

El progreso de la técnica de las grandes presas de fábrica

En el viaje por el Extranjero, como pensionado de fin de carrera de la Escuela de Caminos, tuve ocasión de tratar a Henri Juillard. Conocía ya su obra; la exposición de su método de cálculo de presas bóvedas, desarrollada en la Revista «Schweizerische Bauzeitung» (diciembre, 1921); la discusión que con Stucky mantuvo cuando éste expuso su método y que tanto contribuye a valorar el mismo, y su campo de aplicación y finalmente su magnífica realización: la presa de Grimsel.

Unos días estuve en Berna, conociendo sus trabajos que, con modestia ejemplar, él me enseñó y explicó, sin darles valor, modestia que está condensada en la frase respuesta a mi admiración por su labor "cinco años de trabajar todos los días". Su figura, para mí ya gigantesca, se agrandó con el conocimiento de la persona y de su obra, y fué la misma Berna la que me hizo comprender su personalidad. Berna, contacto de dos culturas, frontera de dos razas: sajona y latina, en donde se habla francés y alemán indistintamente, no podía ser otra la patria de quien es sajón por su voluntad, tesón y capacidad de trabajo y es latino por su agilidad intelectual, rapidez de percepción y comprensión.

Pude conseguir vencer su excesiva modestia para que se decidiera a dar a conocer sus formidables trabajos, y le ofrecí las columnas de nuestra Revista. Hoy llega el primer trabajo y me cabe la honra de prologarlo y además de iniciar con esta fase el paso del técnico de la Bernischen Kraftwerke a Ingenieur-Conseil del que tanto en bien de la técnica por su sólida base y clara inteligencia cabe esperar.

JOSÉ JUAN ARACIL.
Ingeniero de Caminos.

El primer Congreso Internacional de Grandes Presas, celebrado en el verano de 1933 en Estocolmo, marca el principio de una nueva etapa en el desarrollo de los conocimientos relativos a las presas de fábrica. Respondió esta Conferencia, tanto a los deseos de los constructores y propietarios de las presas, como a los de las autoridades responsables de la inspección de obras de tal importancia, siendo el fin intercambiar las experiencias realizadas en distintas partes.

No se pueden valorar los resultados alcanzados por un Congreso de esta clase, al que cada cual llevó conocimientos e intereses diferentes. No es, por otro lado, en las discusiones públicas en donde se establecen las bases científicas de nuestros conocimientos; sólo estudios pacientes y largos conducen a estos resultados. Lo que cabe esperar de un Congreso es el llamar la atención general sobre puntos particularmente importantes. Sobre esto, la Comisión Internacional de Grandes Presas ha obtenido en su primer Congreso un gran éxito. Se la puede felicitar sin reservas por su iniciativa y de haber llevado súbitamente al campo internacional el estudio de cuestiones técnicas aún poco conocidas. Cabe esperar que nuevos Congresos

contribuirán a poner en evidencia el interés primordial que hay, tanto del punto de vista económico como de seguridad pública, de desarrollar y de propagar los conocimientos relativos a grandes presas.

El programa de Estocolmo fué restringido. En lugar de una discusión general sobre el conjunto de las cuestiones fundamentales relativas a las presas de fábrica, se puso en el orden del día el estudio de dos cuestiones bien elegidas, para reunir los resultados de la experiencia. La discusión se circunscribió a las presas-gravedad, es decir, a un tipo de presa, respecto a la que no debía haber ninguna divergencia de concepción estática, pues el cálculo de su estabilidad es sencillo y conocido desde hace muchas décadas.

Otra cosa hubiera sido en el caso de otros tipos de presas, en donde el proyecto exige conocimientos muy especiales y sobre los cuales la literatura técnica presenta a veces grandes lagunas. La inclusión en el orden del día del primer Congreso de estas cuestiones tan importantes, no hubiera conducido sin embargo a ningún resultado práctico por falta de conocimientos y experiencias suficientemente extendidas.

La primera cuestión sometida a discusión, la deteriorización, por vejez, de las presas gravedad ha permitido reunir una documentación de valor sobre las desgraciadas experiencias de distintos países con hormigones no lo suficientemente resistentes a las condiciones climatológicas que tenían que resistir o insuficientemente impermeables. La resolución votada como conclusión, al final de la discusión, enuncia las condiciones elementales sobre las cuales conviene concentrar la atención, al establecer un proyecto de presa, para evitar la deteriorización del hormigón. Importaba ante todo hacer conocer los gastos y pérdidas de dinero ocasionados por disposiciones iniciales deficientes; después se podrá tratar de formular las reglas que permitan proyectar y realizar las presas del modo más racional teniendo en cuenta las condiciones a las cuales ha de estar sometida. La publicación de los resultados de las experiencias habidas contribuye a alcanzar este fin.

El objeto de la segunda cuestión discutida en Estocolmo, la influencia de la temperatura y la deformación de las presas gravedad, se presta actualmente aun menos que la cuestión de vejez del hormigón al establecimiento de conclusiones concretas. La construcción de aparatos de medida para determinar la temperatura del hormigón y los movimientos de la presa, por muy interesante que sea no justifica ello solo la convocatoria de un Congreso internacional. Pero estos aparatos son el único medio de investigación que permitirá alcanzar por etapas el fin último¹. Los instrumentos propuestos nos darán las deformaciones efectivas de una pieza; cuando éstas sean suficientemente conocidas, habrá que buscar las

¹ El autor ha publicado un estudio analizando las cuestiones relativas a la temperatura y la deformación de las presas gravedad, tratados en los principales *rappports* presentados al Congreso. Ver *Génie Civil*, 21 octubre 1933.

causas de los movimientos observados, clasificarlos, determinar la relación entre las deformaciones y las sollicitaciones y solamente entonces se podrá deducir el modo de trabajo de una presa. Este conocimiento permitirá de un lado estimar y controlar rigurosamente la seguridad de las presas existentes y de otro de dimensionar más racionalmente las nuevas. El inventario internacional recogido por el primer Congreso enseña que la técnica está en esto en sus primeros pasos.

Si el conocimiento de las temperaturas del hormigón por medio de los elementos termo-eléctricos da resultados buenos, no pasa lo mismo en los otros aparatos embebidos en el hormigón que deben marcar los movimientos elementales de la presa. Hasta la hora presente, no se conoce una serie de estos aparatos que hayan funcionado sin fallo durante un lapso de tiempo suficiente para poder sacar conclusiones prácticas. El problema mismo de la auscultación elemental de un macizo de hormigón, presenta grandes dificultades, debido a las débiles dimensiones de los testigos. Es probable, en efecto, que éstos registren no sólo el efecto medio de una sollicitación general del muro sobre la zona de hormigón que le rodea, sino también los esfuerzos internos, que varían, por decirlo así, de un elemento a otro del hormigón. Se debe pensar como probable que el testigo causa una perturbación local en la textura del hormigón, puesto que él se comporta de distinto modo que éste, tanto desde el punto de vista de la dilatación térmica como respecto a la retracción, hinchamiento o efecto Poisson.

Estas consideraciones no son en principio prohibitivas, pero conviene tenerlas en cuenta. Es necesario poner en su punto los aparatos y determinar las relaciones entre sus indicaciones y los movimientos reales. El control deberá realizarse durante un largo período, bajo diversas sollicitaciones y hacer intervenir entre otras, variaciones de temperatura y grado higrométrico del hormigón. Aun esperando que la experiencia confirme su buen funcionamiento, será prudente no utilizar los testigos elementales más que a título de ensayo y basar el control de la presa en otros procedimientos de investigación, cuya duración de aplicación sea limitada y la interpretación de los resultados más rigurosa.

Habiendo tenido ocasión de probar algunos nuevos procedimientos de medida, aplicados en 1932 a la presa de Spitalamm de las centrales de Oerhasli (Grimsel, Suiza) hemos expuesto el principio en el rapport general del comité suizo, presentado en Estocolmo. En aquella época no se pudo deducir del período de observación tan corto, otra consecuencia que la prueba del excelente funcionamiento de los aparatos y la exactitud de los resultados. Desde entonces, las observaciones se siguieron metódicamente y los resultados obtenidos en el curso de los años sucesivos dan enseñanzas muy instructivas. Además hemos tenido ocasión de aplicar nuestros métodos de medida a otras presas. Una base de comparación rigurosa ha sido así creada, que da para cada instalación resultados de gran valor y que adquirirá una importancia cada día más grande y más general con la duración de las observaciones y el número de aplicaciones realizadas.

Antes de entrar en detalle en las cuestiones referentes al control de las presas en servicio, pasaremos revista a los progresos generales realizados desde hace unos años en la técnica de las presas.

Cuestiones estáticas.

Durante largo tiempo ha prevalecido, en los técnicos, la opinión de que sólo las presas gravedad ofrecían las garantías suficientes de estabilidad y seguridad. Hoy esta convicción está aún muy extendida y tiene como consecuencia la realización de presas de gravedad en ubicaciones donde otro tipo de presa sería más racional.

Los argumentos invocados en favor de las presas gravedad son en resumen, la posibilidad de un cálculo riguroso y la estabilidad absoluta de la obra garantizada por la masa del muro. Por el contrario, los otros tipos de presas ofrecen, según sus adversarios, la desventaja de un cálculo estático aleatorio, basado sobre las propiedades tecnológicas de la materia insuficientemente conocidas y variables con el tiempo.

Esta distinción exacta en principio, es demasiado absoluta y plagada en realidad de errores procedentes del conocimiento en general insuficiente de las propiedades elásticas del hormigón y, además, de una concepción demasiado implícita del trabajo estático de un muro dimensionado como presa gravedad. En efecto:

El cálculo de la presa gravedad de perfil triangular no da resultados de conformidad perfecta con la teoría matemática de la elasticidad más que en el caso de cumplir una serie de condiciones: perfil triangular del muro, homogeneidad de la materia, ausencia de esfuerzos internos, temperatura uniformemente repartida, cimentación presentando propiedades elásticas idénticas a las del muro y trabajando como él, es decir, que pueda considerarse como prolongación del perfil triangular. En la práctica ninguna de estas condiciones se cumple y no se ve la razón por lo que esto introduzca en las presas gravedad una perturbación menos importante en la repartición de los esfuerzos que para otros tipos, una presa arco gravedad, por ejemplo.

Además, la hipótesis fundamental de la presa gravedad, elemento aislado descansando sobre base horizontal y absolutamente independiente de toda sollicitación lateral no se realiza prácticamente en las grandes presas. Por razones económicas, un muro de más de 50 m. de altura no puede presentar una longitud suficiente para que cada elemento limitado por dos puntas pueda reposar sobre una base prácticamente horizontal. En las presas de 100 m. de altura se encuentra frecuentemente una base de cimentación inclinada hasta el 100 por 100, y aun mayores. La deformación de los elementos correspondientes de la presa realizándose alrededor de un eje fuertemente inclinado, los elementos situados al mismo nivel tienen movimientos diferentes, función de su distancia al eje.

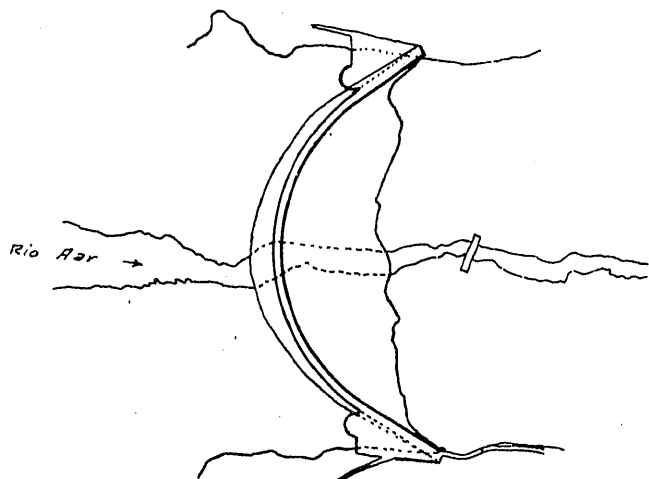
Esta deformación en el plano horizontal no puede producirse sin una sollicitación importante, más dañosa por manifestarse como esfuerzo de flexión, con tracción en el paramento de agua arriba.

Se ha propuesto, en distintas ocasiones, el construir las presas gravedad de conformidad con la teoría, en elementos separados, cimentados sobre una base en escalera, cada elemento asentado sobre un plano horizontal. En general, el sentido constructivo de los ingenieros les ha disuadido de adoptar tal disposición, que en ciertos casos, en laderas muy inclinadas, será prohibitiva. La experiencia de hacer independientes los elementos ha sido intentada en una presa

de unos 30 m. de altura en Bretaña. La deformación realizándose libremente en cada elemento, ha hecho difícil el realizar una impermeabilización suficientemente elástica y resistente.

Corrientemente se unen los elementos de la presa gravedad entre ellos a fin de impedir todo movimiento transversal relativo en las juntas. Se toma precisamente esta precaución para no someter los dispositivos de impermeabilización a un trabajo duro y no hacer depender la impermeabilidad de órganos delicados.

Haciendo los bloques de una presa gravedad solidarios para las deformaciones transversales se provoca inevitablemente una transmisión de cargas entre estos elementos; nos separamos, pues, de las hipótesis de cálculo.



Planta de la presa de arco gravedad de Spitallamm, en Grimsel (Suiza), de 114 m. de altura.

Nos daremos cuenta mejor de la importancia de esto por el estudio de un ejemplo concreto, pero quisiéramos antes examinar aún la cuestión de la estabilidad de las presas gravedad.

El argumento preponderante invocado en favor de la seguridad de las presas gravedad reside en el hecho que un muro dimensionado teniendo en cuenta las subpresiones (de 100 a 80 por 100 de la presión del agua) y con un talud de 80 a 85 por 100 no puede en ningún caso volcar. El cálculo enseña que aun considerando las subpresiones, el momento estabilizador del peso propio respecto al extremo de agua abajo de la base es 80 a 100 por 100 superior al volcador.

Este criterio de seguridad es bueno para muros de débil altura y en donde a causa de sus esfuerzos reducidos no se utiliza más que la resistencia mecánica en su estabilidad. Disminuyendo la base nos exponemos a que vuelque el muro de un bloque.

En una gran presa esto es imposible. Supongamos un gran macizo de presa apoyando solo en el extremo de agua abajo para efectuar el vuelco. El pie se destruiría por la concentración de esfuerzos antes de que el muro se levantara de su base. El eje de rotación se desplazaría hacia agua arriba y el coeficiente de seguridad calculado se reduciría notablemente.

La seguridad de una gran presa gravedad dimensionada según los conocimientos actuales depende como la de los otros tipos, de la relación de las solicitaciones efectivas a la resistencia de la materia de

la obra o de la cimentación. La ruptura de la presa de San Francisco, en California, en marzo de 1928, a pesar de su estabilidad evidente, debe ser, en efecto, atribuida a la falta de resistencia de la base.

Hace unos quince años se atribuía gran importancia a la curvatura en planta de las grandes presas de embalse para aumentar la estabilidad. Hoy las opiniones están divididas. Hay que reconocer, sin embargo, que el hecho de disponerlas en curva supone un modo de trabajo distinto del de la presa gravedad.

Para esclarecer esta cuestión de la influencia del empotramiento lateral en las grandes presas el autor ha realizado un estudio detallado de la repartición de los esfuerzos en un muro con acción combinada de los elementos verticales y horizontales (1). El método de cálculo desarrollado, basado en la aplicación rigurosa de las reglas de la estática, teniendo en cuenta todas las solicitaciones normales y tangenciales y el cálculo de las deformaciones da la solución exacta del problema de las presas bóvedas. Ha sido aplicado al cálculo de la gran presa de Spitallamm (114 m. de altura, 180 m. en longitud de la cuerda y 66 m. de espesor de la base).

Cuando se efectúa el cálculo estático riguroso de una presa de débil curvatura en planta se ve que el empotramiento lateral se manifiesta de una manera desfavorable. Nuestras investigaciones han demostrado que la inclinación de los apoyos determina la repartición de las reacciones de los elementos verticales y horizontales, y esto de una manera completamente independiente de las propiedades elásticas y de la deformación de la presa; es una condición de límite determinada únicamente por las leyes mecánicas. En una garganta en V con taludes de 100 por 100 de inclinación, la repartición de los esfuerzos debe satisfacer a la condición que las reacciones sobre los apoyos, es decir, las dos sumas de cargas que actúan por una parte sobre el elemento vertical y de otra parte sobre el elemento horizontal que se encuentran en el mismo punto deben ser iguales. Para el conjunto de la presa se debe obtener que la carga total del agua se reparta por mitad, según las proyecciones vertical y horizontal de los apoyos. Hagamos notar que la elección de dos coordenadas, vertical y horizontal, no arrastra ningún supuesto sobre la repartición de los esfuerzos; podrían elegirse otras coordenadas, lo que complicaría inútilmente el cálculo.

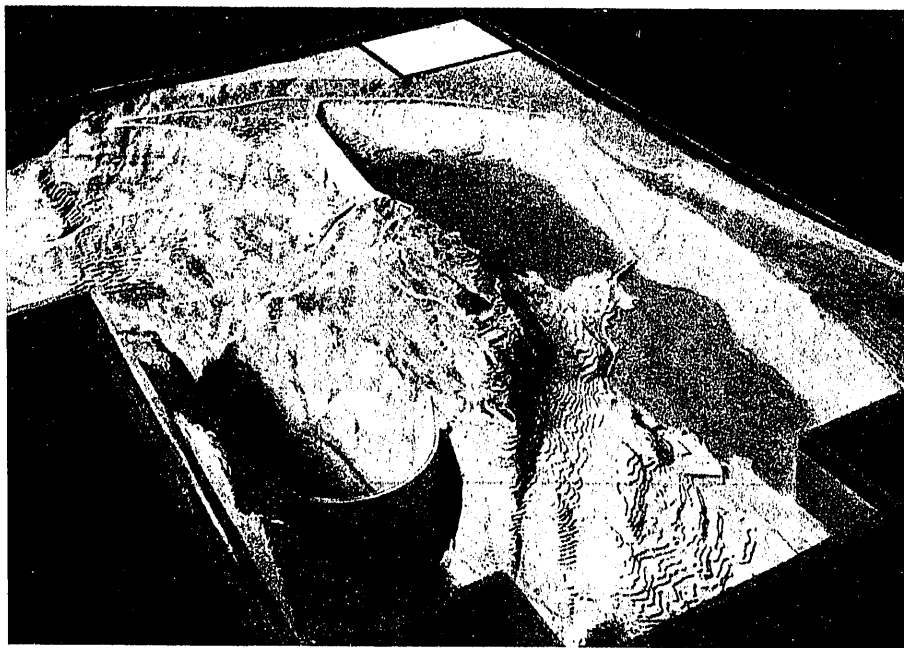
Se ve que una presa de 100 m. de altura y de la misma luz media no puede resistir como viga empotrada horizontalmente, débilmente curvada a la mitad de la presión del agua. Ocurriría fatalmente una fisuración vertical, sobre todo cerca de los apoyos. La débil acción de la bóveda, cuya línea de presiones está por fuera de la sección, llega a ser generalmente completamente ilusoria por la acción de la baja temperatura. Es necesario reducir los esfuerzos de flexión horizontales seccionando la presa por juntas verticales permanentes. Por esta medida no se evitan la concentración de esfuerzos horizontales considerables en los bloques de las laderas.

Al estudiar los proyectos de utilización de las presas de Oerhasli (Suiza), nos encontramos principalmente al estudiar la gran presa de Spitallamm, la más importante de Europa, en circunstancias que se

(1) Publicado en la *Schweizerische Bauzeitung*, diciembre de 1921.

repiten siempre que la construcción se emprende por una compañía en la que el Estado es el principal interesado; se necesitaba ante todo la mayor seguridad. Esta presa se previó de 94 m. de altura y dimensionada según el tipo clásico de presa gravedad de 85 por 100 de talud y débil curvatura en planta.

Los estudios económicos de una parte y las consideraciones estáticas antes indicadas de otra, condujeron a retirar el proyecto, a aumentar en 20 m. la altura y, finalmente, a adoptar otro tipo de presa.



Maqueta del aprovechamiento hidráulico de Grimsel.

Continuando las investigaciones estáticas, hemos demostrado que en una garganta fuertemente encajonada como la de Spitalamm, era imposible eliminar eficazmente los efectos dañosos del empotramiento lateral en una presa gravedad. El autor ha efectuado el cálculo de la deformación y las solicitaciones de un elemento de presa gravedad, limitado por dos juntas y reposando sobre una ladera fuertemente inclinada. Los esfuerzos deben repartirse en proyección vertical y horizontal, según la misma ley dependiente de la inclinación del empotramiento lateral. El resultado ha sido concluyente. En los planos verticales de la zona superior del empotramiento, los esfuerzos de tracción producidos por la flexión horizontal son del mismo orden de magnitud que los esfuerzos de compresión calculados por la teoría de presa gravedad. La seguridad supuesta al aplicar la ley de Maurice Levy (talud 0,85) para evitar tracciones en el paramento de agua arriba es pues completamente ilusoria.

Establecido este resultado, el problema se vió desde un punto de vista completamente diferente y el autor del proyecto buscó la forma de presa a la cual correspondía el modo de trabajo más favorable y las cargas más reducidas. Este estudio enseñó, que para Spitalamm el tipo de presa que ofrecía el máximo de seguridad efectiva era la presa arco gravedad.

Presenta un talud total del 60 por 100 (agua arriba 10 por 100 y agua abajo 50 por 100), la sección es 25 por 100 inferior a la de la presa gravedad y

esta reducción ha permitido realizar una economía del orden de 5 millones de francos suizos. Esta perspectiva favorable no bastaba para adoptar el perfil arco gravedad en lugar de la presa gravedad; esta decisión fué tomada únicamente en consideración a sus ventajas estáticas, y no hubiera sido ratificada si la prueba de éstas no hubiera podido ser dada por el cálculo. Hay una prueba más convincente aun de la razón de los principios sobre los cuales se proyectó la presa de Grimsel; nos la da el control de las deformaciones sobre las cuales daremos más datos después.

El ejemplo de Grimsel podrá seguirse con provecho cuando se presenten circunstancias análogas. De una manera general, en lugar de admitir la idea de la superioridad de la seguridad de las presas gravedad sobre los otros tipos, será conveniente para todas las presas importantes estudiar los esfuerzos reales, a los que la presa está sometida y de adoptar la forma de la presa a la configuración del valle a cerrar. El argumento que podrá emplearse contra este tipo arco-gravedad respecto a su cálculo, no puede ser válido, puesto que su exactitud es por lo menos tan grande como la que da la teoría de las presas gravedad.

Esta manera de ver y de determinar el modo de trabajo de una presa ha sido aplicada al cálculo de la gran presa de Boulder (presa Hoover) actualmente en construcción en el Colorado. La sección horizontal del muro ha sido dispuesta para favorecer el trabajo de la bóveda, bien que la sección de la presa sea la de la presa gravedad. Esta disposición, muy acertada, ha sido adoptada para reducir los esfuerzos del hormigón. Es precisamente el principio sobre el cual se basó el proyecto de presa de Grimsel hace doce años.

H. JUILIARD,

Ingenieur-Conseil, Berna.