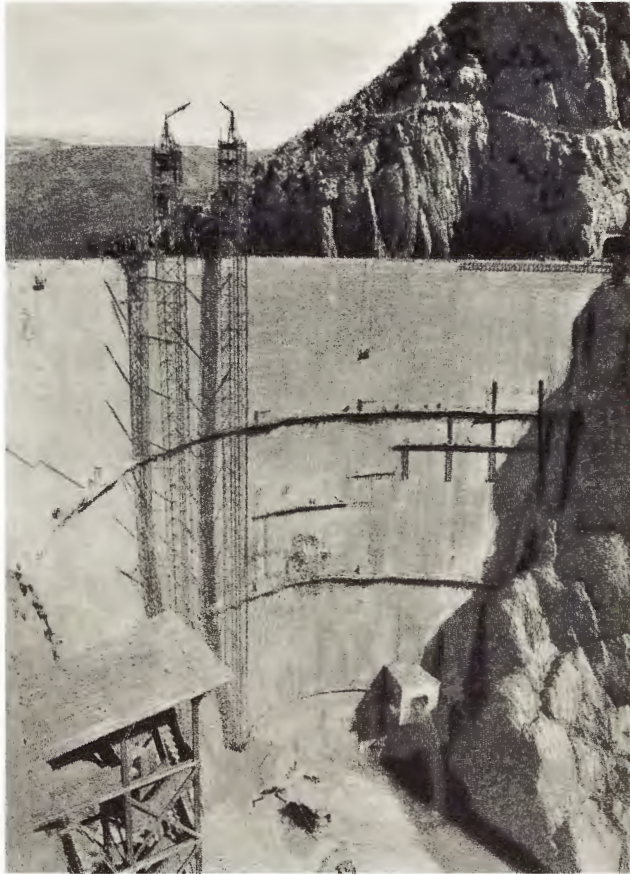
«Esta presa, de 140 m de altura, fue estudiada experimentalmente en 20 modelos reducidos sucesivos. Los resultados obtenidos de cada ensayo servían para determinar las variaciones de forma que convenía introducir; y esta forma era nuevamente experimentada.

Los modelos iniciales se fabricaron con un material fácilmente moldeable; y servían solamente para determinar si era capaz de resistir o no la acción de su peso y la de la presión del agua del embalse.

Los siguientes modelos se hacían sobre otro material que permitía registrar la dirección de las isostáticas (o tensiones principales) en ambos paramentos de la presa. Se determinaban después, mediante galgas extensiométricas, las intensidades de estas tensiones con precisiones que representaban en la obra real 2 kg/cm².

El estudio se dió por terminado cuando se obtuvo una forma que acusaba compresiones máximas de 60 kg/cm², y tracciones prácticamente nulas en el paramento en contacto con el agua. El material del modelo, fabricado ex profeso en cada caso permite fabricar el cuerpo de la presa y el terreno con la relación de módulos de elasticidad correspondiente a la realidad, para lo cual se hicieron previamente las oportunas medidas del módulo del terreno. La medida de tensiones bajo carga demostró las ventajas del método experimental desarrollado.»





Se trata de una presa bóveda de 140 m de altura y en la que se acometió un pormenorizado estudio experimental desde el comienzo del proyecto.

This 140-m high arch dam was the subject of detailed experimental studies from the outset.

Se ensayaron un total de veinte modelos diferentes, y el proceso consistía en la realización de un modelo, en el que se analizaban los resultados obtenidos y éstos se tenían en cuenta para la modificación de la forma del modelo siguiente, que era sometido a nuevo proceso de análisis.

Twenty different scale models were tested in all: the process consisted in building one model and using the results obtained in the analysis to design the shape of the next, which was subjected to further testing.

Los primeros modelos estudiados se realizaron con un material fácilmente moldeable pues únicamente servían para comprobar que la forma era adecuada las solicitaciones debidas al peso propio y al empuje hidrostático del agua del embalse.

A readily mouldable material was used in the initial models, which were intended solely to verify whether the shape was appropriate to withstand the stress due to the dam's own weight and the hydrostatic pressure of the water in the reservoir.

Los modelos posteriores se hicieron con un material capaz de manifestar la dirección de las tensiones principales en los paramentos de la presa. Para determinar la intensidad de las tensiones, el modelo estaba dotado de las correspondientes células de medida que permitían una precisión equivalente en la realidad a $\pm 2 \text{ kg/cm}^2$.

Subsequent models were built with a material that showed the direction of the main stresses on both sides of the dam. Strain gauges able to measure stress intensity to a precision of $\pm 2 \text{ kg/cm}^2$ were also deployed in the experiment.



Para tener en cuenta el módulo de elasticidad del terreno, puesto que estos modelos incluían el terreno de sustentación de la estructura, y conseguir una relación adecuada en el modelo con el de la presa, se realizaron las medidas pertinentes.

El estudio experimental concluyó cuando la forma del modelo estudiado presentaba tracciones prácticamente nulas en el paramento de aguas arriba y compresiones máximas de 60 kg/cm².

El cálculo de la presa por el método «trial load» confirmó la adecuada concepción formal de la estructura.

Esta técnica de comprobación experimental en modelo reducido aplicado al estudio de formas laminares de cálculo complejo, permitía a Torroja una gran libertad en la concepción de sus amadas estructuras laminares.

The ground that was to support the structure was also tested in these models. Consequently, all relevant measurements were taken to ensure that in the model the relation between the moduli of elasticity of the terrain and the dam was acceptable.

The experimental study was completed when the shape of the model studied was such that the tensile stress on the upstream face of the dam was virtually nil and the maximum compressive stress was on the order of 60 kg/cm².

The strength of the dam in its final experimental form was checked by the trial load method and found to be adequate.

The use of scale models for empirical verification was later applied to study shells whose shapes defied conventional structural engineering, affording Torroja greater freedom of design for the shell forms of which he was so fond.

