

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

FUNDADA Y SOSTENIDA POR EL CUERPO NACIONAL DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Redactor-Presidente... Excmo. é Ilmo. Sr. D. Leonardo de Tejada, Inspector general del Cuerpo
Redactores..... Los Sres. Presidentes de las Comisiones regionales de Ingenieros.
 D. Antonio Sanier, Profesor de la Escuela de Caminos.
 D. Manuel Maluquer, Ingeniero del mismo Cuerpo, *Secretario*.
Colaboradores.. .. Todos los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

SE PUBLICA LOS JUEVES

Redacción y Administración: Puerta del Sol, 9, pral.

EL PERFIL DE LAS PRESAS DE FÁBRICA ⁽¹⁾

POR DON JOSÉ NICOLAU

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

(Conclusión.)

Resumen y conclusión.

En gracia á la brevedad, no trataré de las presas constituidas por una serie de bóvedas cilíndricas de generatrices verticales apoyadas en contrafuertes, disposición aconsejada por varios autores para hacer posible la libre dilatación de las fábricas en el sentido longitudinal, sin que se produzcan grietas verticales, que, según se ha indicado ya, pueden llegar á comprometer las buenas condiciones de estabilidad y de resistencia de la construcción. Por la misma razón prescindiré del estudio detallado de las pantallas propuestas por Mr. Le Rond y Mr. Levy, en las que acaso podría tener feliz aplicación el cemento armado que tanta preponderancia está alcanzando en la actualidad. Mas no será inoportuno hacer observar que aun en el caso en que se empleen pantallas anteriores y se recurra ó no á los contrafuertes, siempre será ventajosa la disposición en arco de la planta de la presa, puesto que, por una parte, contribuirá á evitar la producción de grietas (en mayor ó menor grado según sea mayor ó menor la curvatura del arco), y por otra, se aumentará grandemente en todos los casos de resistencia de la presa. No sin fundada razón ha podido Mr. Langlois atribuir en gran parte la catástrofe de Bouzey al trazado rectilíneo en ella adoptado, siendo conocidos varios ejemplos de presas en arco de espesores en extremo reducidos que llevan mucho tiempo de existencia (2).

La ruina de algunas presas y las observaciones que se han consignado, demuestran que no son admisibles las bases de cálculo del perfil hasta el presente seguidas. Puede aceptarse, sobre todo en el triangular, la hipótesis del trapecio sin restricción alguna, pero son completamente inadmisibles, al menos en el paramento de aguas arriba, no ya sólo las tensiones, sino aun las presiones nulas. La seguridad de la obra exige que el Ingeniero no llegue en sus cálculos á lo que pudiera llamarse el límite estricto del peligro, sino que debe dejar un margen que exige lo incierto de las bases de que parte, singularmente las que se refieren á la homogeneidad del macizo; además, pudiendo considerarse inevitables la producción de grietas, dicha comprensión no deberá ser inferior á la presión del agua en dicho paramento, sobre todo en presas desprovistas de pantalla.

Esta condición fundamental, propuesta por Levy, relega á un lugar muy secundario las relativas á los esfuerzos máximos de compresión, porque, en general, cuando aquella esté satisfecha,

las presiones máximas á embalse lleno serán admisibles, á no tratarse de presas de una altura extraordinaria, y aun en este caso cabe adoptar el recurso del empleo de fábricas especiales. Al hacer esta afirmación he tenido muy presente que los límites de resistencia á la compresión propuestos por Sazilly y Delocre son, no solamente arbitrarios, sino excesivamente reducidos. Ya se ha consignado que la presa de Almansa está sometida á un esfuerzo de compresión superior á 12 kilogramos por centímetro cuadrado, que Boix hace ascender á 15,3 kilogramos (1); aplicando el teorema de Levy para deducir el esfuerzo máximo de compresión en las presas de Furens, Villar y Chartrain, se obtienen respectivamente las cifras de 12,7, 13,4 y 16,7 kilogramos por centímetro cuadrado. En la nueva presa de Croton es seguro que el esfuerzo máximo, que se había supuesto igual á 16 kilogramos, excede considerablemente de esta cantidad, llegando probablemente á 24 kilogramos, sin que, por falta de datos, me haya sido dable deducir el verdadero; pero puede formarse idea de él sabiendo que en la antes citada presa de Chartrain, el esfuerzo máximo se había calculado en 8,51, 9,84 y 10,29 kilogramos, adoptando respectivamente los métodos de Delocre, Bouvier y Guillemain. Con esto se comprenderá bien que son perfectamente admisibles presiones máximas de 20 kilogramos por centímetro cuadrado, adoptando fábricas especiales, y que no será excesiva una presión de 14 kilogramos en las fábricas ordinarias compuestas con morteros hidráulicos, como deben ser todos los que entran en la composición de las fábricas de las presas. Ahora bien, admitiendo la presión de 200 toneladas por metro cuadrado, cabe alcanzar con el perfil triangular una altura que variará entre 80 y 90 metros, según el peso del metro cúbico de fábrica sea 2,5 ó 2,2 veces mayor que el del agua del embalse. Con la presión de 140 toneladas por metro cuadrado, las alturas máximas que permite el perfil triangular variarán de 56 á 64 metros. Aun con el perfil rectangular, tan poco apropiado para una presa, pueden tener éstas de 50 á 59 metros de altura, según la densidad, para presiones de 200 toneladas, y de 35 á 41 metros cuando la presión no haya de exceder de 140 toneladas. Se ve, por lo tanto, que no será la condición de la presión máxima la que determine la sección de la presa, sino más bien la compresión oblicua del paramento interno.

Ocurrirá con frecuencia, y de ello se ha estudiado ya algún ejemplo en el presente trabajo, que la presión máxima á embalse vacío sea superior á la que tiene lugar á embalse lleno cuando queda satisfecha la condición fundamental, y en este caso, para determinar el perfil ó la altura máxima á que con uno dado se puede llegar, será preciso tener muy en cuenta esta circunstancia. El perfil triangular goza á este respecto de la notable propiedad de ser iguales en ambos casos las presiones máximas, pudiendo ser reputado, dentro del nuevo método, como de igual resistencia.

Es fácil comprobar, y ya se ha hecho anteriormente en gran

(1) Véase el núm. 1.213 de esta REVISTA.

(2) Citaré tan sólo la presa de Río Grande (Istmo de Panamá), de 11,6 metros de altura, 1,40 metros y 3,80 metros de espesor en la coronación y en la base respectivamente, 32,17 metros de desarrollo en la parte superior, siendo la planta circular con un radio de 15 metros.

(1) No conociendo la densidad de la fábrica, no me ha sido posible rectificar esta cifra.

parte, que el referido perfil triangular, cuando satisface la condición fundamental, es decir, cuando el ángulo en el vértice tiene por cotangente $\sqrt{K-1}$, llena igualmente las demás condiciones propuestas por Levy (véase párrafo XIV); tan sólo hay que insistir en una observación ya hecha anteriormente al hablar del esfuerzo máximo de deslizamiento. Según se ha visto, el valor de este esfuerzo es igual al cuarto del máximo de compresión, cuando este máximo tiene lugar, como generalmente ocurre, en el paramento de aguas abajo; y como admito que en presas de gran altura la compresión pueda llegar a ser de 140 y aun de 200 toneladas por metro cuadrado, resultaría que el deslizamiento sería de 35 y 50 toneladas, mientras que varios autores, Clavenad entre ellos, consideran que no debe exceder de 7 á 8 toneladas. No cabe duda de que si se tratase de fiar la resistencia al deslizamiento, tan sólo á la que pudieran ofrecer los morteros, estos límites, ú otros algo superiores para los hidráulicos de gran resistencia á la tracción, nada tendrían de exagerados y la prudencia aconsejaría no excederlos. Mas es evidente que en la resistencia al deslizamiento no intervendrá tan sólo la que ofrezca el mortero, como suponía Clavenad, porque esto equivaldría á que, según la dirección en que tiene lugar el máximo esfuerzo de deslizamiento, existía en la fábrica una junta que por el intermedio del mortero separaba los mampuestos ó sillares. Suposición es esta contraria á la realidad de los hechos; y aun le es dado al Ingeniero, prevenido contra este peligro, disponer las juntas de suerte que no coincidan con las en que el deslizamiento puede ser más de temer, oponiéndose á él con eficacia con el empleo de tizones, la colocación y dimensiones de los cuales puede fijar con exactitud, conocida aquella dirección peligrosa de la cual he determinado el ángulo.

Si estas razones no fueran convincentes, bastaría presentar los hechos que con elocuencia las corroboran. En efecto, en la presa de Almansa el esfuerzo de deslizamiento no es inferior á 30 toneladas, en la de Furens es de 31,7 toneladas, en la del Villar es de 33,5 toneladas, en la de Chartrain es de 45 toneladas, y, por último, es seguro que en la nueva de Croton diferirá poco de 60 toneladas. En una palabra, si son admisibles sin inconveniente, esfuerzos de compresión de 140 y aun de 200 toneladas por metro cuadrado, según demuestra la experiencia de las presas existentes, son admisibles igualmente los esfuerzos de deslizamiento de 35 y aun de 50 toneladas; éstos están tan íntimamente ligados con los de compresión, que, contando con fábricas debidamente construidas y bien trabadas, tan sólo hay necesidad de atender á los últimos. Podrá objetarse que es posible atribuir la rotura de alguna presa (la del Habra), de acuerdo con M. Clavenad, á los esfuerzos de deslizamiento, pero á mi entender la verdadera causa ha debido de residir más bien en los de tensión que se desarrollaron en el paramento de aguas arriba, dando origen á grietas y á las subpresiones consiguientes, y que en todo caso, si la fábrica de la presa del Habra era incapaz de resistir esfuerzos de deslizamiento, que como máximo tan sólo se elevaron en el momento de la rotura á 27,5 toneladas por metro cuadrado, es evidente que dicha fábrica no satisfacía las condiciones que deben llenar las que entran en la constitución de una presa, ya que, según se ha dicho antes, es posible alcanzar y se han alcanzado desde hace mucho tiempo resistencias muy superiores á la citada.

En resumen, la necesidad de sustraer á las subpresiones los macizos de fábrica de las presas cuando el embalse está lleno, sobre todo en el paramento de aguas arriba, que debe soportar una compresión igual por lo menos á la del agua, conduce en el cálculo del perfil á dejar en lugar muy secundario la consideración de los esfuerzos máximos, pues en general, satisfecha aquella condición, estos esfuerzos serán admisibles, salvo en el caso en que por tratarse de presas de gran altura haya que recurrir al empleo de fábricas escogidas, como son las construidas con morteros de cal eminentemente hidráulica y sobre todo de cemento Portland.

Hay que insistir á este propósito en que los métodos hasta el

presente empleados para calcular los esfuerzos máximos de compresión y de deslizamiento, son deficientes; debe partirse, para los primeros, del teorema de Levy, que determina la dirección de la compresión máxima en el paramento de aguas abajo, donde en general, á embalse lleno, existirá la máxima compresión, y en tal caso, tomando la cuarta parte de éste, se tendrá el máximo esfuerzo de deslizamiento, si se supone el coeficiente de rozamiento igual á 0,75. Las diferencias que se obtienen son de mucha consideración, como se ha indicado ya para la presa de Chartrain, en la que se admitía además que el deslizamiento no excedía en ningún punto de 0,8 kilogramos por centímetro cuadrado, conforme al procedimiento de Clavenad, mientras que, en realidad, partiendo tan sólo de la ley del trapecio, que puede considerarse legítimamente aplicable, por ser el perfil muy poco distinto del triangular, se obtiene, según se ha dicho, la de 4,5 kilogramos por centímetro cuadrado. Esta circunstancia ha inducido á error al hacer comparaciones entre las cargas á que se hallan sometidas las fábricas de distintas presas construidas, que en realidad eran muy superiores á las supuestas. Tan sólo en la presa de Almansa se habrá hecho el cálculo seguramente con corrección (si se admite que es aplicable á su perfil la ley del trapecio), resultando que, lejos de soportar una presión mayor que la que se suponía que actuaba en casi todas las presas modernas, se halla, por el contrario, desde este punto de vista, en condiciones mucho mejores que casi todas ellas, incluso la construída por Delocre, no obstante la prudencia de este Ingeniero, que hubiera resultado verdaderamente exagerada si hubiesen sido exactas las bases de que partía.

De todas suertes, si no se adopta el perfil triangular propuesto ú otro que no difiera de él sensiblemente, será prudente desechar los que tengan taludes muy tendidos á que conducía la antigua teoría, comprobando en todo caso muy cuidadosamente si podrán producirse desprendimientos de las fábricas en el paramento de aguas abajo. En el perfil triangular el talud no llega en ningún caso á 45°, y no parece que haya razón alguna para exceder este límite, que puede considerarse ya bastante elevado en toda clase de construcciones, pues de lo contrario se correría el riesgo de que las presiones no se transmitieran á todo el macizo, ya por las dislocaciones producidas por tracciones en las fábricas, ya por los esfuerzos de deslizamiento, á los que será tanto más difícil de oponerse cuanto mayor sea el talud. En este concepto, el perfil aconsejado por Rankine es de todo punto inadmisibles.

Los antiguos constructores españoles, con un sentimiento de la realidad en algunos puntos que se admira más cuanto mejor se estudia la teoría de las presas, emplearon casi siempre la fábrica de sillería; esta práctica no ha sido seguida, por punto general, en las presas modernas, con objeto principalmente de evitar que la desigualdad de asientos entre la sillería de los paramentos y la mampostería del resto del macizo, pudiera dar lugar á grietas y dislocaciones que perjudicasen la homogeneidad y sobre todo la buena trabazón de la obra que con justa razón ha sido considerada esencial. Mas como habrá siempre necesidad de que los paramentos estén construídos con mayor esmero que el resto del macizo á fin de evitar un excesivo desarrollo de juntas y que presenten la necesaria resistencia á las degradaciones que producen las aguas y los agentes atmosféricos, resultará que la desigualdad de asientos será en absoluto inevitable y que para combatir este inconveniente habrá que recurrir de todos modos á un esmero grandísimo en la construcción, cuidando de que la trabazón de unas partes con otras sea lo más perfecta posible y que la construcción, hecha con alguna lentitud, vaya soportando paulatinamente á medida que avanza el empuje del agua del embalse. No parece que estos mismos procedimientos no sean bastantes para obtener el propio resultado cuando se emplee la sillería, y en efecto, ningún inconveniente del género de los apuntados se ha ofrecido en nuestras antiguas presas y aun en alguna de las modernas; en cambio el empleo de la sillería tiene por una parte la ventaja de reducir el número de juntas, y por otra, la más

importante, de poder resistir presiones más elevadas que las que resisten las mamposterías, siendo de notar que las mayores que se desarrollan en los perfiles tienen lugar en ambos paramentos donde, por lo tanto, en ciertos casos, podrá tener útil aplicación la sillería, por lo menos hasta cierta altura. Cuando el aliviadero de superficie se sitúa en la coronación de la presa, el empleo de aquella fábrica, más ó menos perfecta, puede considerarse casi como indispensable. Si se recurre á la sillería, además de su perfecta trabazón con las fábricas restantes, será preciso disponer los planos de hilada normalmente á los paramentos y aun podría en el de aguas abajo adoptarse una inclinación que se acercara más que la precedente á la normal á la dirección de máximo deslizamiento.

La unión de la presa con el terreno requiere un cuidado especialísimo. El empleo de rotallos ó dentellones de la presa sólidamente empotrados en ranuras abiertas en el terreno, dispuestas en el sentido longitudinal de la presa, me parece digno de ser recomendado para procurar una sólida trabazón entre la fábrica y los cimientos; cuando se trate de grandes presas convendrá recurrir al cemento Portland y á los mampuestos de gran tamaño en esta parte delicada de la obra. En cuanto á la dirección de los dentellones, es casi indiferente en la parte inmediata al paramento de aguas arriba comprendida en la zona en que no son de temer los esfuerzos de deslizamiento; en la parte restante, el plano inferior, ó sea el fondo de las ranuras abiertas en el terreno, debería coincidir con la dirección del máximo deslizamiento, y normal á esto las dos paredes laterales. De esta suerte los dentellones vendrían á constituir con los grandes mampuestos en ellos empleados verdaderos tizones que oponiéndose con eficacia á los esfuerzos de deslizamiento proporcionarían un seguro enlace de la presa y el terreno sobre que descansa. Cuando no exista pantalla anterior, será muy útil establecer en los cimientos un buen sistema de drenaje, ó tomar cuantas precauciones puedan considerarse útiles para evitar que en la base del cimiento puedan engendrarse subpresiones que siempre son peligrosas.

En las aplicaciones es importantísimo el conocimiento del peso de las fábricas que se han de emplear en la construcción. Deloere suponía que era igual á 2.000 kilogramos el metro cúbico, y de este dato partía en sus cálculos, siendo curioso notar que mientras aquel Ingeniero y otros muchos que proyectaron presas con arreglo al método del perfil de igual resistencia, cuidaban con el mayor esmero de que las presiones calculadas no excedieran del límite fijado, admitían sin escrúpulo para pesos de las fábricas cifras que diferían notablemente de la realidad.

Para evitar á este propósito toda duda, lo más práctico, siempre que sea posible, será realizar experimentos con materiales iguales á los que se proponga emplear, construyendo un macizo de dimensiones determinadas, que después podrá deshacerse para pesarlo con mayor cernidad. Este macizo, ¿deberá pesarse seco ó húmedo? Atendiendo á que el mayor peligro existe indudablemente en las presas cuando se hallan en carga, parece natural que, á menos que hayan de tener pantalla anterior, se adopte el peso de la fábrica húmeda, es decir, humedecida después de haber fraguado los morteros, porque así nos acercaremos más á las condiciones de la aplicación; pero téngase en cuenta también que cuanto mayor se suponga el peso de las fábricas, tanto más reducidas resultarán las dimensiones del perfil, y tanto mayor será la presión efectiva y menor la compresión en el paramento de aguas arriba; por eso, sin llegar al límite de seguir la regla aconsejada por la Administración francesa, que previene que se reduzca en 100 kilogramos el peso del metro cúbico de la fábrica hallado por experiencia para el cálculo del perfil de la presa en carga, considero prudente no partir para aquellas de macizos que estén muy húmedos. En todo caso conviene observar la circunstancia importantísima de que en todos nuestros cálculos anteriores hemos designado por la letra K, no el peso del metro cúbico de fábrica, sino la relación de este peso al del metro cúbico de agua del embalse. En general, este último

será igual á 1.000 kilogramos, pero no sucederá siempre así, pues aparte de casos excepcionales, se ofrecerán con frecuencia los de presas en ríos torrenciales cuyas aguas, en las avenidas, tienen una densidad mayor por estar cargadas de lógamos y aun por llevar en suspensión arenas y cuerpos muy pesados.

Entre todos los perfiles que cumplan con la condición de soportar en el paramento de aguas arriba una presión por lo menos igual á la del agua, y de no estar sometidos á tensión en ninguno de sus puntos, es el de área mínima el perfil triangular con un ángulo en el vértice que tenga por cotangente $\sqrt{k-1}$. Este perfil, que llena igualmente todas las condiciones impuestas por Mr. Levy, deberá aplicarse á las grandes presas, incluso las de altura excepcional, en las que tan sólo habrá de adoptarse la precaución de emplear cementos de gran resistencia y fábricas muy buenas en su parte inferior; pero cuando se trate de presas de poca altura, y en las que el espesor en la coronación haya de ser relativamente considerable, podrá obtenerse alguna economía determinando el perfil por medio del procedimiento general expuesto. Aun en este caso, sobre todo si se aceptan ligeras tensiones en el paramento de aguas abajo á embalse vacío, dará con frecuencia la solución más sencilla y económica el perfil triangular con ángulo en el vértice algo más reducido que el que tiene por tangente $\frac{1}{\sqrt{k-1}}$, al que se agregue un macizo en la parte superior para constituir el espesor. De todos modos, la reducción en el área así obtenida no será considerable, y, á mi entender, será preferible en todos casos aligerar la coronación, según se ha dicho en lugar oportuno, y aceptar tal como se propuso el perfil triangular, pues no son las presas construcciones en las que deba llevarse la economía hasta sus últimos límites, ni de la experiencia del pasado sacarán alientos los audaces para sacrificar á ella los consejos de la razón y de la prudencia (1).

(1) En la impresión de estos artículos se han deslizado varias erratas. He aquí la corrección de algunas de importancia que se han notado:

Página 209, columna segunda, línea 16, donde dice E, léase ϵ_0 .

En la figura de la misma página y columna, debe entenderse que la indicación de la parte superior ϵ_0 , es la cota que representa el espesor de la coronación.

Página 200, final de la segunda columna, donde dice

$$N E - 6 M \geq 0 \text{ (C)},$$

debe decir

$$N \epsilon - 6 M \geq 0 \text{ (C')}.$$

Página 210, principio de la primera columna, donde dice

$$N E - 6 M > \epsilon'^2 y \text{ (C')},$$

debe decir

$$N \epsilon - 6 M \geq \epsilon'^2 y.$$

Página 210, columna segunda, donde dice en la fórmula (5)

$$P = n = \frac{N}{Q} - \frac{6 M}{\epsilon^2},$$

debe decir

$$P = n' = \frac{N}{\epsilon} - \frac{6 M}{\epsilon^2}.$$

Página 211, columna primera, en las fórmulas (6), el valor de n_1 debe ser

$$n_1 = y + P'' \frac{x^2}{2} + Q'' \frac{x^3}{6}.$$

Página 212, columna primera, línea 19, donde dice

«... el valor mínimo de ...»

debe decir

«... el valor máximo ó mínimo de ...»