

LAS PRESAS - BÓVEDAS

Solución racional del problema

Hace poco tiempo, relativamente, que se construyen presas del tipo de bóvedas, y aunque en estos últimos años son bastantes las ya construidas, su número, todavía pequeño, no puede compararse con el de las del tipo llamado de gravedad. Claro está que la adopción de uno u otro sistema no debe hacerse de un modo caprichoso, sino que viene indicado por las condiciones topográficas; pero aun en algunos casos en que estaba muy indicado el establecimiento de presa bóveda, o de bóvedas múltiples, se ha prescindido de hacerlo por la dificultad de su estudio, o, más bien, por la intranquilidad de su resultado.

En las presas de gravedad se ha llegado, por decirlo así, a un acuerdo. Llegando, por cualquier método de cálculo, para la tangente trigonométrica del ángulo de los paramentos, a un valor de 0,70 a 0,80 y comprobando, como es fácil conseguir, que no existan tracciones y que las compresiones son de 20 a 30 kg : cm², el ingeniero se da por satisfecho y no hay ninguna oficina del Estado en que se opongan reparos a la aprobación de la obra. En las presas bóvedas la cuestión no está tan trillada y surgen mayores desconfianzas en cada proyecto que se formula.

Analizando detenidamente el problema, tan difícil es un caso como el otro, y los métodos de cálculo, aplicables a ambos, son igualmente engañosos.

Para las presas de gravedad se supone ordinariamente que el trozo de estudio está comprendido entre dos planos verticales paralelos, formando rebanadas independientes.

Si pudiera disponerse la construcción en esta forma y se adoptaran además precauciones para la temperatura y el fraguado, la aplicación de los elegantes métodos de Lévy o de Pigeaud podría dar completa satisfacción, aun con todas las reservas de la aplicación del estado elástico plano (con su evidente hipótesis de isotropía) a un sólido de grandes dimensiones y de tan gran heterogeneidad; pero es el caso que la mayor parte de las veces la construcción de la presa se hace continua, y para acabar de complicar la cuestión se da forma curva en planta, resultando de ambas cosas que el problema se falsea totalmente apareciendo reacciones laterales absolutamente desconocidas que hacen variar la distribución de tensiones, sin que se pueda fácilmente apreciar su alcance.

Viendo uno de estos perfiles corrientes, que para 60 m de altura tiene más de 40 m de grueso en el fondo, parece que debe dar completa tranquilidad semejante cordillera artificial, y, sin embargo, por una parte la lógica, y por otra las fisuras muy frecuentes que aparecen en muchas presas, unas debidas al fraguado, otras a la temperatura y, probablemente, otras a las tensiones longitudinales, hacen comprender que no es tan sencillo prescindir de los enlaces laterales.

En las presas bóvedas, para que resistan como tales, es preciso considerar las reacciones laterales, y entonces el problema se hace difícil por no saberse estimar cómo se ayuda la resistencia vertical, conside-

rada como muro, con la horizontal, en forma de bóveda. Calcular distintas rebanadas horizontales, como si fueran independientes unas de otras, es incurrir en el mismo defecto de las presas de gravedad, con mayor intranquilidad todavía, por ser mucho menores los espesores en estas presas.

El problema en su generalidad, es decir, el estudio teórico de la presa por el estado elástico triple es absolutamente inabordable. Ni se puede fácilmente encontrar una forma de función que satisfaga a las tres relaciones elásticas en derivadas parciales, ni, aunque se encontrara, sería fácil determinar las constantes de la integración, por la complicación de los límites.

Es preciso acudir a simplificaciones de cálculo que hagan posible las aplicaciones prácticas, y actualmente la teoría más aceptada es la propuesta por Stucky, que consiste en igualar las deformaciones que se producen en dos fibras, una vertical y otra horizontal, que pasan por cada punto de la presa.

Es sugestiva la teoría de este ilustre profesor y parece que debe dar resultados muy aproximados a la realidad; sin embargo, haciendo una crítica un poco severa, quedan muchas dudas en su planteamiento.

En primer lugar, es preciso suponer que cada pareja de fibras (vertical y horizontal) están aisladas de las demás, y esto causa no poca incertidumbre, porque si bien parece a primera vista que prescindir de esas fuerzas interiores es ponerse en condiciones favorables a la resistencia, lo cierto es que, haciendo esa hipótesis, el equilibrio molecular es distinto del que se origina al existir la cohesión, y puede muy bien ocurrir que, aun sobrando masa, esté en malas condiciones elásticas.

Para aclarar este argumento pongamos un ejemplo: supongamos que una viga recta está apoyada o empotrada en los extremos y tiene un puntal de apoyo en el punto medio. Si el ingeniero que la proyecta, en lugar de estudiar el sistema completo de viga y puntal quisiera simplificar el problema prescindiendo del enlace con este puntal, y considerando la viga sola, parece evidente que si la viga se calcula para resistir aislada, mejor resistirá con su ayuda intermedia; pero es el caso que en la realidad, al existir el pilar intermedio, se altera por completo la ley de flexiones, y, si la viga se calculó antes para igual resistencia máxima en las distintas secciones, podrá estar en peores condiciones elásticas en varios puntos, a pesar de que en la hipótesis se creyó exagerar por exceso al suponer quitado el puntal.

Muy numerosos ejemplos podrían ponerse sobre esta materia, pero además hay un caso que induce a sospechar: este mismo método de descomposición en fibras aisladas que se cruzan en un punto ha sido aplicado al cálculo de las placas planas rectangulares, para simplificar la dificultad de su estudio, obteniéndose de este modo una distribución de tensiones en la

placa que difiere mucho de la obtenida por la teoría analítica de Navier.

La experimentación sobre placas de lados variables no es concordante con los resultados obtenidos por descomposición simple, y en cambio sí lo es con la teoría analítica que supone la cohesión correlativa de las fibras.

Por todo lo dicho—y por mucho más que pudiera decirse—se percata uno de que el estudio de una presa bóveda es de gran dificultad. Aplicar una teoría científica irrepachable no cabe hacerlo, pues el proble-

No sería razonable que por tales dificultades analíticas se dejaran de hacer presas bóvedas, pues el sentido común, que es la primera facultad a poner en juego, dicta como lo más conveniente hacer una bóveda para cerrar un valle estrecho.

Invirtamos los términos del problema: el cálculo no se adapta a la presa, pues hagamos que la presa se adapte al cálculo.

Y esa es nuestra solución.

Dividiendo materialmente la presa en rebanadas horizontales que puedan considerarse independiente

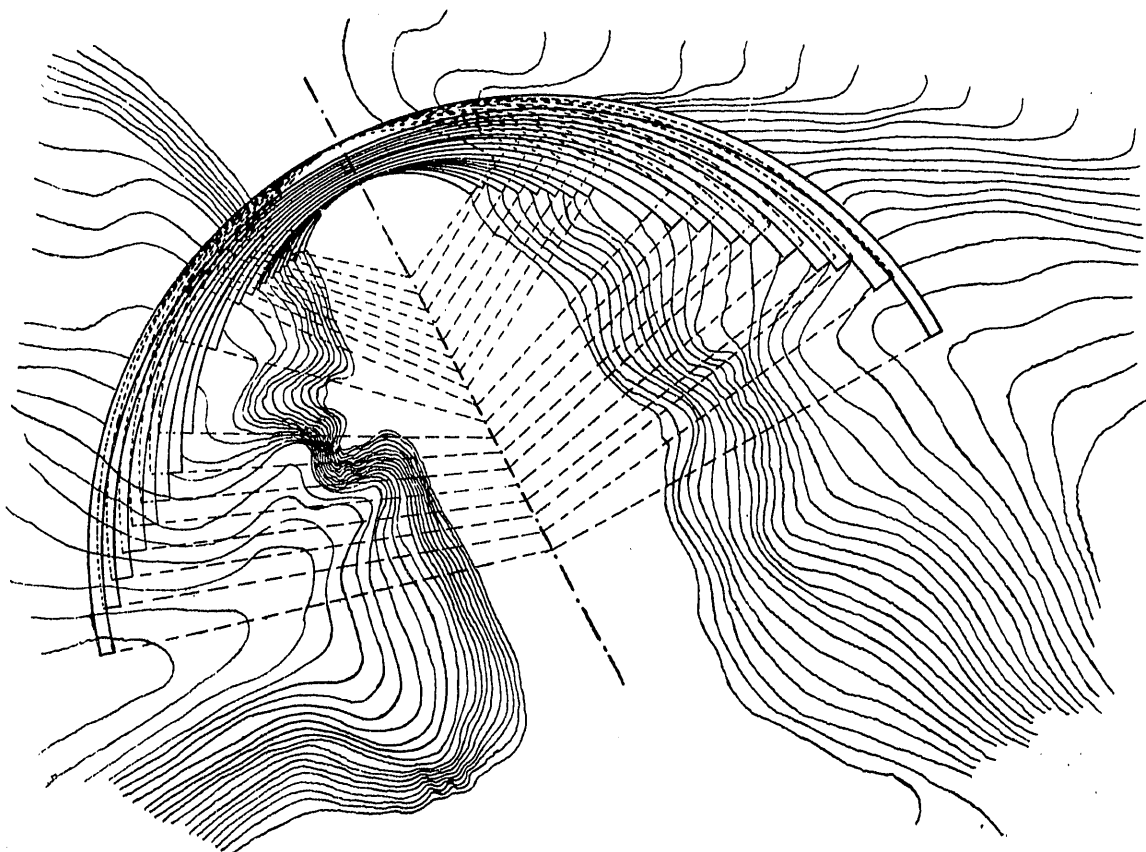


Fig. 1.ª

ma tiene tal complicación que no hay manera de abordarle prácticamente.

Hacer hipótesis, simplificando los enlaces, es muy peligroso, pues la realidad será o no concordante con la hipótesis y de nada sirve encontrar de ese modo moderadas cargas de trabajo en el cálculo.

La aplicación del análisis matemático a los sólidos naturales es indudablemente muy difícil, y aun dando por legítimamente aplicables las ecuaciones generales de la teoría de la elasticidad, los casos en que éstas pueden resolverse de un modo concreto son tan reducidos que constituyen conquistas personales que llevan el nombre de su autor. Puede decirse que fuera de casos especiales, sólo los sólidos en estado elástico plano, y provistos de directriz, son calculables de un modo general. En éstos, tanto por su sencillez como por la copiosísima experimentación (en roturas, con cápsulas taradas y por medio de la luz polarizada), se tiene confianza en la certeza de los cálculos; pero en cuanto se abandona la concentración lineal de la materia las complicaciones crecen de un modo extraordinario.

unas de otras por interposición de un elemento plástico, intermedio entre esas zonas, se consigue realizar prácticamente lo que por hipótesis no tiene virtualidad.

Pero no basta eso solo; hay otro elemento de ambigüedad aún, que es el enlace de esas rebanadas con el terreno, y puestos a hacer las cosas con rigor no debemos admitir que se suponga empotramiento en las márgenes, cuando tan difícil es de conseguir un verdadero empotramiento entre elementos heterogéneos.

A fin de seguir en la realidad de los resultados, prescindimos del empotramiento, proporcionando sólo apoyo simple.

La manera de conseguir por una parte la independencia entre las rebanadas horizontales y por otra el apoyo con las laderas, dotando a unas y otras de la debida impermeabilidad, es la siguiente: cada hilada se apoya sobre la inferior por intermedio de una capa de 4 cm de asfalto, y para evitar que por esa junta pase el agua se dispone una cubrejunta de chapa de cobre delgada en forma curvada para que pueda li-

brememente deformarse. El apoyo sobre el terreno se hará labrando en la ladera escalones que tengan su cara vertical de contacto, y sobre ella se apoyará cada rebanada por intermedio de una hoja de arcilla o, si se quiere, de asfalto.

La primera objeción que se ocurre es si podrá con-

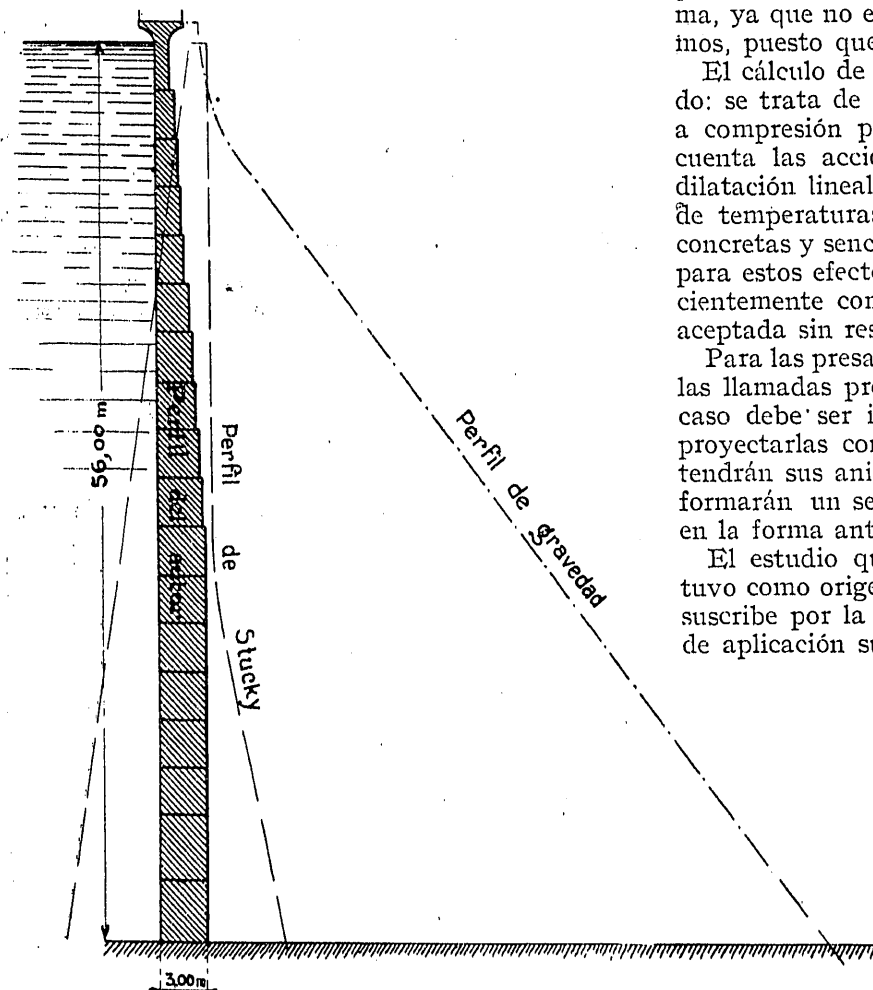


Fig. 2.ª

siderarse, de este modo, la independencia relativa de las rebanadas.

Para presas cuya altura oscile entre 30 y 70 m, proyectándola con arreglo a este sistema, la carga vertical máxima de compresión oscila entre 8 y 15 kg : cm². Lo que se trata de conseguir es que, bajo esta carga de compresión, una hoja de asfalto tenga la viscosidad necesaria para que la deformación relativa de un anillo respecto al otro, debida al fraguado, a la diferencia de sus temperaturas, o a la diferencia de empujes del agua, no esté sencillamente coartada. Esto es evidente, pues basta fijarse que el coeficiente de elasticidad del hormigón es 150 000 kg : cm², y el de viscosidad del asfalto (experimentado de igual modo que el otro) es próximamente de unos 600 kg : cm², para el grueso citado y para la temperatura media de 20°, de suerte que las deformaciones respectivas estarán en la relación inversa de esos números, lo cual hace ver la enorme superioridad de deformación de la hoja de asfalto y, por tanto, su escasa coacción.

Con este concepto de la obra, el proyecto de la presa bóveda habrá de reducirse a encajar en el valle

una serie de anillos superpuestos, cuyo radio puede ser variable para la mejor adaptación al terreno, pero dispuestos de tal modo que tengan buen asiento unos sobre otros, conforme se indica en la planta (fig. 1.ª), y estos anillos es evidente que deberán ser circulares para seguir la figura de antifunicular de las cargas, cuya figura conservarán sin deformación de forma, ya que no existe tampoco coacción en los extremos, puesto que sólo se apoyan en ellos.

El cálculo de estos anillos es preciso y determinado: se trata de un cilindro circular grueso sometido a compresión por carga exterior y—para tener en cuenta las acciones térmicas—sometido también a dilatación lineal y angular, provocada por diferencia de temperaturas en los dos paramentos. Fórmulas concretas y sencillas tiene la teoría de la Elasticidad para estos efectos simples, y su aplicación está suficientemente comprobada y experimentada para ser aceptada sin reservas.

Para las presas de bóvedas múltiples, es decir, para las llamadas presas de contrafuertes y pantallas, el caso debe ser igual, y, por tanto, nuestra idea es proyectarlas con la pantalla vertical, que entonces tendrán sus anillos igual radio y ángulo, o sea que formarán un semicilindro vertical dividido en fajas, en la forma antedicha y con apoyo simple.

El estudio que sobre esta materia hemos hecho tuvo como origen un hecho concreto: honrado el que suscribe por la confianza de encargarle un proyecto de aplicación sus distinguidos compañeros los señores Escario y Errandonea, para un aprovechamiento hidráulico en la provincia de Navarra, creímos indispensable estudiar la cuestión con el debido detenimiento, aplicándole a una presa de 57 m de altura.

Pero es preciso hacer constar una particularidad sumamente interesante: al iniciar el proyecto, sólo pensamos, como premisa previa, en hacer un cálculo satisfactorio y prácticamente ejecutable; la idea de economía, tan interesante en todas las obras, tiene que estar basada sobre la posibilidad técnica.

Esa descomposición de anillos y la forma de apoyo

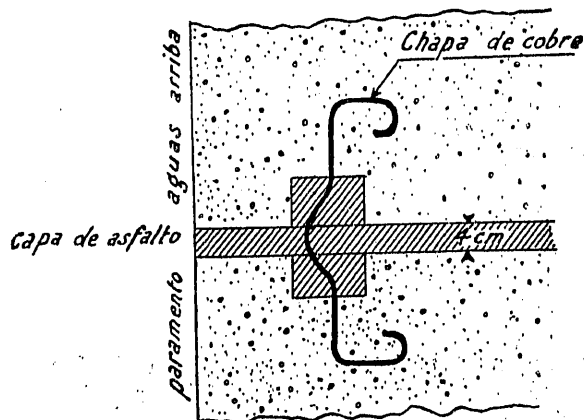


Fig. 3.ª

y sistema de cálculo sólo obedecieron, en un principio, al afán de evitar la indeterminación analítica, haciendo claro y preciso el problema; pero lo curioso del

caso es que actuando de este modo llegamos a una economía insospechada, lo cual hace pensar en que algo extraño debe ocurrir con los métodos de presa continua.

En efecto, para el caso concreto de esta presa de 57 m de altura, cuya planta es la de la figura 1.^a, nos encontramos con que haciendo nuestro compañero Sr. Becerril el proyecto con arreglo a la teoría de Stucky (1), el grueso en la base debe ser 14 m, en tanto que con nuestro procedimiento obtenemos el grueso de tres metros!

El volumen conseguido por el primer sistema es de 15 000 m³, y el obtenido por nosotros sólo alcanza 5 000 m³.

(1) Véase el notable artículo publicado por el Sr. Becerril en el pasado número de la REVISTA.

En la figura 2.^a representamos el perfil estudiado por nosotros, y en dos líneas se dibuja el que ha resultado con el perfil de Stucky y el absurdo del perfil de gravedad.

La figura 3.^a indica la junta horizontal adoptada para los sucesivos anillos.

Si la Superioridad aprueba el proyecto formulado, en breve pasará a ser una realidad tangible.

Previamente, la Escuela de Ingenieros de Caminos, en su noble empeño de estimular las iniciativas técnicas, va a comenzar la construcción de un modelo de presa a escala $\frac{1}{10}$, con arreglo a nuestro proyecto, contando con la amable ayuda que le presta la Sociedad Fuerzas Eléctricas de Navarra, a la que, por este motivo, expresamos agradecimiento.

F. PEÑA BOELUF
Profesor de la Escuela de Caminos

Aduntes sobre "Cambios de mano"

Con ocasión de construir la doble vía entre La Encina y Almansa, se ha precisado ejecutar alguna vez la operación conocida en términos ferroviarios por «Cambio de mano». Consiste en montar la vía doble a partir de un cierto punto, a distinto costado de la vía general que el utilizado hasta él, y aprovechando un intervalo que la circulación por la vía general ofrezca, se corta ésta, y por ripado de las vías, se enlaza cada uno de los cortes de vía general a los de vía nueva, que les confrontan, quedando establecida la doble vía.

Dos casos esencialmente distintos pueden motivar dicha operación; unas veces se ejecuta cuando a distinto lado del que lleva la vía doble se presenta más facilidad para continuar explanándola (figura 1.^a). Otras veces se persigue con dicha opera-

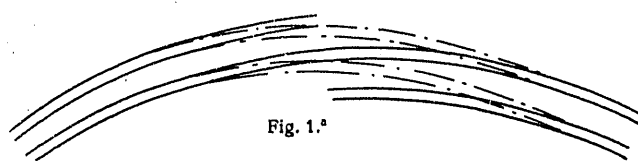


Fig. 1.^a

ción aislar en una de las vías de una doble vía ya establecida un obstáculo accidental; claro está que en este caso la operación se verifica doble, por dos puntos que comprenden el obstáculo (fig. 2.^a); este

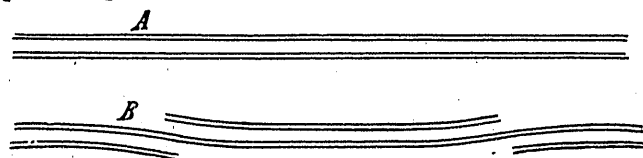


Fig. 2.^a

caso no es frecuente, pues la mayoría de las veces bastará establecer entre las estaciones próximas la vía única.

Siendo en el primero de los casos de carácter permanente la operación, debe efectuarse adoptando los mayores radios posibles. En cambio, en el segundo caso, de carácter muy provisional, lo que interesa es

que la operación sea lo más sencilla posible y se adoptan radios mínimos, lo cual no es inconveniente ya que en estos casos circulan los trenes a velocidad moderada, pues existe precaución y a veces parada inclusive.

Estudio teórico

No puede ofrecer más sencillez el estudio geométrico del trazado de un cambio de mano, pues considerando el problema general, si tenemos una vía en curva I (fig. 3.^a), y queremos pasar de ella a otra II

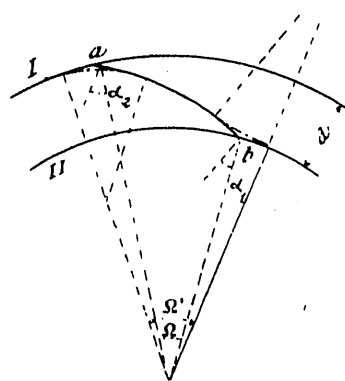


Fig. 3.^a

paralela, la curva de enlace lógicamente debe cumplir con la condición de separarse de la vía I a una longitud proporcional al arco recorrido; es, pues, una espiral de Arquímedes. Como la citada espiral no encuentra tangencialmente a las vías I y II, se imponen dos arcos de acuerdo que eviten los puntos angulosos a y b ; el acuerdo b es

de curvatura en sentido contrario; debe, pues, tener su radio valor máximo, pudiendo ser una recta con los valores corrientemente adoptados para la espiral.

Por el método de Roberval, sabemos que se puede trazar la tangente a la espiral de Arquímedes en un punto, componiendo la velocidad uniforme de arrastre del radio vector con la relativa del móvil que describe la espiral; la primera, si t_1 es el tiempo que suponemos tarda el móvil en describir la porción de curva considerada, vale

$$v_a = \frac{R_1 \cdot \Omega}{t_1}$$

y la velocidad relativa

$$v_r = \frac{d}{t_1}$$