

en ella puede verse cómo la posición 8.^a, que inmoviliza las tres palancas, no puede alcanzarse desde ninguna otra, y así las posiciones prohibidas son cuatro en vez de tres; el conjunto equivale a tres enclavamientos binarios, según las ecuaciones

$$\begin{aligned}(A^+ B^- C^-) + (A^- B^- C^-) &= (B^- C^-) \\ (A^- B^+ C^-) + (A^- B^- C^-) &= (A^- C^-) \\ (A^- B^- C^+) + (A^- B^- C^-) &= (A^- B^-)\end{aligned}$$

y así resulta que la coexistencia de tres enclavamientos ternarios entre tres palancas encubre siempre algún binario.

Con mayor motivo la coexistencia de más de tres enclavamientos ternarios produce siempre indirectamente enclavamientos binarios.

(Continuará.)

Antonio PRIETO,

Profesor de la Escuela de Caminos.

Enseñanzas que se derivan de la rotura de las presas

Conferencia dada por D. José Luis Gómez Navarro en la Asociación de Ingenieros de Caminos el día 20 de mayo de 1936

Elección del tema. — He elegido el tema *Enseñanzas que se derivan de la rotura de las presas*. Quizás parezca un poco macabro esto de andar y pensar entre y sobre ruinas o cadáveres de obras ingenieriles. Pero a muchas ruinas les quedan alientos de vida para contarnos las causas de su fracaso. La muerte, generosa, antes de ser efectiva, nos da enseñanzas de vida. Es ley de ésta. Y por ella, para vivir nosotros, sacrificamos seres de condición inferior. Y así, en la esfera ingenieril rompemos probetas de hormigón y metales para conocer el límite de su resistencia, y no llegar a él, para que perduren las construcciones de que forman parte. Y así se construye y se determina la rotura de la presa bóveda de Stevenson Creek, en los Estados Unidos, para deducir normas de cálculo y resistencia de este tipo de presas. Y de este modo, análogamente al médico, que de la disección de los cadáveres saca enseñanzas de las causas de la muerte y las aplica para conservar la existencia de los vivos, el ingeniero y el arquitecto, de la averiguación de las causas de la ruina de las construcciones deduce normas para no incurrir de nuevo en las deficiencias que ocasionaron aquélla.

Los fracasos propios o ajenos constituyen como hitos que marcan al proyectista y al constructor el camino de la prudencia. Prudencia, espíritu conservador, que no debe exagerarse; porque muchas veces, los progresos van unidos a la osadía. "Audaces Fortuna juvat".

Datos deficientes para enjuiciar. — En la destrucción de las presas se está en circunstancias desfavorables para determinar las causas, con respecto a la rotura de otras obras ingenieriles. Se arruina un edificio, un puente, un túnel, un terraplén, etc., y los residuos quedan allí; podemos examinar el cadáver de la obra y deducir sus consecuencias. En las presas, la ola de riada arrastra las partes de aquélla, y muchas veces la base de su apoyo; las desfigura, y pocas veces quedan en condiciones de poder deducir, con toda claridad, la causa de la catástrofe. Investigaciones cuidadosas, antecedentes, defectos antes observados, etc., es decir, toda una delicada, laboriosa y verdadera labor policíaca hace falta para reconstruir con fundamento las causas de la ruina.

Las roturas en presas originan las catástrofes de más importancia. — Si en todas las obras hay que evitar ésta, el cuidado, si cabe, debe ser mayor en las presas. Porque con éstas se pierde no sólo el valor de la obra, sino que lleva consigo la devastación en propiedades aguas abajo; y muchas veces la pérdida de centenares de vidas. La importancia de la catástrofe es, por ello, mucho mayor en las presas que en cualquier otra obra ingenieril.

De las estadísticas de roturas de presas, la más completa que conozco es la que publicó la revista *Proceedings*, de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, en su número de enero de 1932, y que reproduzco en mi libro "Saltos de agua y presas de embalse". Se catalo-

gan en dicha estadística 293 casos de rotura, comprendiendo toda clase de tipos de presas. Las causas se clasifican en 18, y son:

1. Aliviadero insuficiente, con 58 casos = 20 %.
1 a Aliviadero insuficiente, por ola de riada debida a rotura de una presa de agua arriba, con 9 casos = 3 %.
2. Rastrillos inadecuados. Cimentación porosa con filtraciones o erosión bajo la presa de tierra o permitiendo el deslizamiento en las presas de fábrica, con 52 casos = 18 %.
3. Faltas de construcción. Material poco compacto en las presas de tierra o defectuosa ejecución en las de fábrica, con 26 casos = 9 %.
4. Filtraciones en el contorno de las tuberías que atraviesan la presa en las de tierra o escollera, con 18 casos = 6 %.
5. Defectos de proyecto. Taludes demasiado fuertes en las de tierra; sección demasiado ligera en las de fábrica, con 17 casos = 6 %.
6. Insuficiencia de medios para desviar el río durante la construcción, con 9 casos = 3 %.
7. Excesiva cantidad de arcilla u otra clase de material fino, con 12 casos = 4 %.
8. Presión del hielo o efecto de desintegración por el mismo, con 9 casos = 3 %.
9. Explotación o conservación inadecuada, con 7 casos = 3 %.
10. Minado por animales roedores, 4 casos = 1 %.
11. Materiales malos o conteniendo sales solubles, 3 casos = 1 %.
12. Cimentación inestable o débil, 6 casos = 2 %.
13. Tuberías a través de presas de tierra o escollera deficientemente apoyada, que ocasionan asientos o rotura. Mala colocación de las válvulas, 3 casos = 1 %.
14. Erosión al pie de la presa o aliviadero, 4 casos = 1 %.
15. Terremotos, 5 casos = 1 %.
16. Varias causas o causas indeterminadas, 47 casos = 16 %.
17. Rotura del fondo en pequeños embalses, 6 casos = 2 %.

Vemos, pues, por las anteriores cifras que la insuficiencia de aliviadero es la principal causa de rotura de presas, resultando por esta causa 58 roturas, o sea un 20 % de los casos reseñados. Le sigue muy cerca en importancia la tercera, que dice "Rastrillos inadecuados. Cimentación porosa con filtraciones y erosión bajo las presas de tierra o permitiendo deslizamiento en las de fábrica, causa que cataloga 52 casos de los 293, o sea un 18 %.

Continúa en el orden de importancia "Las faltas de

construcción. Material poco compacto en las presas de tierra o defectuosa ejecución en las de fábrica", que comprende 26 casos, o sea el 9 %.

En el libro de Joel Justin *Earth Dams Projects* se consigna en su edición de 1932 y página 1.^a, una estadística de 102 casos de rotura de presas de tierra con la siguiente clasificación de causas y porcentajes, según los ingenieros de la West Virginia Power, y según el autor:

CAUSA DE LA ROTURA	Porcentaje del total número de roturas, según los ingenieros de la West Virginia Power.	Porcentaje del total número de roturas, según Instin.
Insuficiencia de aliviadero.	34,5	39
Filtraciones a lo largo de los conductos	16,5	19
Otras filtraciones	26,4	29
Deslizamientos	15,4	5
Varias otras causas	3,6	4
Causas desconocidas	3,6	4
	100,0	100

Como se ve por esta estadística, la causa principal de la rotura de presas es también la insuficiencia de aliviadero.

I. INSUFICIENCIA DE ALIVIADERO.

Insuficiencia de aliviadero. Dos grupos de presas. — Las presas pueden dividirse en dos grandes grupos: 1.º, presas de materiales incoherentes, en los que éstos se mantienen unidos por su peso, consiguiendo la impermeabilidad, o por apelmazamiento del material de composición adecuada por medio de apisonado, cilindrado, sedimentación, o por pantalla de fábrica o metálica junto al paramento de aguas arriba o en el interior de la sección. A este grupo pertenecen las presas de tierra o de escollera; 2.º, presas de materiales coherentes, que son aquéllas en que entra un material aglomerante que las une, dándoles, a la vez, estabilidad e impermeabilidad. A este grupo pertenecen las de fábrica, cualquiera que sea su tipo: de gravedad, bóveda sencilla, bóvedas múltiples, de pantalla espesa con contrafuertes y otros tipos especiales.

De las causas reseñadas hay unas que afectan a todos los tipos de presas, y otras que son peculiares de uno o varios, pero no de todos los tipos. La primera y más importante causa, la de insuficiencia de aliviadero, es general a todos los tipos, si bien tiene más importancia en general de materiales incoherentes.

Las de incoherentes se arruinan por lámina vertiente. — Es evidente que las presas de materiales incoherentes no pueden soportar una lámina de agua que vierta por encima de su coronación, porque los materiales serían rápidamente arrastrados, especialmente si son de tierra; menos rápidamente si de escollera de grandes bloques; y la presa destruída. Pero antes de llegar a este caso, antes de que rebalse el nivel de las aguas del embalse el de la coronación, las olas que se forman en todo embalse por el encajonamiento de los vientos en las cerradas en que se ubican las presas, tanto más importantes en altura cuanto mayor longitud haya de embalse, estas olas al romper sobre la presa pueden erosionar la coronación y abrir brecha en ella, por donde empiece a verter el agua, que produciría la ruina de la obra. Así, el resguardo o distancia vertical que se debe dejar entre el máximo nivel de aguas con aliviadero vertiendo a toda capacidad y el de la coronación de la presa, debe ser mayor a medida que aumenta su altura, y con ella la capacidad del embalse y la magnitud de las olas, pues

entonces mayor es el peligro de rotura de presa y de destrucción de vidas y haciendas.

Asientos. — Otra circunstancia que puede ocurrir en las presas de tierra y escollera y que puede determinar que las aguas viertan antes de llegar al nivel general de la coronación es el que, a virtud de naturales asientos, tanto mayores en las presas de tierra y escollera cuanto mayor es la altura de la presa y menos consolidados estén los materiales, ciertos puntos de la presa, especialmente los de mayor altura, tengan menos resguardo que el supuesto en el proyecto. Por ello conviene vigilar estos asientos, que son mayores en las presas del tipo americano de escollera, es decir, ejecutados a escollera perdida. Y así, en la presa de San Gabriel número 2, de 80 m. de altura sufrió un asiento de 3,60 m., es decir, el 4,5 por 100. Siendo así que la presa Morena, de 45 m. sobre el cauce, asentó sólo 0,45 m. (1 por 100) y la de Dix, de 84 m. sólo 0,50 (0,6 por 100). El asiento sufrido por la de San Gabriel determinó la dislocación de la pantalla y la reconstrucción de ésta en la actualidad. En las de Davis Bridge, Somerset, el asiento superó escasamente del 1 por 100 después de varios años de observación. Éstas son de sedimentación hidráulica.

Insuficiencia de aliviadero en las presas de fábrica. No se crea que por estar las presas de fábrica constituidas por materiales coherentes quedan libres de que se produzca la rotura por insuficiencia de aliviadero. Seguramente, son muchos los casos en que en estas presas, no proyectadas para que el agua vierta por encima, ha vertido; y no han ocurrido desastres. Acháquese esto al amplio coeficiente de seguridad que tiene su proyecto, y a su buena cimentación y construcción. Pero el aumento de nivel de aguas en el embalse por encima de la hipótesis de cálculo que suele ser el nivel de aguas al mismo que la coronación, puede determinar la presencia o el aumento de importancia de enemigos de la estabilidad, con los que no se contó al proyectarla, o, por lo menos, no se le dió el valor que luego adquieren.

Tensiones peligrosas en las presas de gravedad. — Al subir el nivel de agua, por deficiencia del aliviadero, por encima del supuesto y aumentar la presión hidráulica, sale la resultante por fuera del núcleo central, se crea una zona de tensiones junto al paramento de agua arriba o se aumentan las que ya existían; como pasó en las presas de Habra y Bouzey. Pueden estos esfuerzos de tensión superar a la resistencia del material y agrietarse la fábrica. Además, todos sabemos que se forman en la masa las juntas de trabajo, es decir, juntas de deficiente pegamento entre la superficie que limita el hornigón de una jornada y el nuevo que se coloca a veces días o semanas después. Por esta junta, o por aquellas grietas, penetra el agua con mayor presión que la calculada, produciendo una considerable subpresión que determina la disminución del efecto estabilizador del peso, y puede ocasionar el deslizamiento o vuelco, favorecido por las juntas de contracción que se hayan dejado en la presa, o las grietas que inevitablemente se habrán abierto. Y así se arruinaron las presas de Bouzey y de Habra y de Molare.

Erosiones al pie. — Además, supongamos que el perfil de la presa pueda resistir estos esfuerzos por sus dimensiones, o por su esmerada construcción, que permita tensiones del orden de las que se produzcan, sin merma de la cohesión del material. Pero esta presa puede estar asentada sobre roca fragmentada, o sobre margas deleznales que no soporten la lámina vertiente. Entonces se producen erosiones en su pie. Los remolinos que se asientan en ellas pueden determinar una erosión regresiva que disminuya la superficie de apoyo de la presa, o que permita que, aun dentro de la roca subyacente, se pueda formar un plano de hilada en la que la resultante quede fuera de él o muy desplazada del núcleo central y se origine el vuelco o deslizamiento, especialmente si la roca está estratificada hacia agua abajo. Se arruinó así la presa de Austin (Texas), entre otras.

Mayores roturas en presas de tierra y escollera. — Se ve, pues, por las consideraciones anteriores, que la insuficiencia de aliviadero es causa de rotura de presas de cualquier tipo; pero que especialmente es temible dicha insuficiencia en las presas de tierra y escollera, y así resulta de las consideraciones anteriores y de la estadística a que antes nos referimos, que arroja las siguientes cifras:

TIPOS DE PRESAS	NÚMERO DE PRESAS ROTAS		Tanto por 100.
	Por todas las causas.	Por insuficiencia de aliviadero.	
Presas de tierra	159 (55 % del total de las 293)	44	28 % de las 159
Presas de escollera	12 (4 " " ")	4	33 " " 12
Presas de gravedad	67 (23 " " ")	6	9 " " 66
Presas bóveda	2 (1 " " ")	0	0
Presas Bov. multi	12 (4 " " ")	0	0
Presas metálicas	1 (0,3 " " ")	0	0
Presas de madera	17 (5 " " ")	2	12 " " 17
Presas de tipo ignorado	23 (8 " " ")	2	9 " " 23
TOTAL	293	58	20

Es decir, que de los 58 casos de rotura de las 293 presas, ocurridas por insuficiencia de aliviadero, 48 casos se refieren a presas de materiales incoherentes (tierra y escollera) y diez a presas de gravedad madera o de tipo ignorado.

Normas para el aliviadero. Riadas según la superficie de la cuenca. — Se ve, pues, la importancia que tiene el proyectar el aliviadero con capacidad suficiente. ¿Y qué normas deberán seguirse para deducir el caudal máximo de riada que sirva de base para calcular el aliviadero? Lo más exacto sería disponer de aforos de garantía en una serie indefinida de años. Pero esto es un ideal irrealizable. Aun en los países más adelantados, las estadísticas alcanzan a un número muy reducido de años. Y aun en ellos, ante un caudal de máxima riada, cabe que se produzca, en lo sucesivo, otra que la supere. En cuencas pequeñas puede ocurrir que un chaparrón de gran intensidad se precipite a la vez en toda la cuenca y que dure lo suficiente para que coincidan en el punto de observación escorrentías producidas en el tiempo de máxima precipitación, procedentes, a la vez, de la parte más lejana y de la más próxima. Y si a esto se añade la probabilidad de que estas intensas precipitaciones ocurran en primavera con temperatura de fusión de las nieves que pueden cubrir parte importante de la cuenca, se comprende que el caudal específico de riada por kilómetro cuadrado y por segundo sea muy grande.

Además, las cuencas pequeñas corresponden a las cabeceras del valle que tienen gran pendiente y altitud. La pendiente hace que aun siendo de corta duración el chaparrón, se precipiten rápidamente las escorrentías de los puntos más alejados de las cuencas, coincidiendo con las originales en los puntos cercanos a la ubicación de la presa. La gran altitud determina almacenamiento de nieves en el invierno, cuya fusión aumenta el caudal producido por las lluvias primaverales.

Pero esto no puede suceder en cuencas grandes. En ellas las lluvias más intensas de turbión no pueden producirse a la vez en toda la cuenca. Y aunque ocurrieran, no es posible que durasen tanto para coincidir en la presa escorrentías producidas en toda ella por dicho turbión de máxima intensidad. Ni tampoco que las nieves ocupen el tanto por ciento elevado de superficie que pueden cubrir en cuencas pequeñas. Por esto el caudal específico disminuye a medida que aumenta la cuenca.

Cómputo de años. — La riada no sólo es función de así, a medida que se compute más tiempo en la aprecia-

ción de riadas, cabe que estos valores se vayan superando. De modo que el tiempo es un elemento a considerar en la apreciación de la máxima riada. Y así se dice una riada que ocurra por término medio una vez cada diez, cien, mil años. Y así, en las fórmulas de Fuller y de Creager, los caudales vienen expresados en función de la superficie de la cuenca y del número de años en que se considere que pueda ocurrir una vez una riada de la importancia correspondiente. Estas fórmulas están deducidas de observaciones de máximas riadas en ríos americanos.

Existen, además, multitud de fórmulas prácticas para deducir el caudal de máxima riada, la mayor parte de ellas expresadas en función de la superficie de la cuenca; en otras, entrando además de ésta la intensidad de la lluvia y la temperatura. Y así han dado fórmulas o curvas Fanning, Dickens, Ganguillet, Kuickliug, Murphy, Vermuele, Ryves, Valentini, la Geological Survey (Estados Unidos) y nuestro González Quijano. Pero estas fórmulas, deducidas por observaciones en una determinada cuenca, y muy útiles en ella, no deben generalizarse a todas. Y así, sus resultados son muy dispares, llegando algunos o ser dobles de los otros. Como se puede ver en las curvas que las traducen y que figuran en mi libro.

Estadística de Hanna. — En la obra de Hanna *Design of dams*, se citan 950 observaciones de máximas riadas en ríos americanos. En un artículo que publiqué en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS en 1.º de noviembre de 1935, al ocuparme de la rotura de la presa de Molare en Italia, extractaba dichas observaciones agrupándolas por superficies de cuenca, y encontrando el valor específico de riada en metros cúbicos por segundo y kilómetro cuadrado. Y en ellas se ve claramente la disminución de este valor con el aumento de la superficie de cuenca. Y así, en cuencas de extensión comprendida entre 1 y 5 kilómetros cuadrados, para trece observaciones, tiene un valor medio específico de 18,5 m.³/s./km.², con un máximo de 41,7 y un mínimo de 0,25. Mientras que en cuencas comprendidas entre 50 000 y 100 000 kilómetros cuadrados el valor específico medio es de 0,088, con un máximo de 0,34 y un mínimo de 0,011. En la presa de 222 m. de altura de Boulder Canyon, que tiene 630 000 km.² de cuenca (es decir, una superficie mayor que la de España), la riada máxima apreciada es de 8 500 m.³/s., con un caudal específico de 0,014.

Torrencialidad de ríos españoles. — Y llamamos aquí

la atención respecto a la torrencialidad de los ríos españoles. El Guadalquivir tiene de cuenca total 56 500 km.², y su riada máxima es del orden de 7 a 8 000 m.³/s. Es decir, análoga a la del Colorado, en Boulder Canyon, teniendo allí dicho río una cuenca once veces mayor.

Comparación con otras cuencas. — Por todo lo que llevamos dicho, el ingeniero debe tener la máxima prudencia al apreciar el caudal máximo de riada. No deben bastarle los datos estadísticos que posea, sobre cuya garantía debe tratar de enjuiciar con fundamento. Elementos para conocer aproximadamente el valor deseado pueden ser el conocimiento de caudales de máxima riada en cuencas que tengan análogas condiciones de altitud, orientación, superficie, orografía, clase de terreno y vegetación que la que afluye a la presa, para cuya comparación deben servirle las observaciones pluviométricas de ésta comparadas con las de la análoga. Es muy interesante a este respecto, y puede servir para orientación, lo que se consigna en el informe que emitieron al Ayuntamiento de Bilbao los ingenieros de Caminos D. Severino Bello, D. José Orbegozo y D. Pedro Miguel González Quijano, respecto a los proyectos presentados para el abastecimiento de la población.

Füller y Creager. — Y cuando menos, como elemento comparativo y a falta de datos completos y fidedignos de la cuenca de que se trate, se debe acudir a las fórmulas de Füller y de Creager, o a las observaciones a que antes nos referimos de ríos americanos que figuran en el libro de Hanna, y que se extractan en el número de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de 1 de noviembre de 1935.

Pero aun partiendo de datos suficientes de observación directa, de aforos, siempre existe la indeterminación que representa el pensar si, en el porvenir, puede ocurrir una mayor riada que la consignada en los datos de aforos fidedignos que se posean. Y si se hace uso de las fórmulas de Füller, ¿qué cómputo de tiempo se tomará para determinar el valor de máxima riada que pueda ocurrir una vez en cada lapso de tiempo que se fije? Y aun más: en la fórmula de Füller, en medidas americanas, hay un coeficiente que varía desde 45, para la cuenca del Colorado, a 210, para la vertiente del Pacífico. Los gráficos que figuran en libros americanos y que traducen dicha fórmula, se han hecho para valor de este coeficiente (fórmula en medidas inglesas) de 100.

Cómputo de años, según Creager. — Creager, en su obra *Hydroelectric Handbook*, dice que cuando la rotura de la presa no puede llevar en sí pérdidas de vidas humanas, puede partirse de un cómputo de cincuenta años en el cálculo de la riada máxima. Pero en presas situadas agua arriba de poblaciones, este cómputo debe ser de mil y hasta de diez mil años. Esto daría valores enormes, extraordinariamente conservadores. Y basta para ello citar un caso: En una presa española que tiene una cuenca de 17 000 km.² se llevan hechos aforos muy cuidadosos durante veinte años, obteniéndose caudal de máxima riada inferior a 3 000 m.³/s. Si se partiese de un cómputo de tiempo, en la fórmula de Füller, de mil años, se obtendría un caudal de más de 10 000 metros cúbicos por segundo, y si el cómputo fuera de cien años, de unos 8 000 m.³/s. Los datos que conozco de ríos españoles permiten asegurar que los valores deducidos de las fórmulas de Füller y Creager son extraordinariamente mayores que aquéllos.

Coficiente de garantía Hanna. — Hanna, en su obra *The Design of Dams*, dice que donde se hayan observado riadas durante veinticinco años o más, al aliviadero debe dársele una capacidad de un 25 a 50 por 100 mayor que la máxima riada registrada. Si el período de observación es menor de veinticinco años, el aumento debe ser del 50 por 100 o más.

La prudencia en fijar el ingeniero este dato ha de depender del tipo de presa y de la magnitud de desastre que su rotura ocasionaría. Más prudencia, es decir, valor

más alto de riada, debe considerarse cuando la presa sea de materiales incoherentes, que en las de fábrica.

Riada por rotura de presa aguas arriba. — Han ocurrido roturas de presas que debemos considerar verdaderamente excepcionales, por insuficiencia de aliviadero, determinadas por ola de riada ocasionada por rotura de una presa de agua arriba. Y así, en la estadística a que antes nos referimos de los 293 casos de rotura se catalogan nueve debidos a dicha ola de riada. De ellos, ocho de presas de tierra y uno de gravedad. Esta última, sin duda, es la de Saint Denis du Sig, en Argelia, que se destruyó, por ola de riada producida por la rotura de la presa de Cheurfas, situada agua arriba. Y esta misma causa ocasionó la rotura de la presa de Harfield, por destruirse la de agua arriba de Dells, ambas de tierra. Y de la misma manera se rompió la presa de tierra de Dessert, por rotura de la de Melville, también de tierra; y la presa de tierra de Coedty, por rotura de la de fábrica del lago Eigiau; y la Tronk Lak, y otra situada aguas arriba (Earth Dams of Justin, p. 31), y las de Langewald y Robert. (E. N. R. 1922, 20 julio, página 121.)

Se comprende lo difícil y costoso que habría de resultar si construyésemos un aliviadero capaz de dar salida a una ola de riada producida por rotura de presa superior. Y esto viene a confirmar que, en muchas ocasiones y para evitar catástrofes, no basta la prudencia, el espíritu conservador de un individuo o de una colectividad. Hay que contar con iguales condiciones en los demás. Y para obtener esto se precisa una concienzuda inspección de los proyectos, y de la construcción y conservación de las presas existentes, que sólo el Estado puede efectuar.

Valor de los aforos. — Respecto al valor que se pueda dar a los datos estadísticos, hay que tener en cuenta la dificultad de apreciar el caudal de máxima riada. Corrientemente, el observador no está presente en el momento álgido, y tiene que deducir el caudal por el nivel obtenido por la riada, suponiendo una pendiente superficial, que suele ser diferente de la de fondo, desconociendo el coeficiente de rugosidad y aplicando fórmulas de régimen uniforme, que no son adecuadas al caso. Y aun estando presente el observador, suelen fallar los procedimientos usuales y posibles de aforo.

Disposición y forma del aliviadero. — Además, partiendo de un cierto caudal de riada, hay que dar al aliviadero disposición que lo absorba. ¿Y cómo se calcu-

la? La fórmula corriente de Dubuat $Q = \frac{2}{3} \eta l h \sqrt{2gh}$,

o abreviada $Q = C l h^{\frac{3}{2}}$ es aplicable si conocemos el

valor de C . Pero éste varía según la forma del perfil del aliviadero, posición de éste respecto a la presa, espesor de la lámina vertiente, longitud de aquél, capacidad del canal y túnel siguiente, posible aportación de aire en los conductos cerrados que sigan al aliviadero o entidad del vacío que se forma. En las presas vertedero en perfil en cimbras ("Ensayos en la presa de Keokuk", *Proceedings*, 1929, pág. 305, y Wilson, págs. 21-31), el valor de η oscila entre 0.66 y 0.71, con lámina vertiente espesa. Pero en aliviadero de pozo o de labio libre, seguidos de túnel, el valor puede disminuir extraordinariamente. Así, en el ensayo en modelos reducidos de la presa de Sulak (Rusia), en proyecto, mayor que la de Boulder, el valor de η resultaba 0.54. Se suponía en el proyecto de 0.46. Y en los ensayos de la presa de Sion, en ciertas condiciones de aliviadero, resultó 0.34, y en otras, 0.67. Por ensayos en modelos reducidos en la presa de Sulak, se dedujo la conveniencia, para aumentar la capacidad del aliviadero, de determinar la entrada de aire para compensar el vacío en la zona de construcción de la entrada de agua.

Modelos reducidos. — Por ello hay que proceder sis-

temáticamente al ensayo en modelos reducidos, como ya se ha hecho en muchos casos españoles (Jándula, Alcalá del Río, Alloz, Escla, Barasona, Rosarito, Camporredondo, etc.), y para esto la Escuela de Caminos está convenientemente equipada, si bien es de extraordinario interés el que se ampliase el Laboratorio y se llevase a cabo la construcción del proyecto, para que los ensayos de toda índole, especialmente en modelos reducidos, pudieran ampliarse y hacerse con la rapidez y garantía necesarias. Estamos en esto como en otros muchos aspectos de la técnica, con retraso respecto a otras naciones, especialmente por falta de dotación presupuestaria. No por falta de elementos técnicos directivos.

¿Conviene proyectar con un excesivo margen de garantía? — Cuando en presas de fábrica, no vertedero, se pueda contar con la resistencia de su perfil transversal a una posible lámina vertiente por encima de ella, y sólo sean de temer erosiones en su pie, cabe pensar si sería o no conveniente el dotar al aliviadero de una capacidad de riada que sólo en el cálculo de probabilidades pueda presentarse en un lapso de tiempo muy largo, aumentando así extraordinariamente el coste de primer establecimiento de la obra, sobre cuya explotación habrían de pesar los intereses del exceso de coste, o sería mejor solución el dotar al aliviadero de menor capacidad, a reserva de hacer, cuando ocurran estas riadas extraordinarias, las consiguientes reparaciones de los daños que pudieran ocasionar; este es problema que el juicio del ingeniero podrá resolver en cada caso.

En la presa de Wilson, de unos 24 m. de altura y 950 m. de longitud, coronada, con 58 compuertas de 10 metros de luz y 5,40 de altura, a los dos años de explotación se apreciaron socavaciones en su pie, en extensión superficial de 60 por 30 m. y profundidad de 3 m., a pesar de estar cimentada sobre roca estratificada.

En resumen, insistimos en la enorme importancia que el aliviadero tiene en las obras de presas. No siempre se le dedica la atención debida; concentrando esta principalmente en la presa, y considerando aquél como obra accesoria, descuidando su proyecto y atacando su construcción con retraso; sorprendiendo algunas veces la presencia de riadas, a las que tiene que dar paso, sin estar completamente terminado, y teniendo que cumplir su misión de modo deficiente.

El ingeniero al proyectar la obra hidráulica no debe formarse concepto de la importancia del río al apreciarlo en la época de toma de datos en que las aguas bajas o altas suelen darle una apariencia de tranquilidad, de placidez. Es entonces el río como un amigo acogedor y dispuesto a prestarnos los servicios que de él pidamos. Debe pensar en la época de río embravecido, con enormes caudales y grandes velocidades, e imaginar el modo de defenderse de él, de desviar su ímpetu y acallar sus violencias. La amistad se ha trocado en enemistad. Hay que contar con ella, con sus protestas al atajamiento y desviación de su curso.

Las deficiencias de los aliviaderos suelen ser las causas principales, como hemos visto, de las roturas de las presas. A veces el aliviadero representa un coste del 30 al 50 por 100 del total de las obras. Y en consonancia con estas circunstancias hay que dedicarle gran atención. Debemos insistir en la importancia que se debe dar a los aforos que deben extenderse y metodizarse. Aforos que sirven de base al ingeniero para conocer los recursos hidráulicos de la cuenca y deducir la importancia de la presa que proyecta primero, y luego construye, y para presumir la importancia de la riada máxima, de la que tiene que defender la obra.

También llamamos la atención respecto a la necesidad más que conveniencia, de hacer ensayos en modelos reducidos para deducir con fundamento práctico la capacidad de evacuación del vertedero que proyectó. Y en algunos casos conocer la velocidad de las aguas y la dirección de los filetes líquidos de máxima velocidad para prever disposiciones de defensa contra erosiones.

Algunos casos de rotura de presas por insuficiencia de aliviadero.

PRESAS DE TIERRA.

1. *Presa de tierra de Jonstown.* — En el río Fork (E. U.) 22 metros de altura. Se construyó para fines de navegación. Se abandonó. La adquirió una Empresa para fines de pesca. Ocurrió una avería, se reparó mal. Se inutilizaron los desagües, que no servían para fines de pesca. En el aliviadero se pusieron redes. En 1889 ocurrió una gran riada. Las aguas volcaron sobre la presa, destruyéndola, perdiendo la vida 10 000 personas, amén de haciendas y casas arrasadas. A fines de marzo de este año 1936, ocurrió una riada similar a la de la rotura citada, llegando a los segundos pisos de las casas (5,20 metros en el Ayuntamiento). Dos puentes destruidos; 100 000 000 de dólares de pérdidas. (*Engineering News Record*, 1936, 26 marzo, pág. 442.) El río atraviesa la ciudad.

2. *Presa de tierra de Hemet.* — California (E. U.) Cerraba una depresión lateral en un embalse originado por presa de fábrica. Altura de aquélla, 6 metros. La presa de fábrica de aliviadero insuficiente. En la riada catastrófica, el agua volcó 1,50 metros sobre la presa de fábrica. No llegó a volcar sobre la coronación de la de tierra, pero pasó filtrándose por encima del núcleo impermeabilizador y por debajo del apoyo de la presa, que fué arrasada.

3. *Presa de tierra Loch Alpine.* — Michigán (E. U.). Escasa altura. Volcó el agua por encima, destruyendo la presa, desintegrada antes superficialmente por heladas.

4. *Presa de tierra de Horton.* — (E. U.). 11 metros de altura. Volcó por encima.

5. *Presa de tierra de Dells.* — Wisconsin (E. U.). Presa de tierra de escasa altura y mucha longitud. Por insuficiencia de aliviadero el agua volcó por encima y la arrastró. La ola de riada destruyó la presa Hatfield, situada aguas abajo. (*Earth Dams*, Justin, pág. 21.)

6. *Presa de tierra de Schenectady.* — N. Y. (E. U.) (*Earth Dams*, Justin, pág. 24). Altura, 9 metros; ancho en la coronación, variaba de 3 a 4,50 metros. Taludes ambos 1 : 1. Pantalla interior de madera. No tenía aliviadero; la única salida de agua era una compuerta situada en un tubo de 1,80 metros. Por insuficiencia de este desagüe el agua volcó sobre la presa y la arrasó.

7. *Presa de tierra de Goose Creek.* — (South California). (*Earth Dams*, Justin, pág. 26). 6,6 metros de altura. Ancho en la coronación, 3 metros. Taludes ambos 3 : 1. Bien construida. Un aliviadero de 30 metros en cada ladera. Por insuficiencia de éstos volcó el agua sobre la presa, que quedó destruida en julio de 1916.

8. *Presa de tierra de Tront Lake.* — Colorado (E. U.) (*Earth Dams*, Justin, pág. 31). De 7,50 metros de altura. Ancho de la coronación, 1,80 metros. Talud aguas arriba, 2 : 1. El talud éste, en gran parte protegido por escollera; en el resto con encofrado. El aliviadero formado por dos canales de madera, uno de 1,30 de ancho por 1,20 de fondo; el otro de 2,10 metros de ancho; se rompió agua arriba una presa de encofrado de la misma Compañía (Telluride Power Company), y la riada arrasó la de Tront, por insuficiencia de aliviadero.

9. *Presa de tierra de Liddetade.* — Colorado (E. U.) (*Earth Dams*, Justin, pág. 33). Se rompió en agosto de 1909. Altura, 6 metros y 330 metros de longitud. El talud de aguas arriba, protegido con escollera. Aliviadero de 52 metros de longitud en un estribo de la presa. En el punto más bajo y atravesando la presa, un conducto de desagüe; pero se rompió la válvula y quedó inútil. Una riada, por insuficiencia de aliviadero, volcó sobre la presa y la destruyó.

10. *Presa de tierra de Winston.* — (N. C. E. U.) (*Earth Dams*, Justin, pág. 43). Se rompió en marzo de 1912. Altura, 7,20 metros. En el centro, aliviadero de 15,60 metros de longitud de mampostería; a los lados presa de tierra con núcleo central de mampostería. El aliviadero fué insuficiente, volcó el agua sobre la presa, llevándose una parte del dique de tierra de la izquierda del aliviadero, que quedó en pie.

11. *Presa de tierra de Avalos.* — New México (E. U.) (Eng. N. R., 1923, 1.º noviembre, pág. 731.)

Primera rotura, por insuficiencia de aliviadero, en 1893.

Segunda rotura, por disolución sales que contienen las tierras, 1904.

12. *Presa de tierra Eck.* — Okla (E. U.) (Eng. New Recor., 1936, 7 mayo, pág. 678.) Se rompió el 1.º de mayo de 1936 por insuficiencia de aliviadero y volcar las aguas por encima, en espesor de 0,45 metros, abriendo una brecha de 45 metros. La altura de la presa, 6 metros. Longitud, 600. Después de lluvias copiosas, que alcanzaron 144 mm. en dos horas en la presa. En la cuenca mayor, lluvia 200 milímetros.

La presa tenía revestimiento de hormigón aguas arriba, con talud 3 : 1. El de aguas abajo plantado de césped 2 : 1. Se cons-

truyó la presa en 1925. Y entonces el aliviadero era capaz de unos 280 m.³/s., con espesor de lámina vertiente de 1,50 metros. Pero después se elevó el labio del aliviadero 0,75 metros, reduciendo su capacidad a unos 125 m.³/s.

La superficie de la cuenca es de 50 1/2 km.² La riada catastrófica alcanzó un caudal comprendido entre 420 y 500 m.³/s., lo que corresponde a un caudal específico de 8,3 y 10 m.³/s./km.²

13. *Presa de tierra Schaeffer.*—Colorado (E. U.) (Eng. N. R., 1923, 1.º noviembre, pág. 731.) Cuando el agua sólo alcanzaba 1,35 metros sobre el aliviadero, el agua volcó sobre la presa, no se sabe si por las olas o por asiento de la parte central, y produjo un boquete de 22 metros. (Junio de 1921.)

14. *Presa de tierra de Herrin.*—Illinois (E. U.) 12 metros de altura. En junio de 1935 se destruyó por haber asentado 1,20 metros por debajo del nivel normal de la coronación, y volcar el agua por encima. (Eng. New. Record, 26 abril de 1936, página 556.)

PRESAS DE ESCOLLERA.

15. *Presa de escollera English.*—30 metros de altura. Armazón de madera, relleno de escollera. Alzas sobre la coronación. En el momento de la rotura el agua volcaba sobre las alzas; se abatieron éstas y se destruyó la presa.

16. *Presa de escollera Valmut Grove.*—33 metros de altura. Volcó el agua, destruyéndola.

17. *Presa de escollera de Catlewood.*—21 metros de altura. Pantalla de hormigón. El aliviadero en parte de la coronación. En agosto de 1933 saltó el agua por encima de la coronación. Hubo, además, sifonamiento. Se inundó la ciudad de Denver.

18. *Presa de escollera de Bully Creek.*—Oregón (E. U.) 37,50 metros de altura. Pantalla interior de hormigón armado. Empezada la construcción, se detuvo ésta por quebra de la Empresa, dejando uno de los espaldones sin acabar y, por lo tanto, el núcleo sin el apoyo en una altura de 12 metros. El desagüe, que sirvió para desviar el agua durante la construcción, se tapó. Las tomas de agua se obstruyeron en anteriores riadas que agrietaron el núcleo. Y en la riada catastrófica los hielos obstruyeron el aliviadero, saltó el agua por encima de la presa y la destruyó.

19. *Presa de escollera de Lower Otay.*—39 metros de altura. Construida en 1897 para abastecimiento de San Diego (California). Diafragma de impermeabilizador de palastro. En 1936, por insuficiencia de aliviadero, volcó el agua por encima y la destruyó.

20. *Presa de escollera de San Gabriel, número 2.*—80 metros de altura, 175 metros de longitud, 253 metros de ancho en la base: 16 millones de m.³ de embalse. Escollera suelta, menos en el paramento de aguas arriba, donde se arregló a mano en espesor de 7,50 metros. Pantalla impermeabilizadora en el paramento de agua arriba, formada por capa de hormigón en masa que cubría la escollera careada, formando un plano continuo sobre el que dispusieron 4 capas de gunita armada, cada una de 0,15 metros de espesor en la base, y 2 capas sólo en la parte superior. El hormigón en masa formaba paneles de 9 × 9 metros.

Durante el invierno de 1933-1934 ocurrieron grandes lluvias y se ocasionó un gran asiento (3,60 metros como máximo), causando la rotura de la pantalla.

El informe técnico dijo que los taludes y la clase de roca eran apropiados. Pero faltó lluvia o riego que bañase la roca para producir los asientos durante la construcción.

Para repararla se hizo preciso la reconstrucción de la pantalla y la aportación de roca para compensar los asientos. Pero dejando los desagües abiertos, si bien en época normal derivaría el caudal del río, en riadas podría embalsar y perjudicar la presa. Y por ello se aconsejó levantar la pantalla de hormigón resquebrajada y poner provisionalmente otra de 3 capas de tabloncillos de 25 × 5 cm., dejando varios pasos de agua para que pudiera bañarse la escollera y hacer su asiento. Así se podría embalsar, y en campaña posterior, conseguido todo el asiento, sustituir la pantalla de madera por otra definitiva de hormigón armado.

PRESAS DE FÁBRICA.

21. *Presa de gravedad del Habra (Argelia).*—35 metros. Se construyó con un aliviadero de 430 m.³/s. en 1871, y al año si-

guiente una riada de 640 m.³/s. destruyó parte del aliviadero, sin causar víctimas. Riada 1,50 veces mayor que la supuesta. En 1881 sobrevino otra riada de 800 m.³/s. (1,85 veces mayor que la supuesta), que destruyó la presa en 110 metros de longitud y 18 metros de altura, ocasionando 400 víctimas y muchas pérdidas en casas y fincas arrasadas. Se volvió a reconstruir la presa, y en 1927 sobrevino otra riada mayor, que se calculó en 1700 metros cúbicos por segundo (4 veces la supuesta), causando la rotura de la presa que funcionó como aliviadero. No ocasionó víctimas porque hubo tiempo de avisar a los habitantes de aguas abajo. La capacidad del aliviadero antes de la última rotura podía reputarse en 900 m.³/s. La cuenca tiene 8 100 km.² El caudal específico resultaba de 0,11 m.³/s./km.² Y si se entra en las fórmulas de Creager para $T=10$, se obtiene un caudal de 4200 metros cúbicos por segundo, con valor específico de 0,52. Y si el cómputo de tiempo es mayor, el caudal de riada probable aumentaría.

Se ve, pues, claramente, que la incapacidad del aliviadero determinaría una elevación excesiva del embalse, que hizo que se agravasen los defectos del perfil de la presa construida, que tenía una zona de tensiones en el paramento de aguas arriba a embalse lleno.

22. *Presa de gravedad de Sweetwater (E. U.).*—Pasó algo análogo a la del Habra. Se proyectó el aliviadero para 50 m.³/s. Cinco años después de ultimada la presa sobrevino una riada de 148 m.³/s. (3 veces la supuesta). Se aumentó la capacidad y vino otra riada de 500 m.³/s. Se aumentó nuevamente, y otra riada de 1280 m.³/s. hizo desperfectos. Ultimamente, el aliviadero se dispuso para 1900 m.³/s., es decir, 40 veces el caudal primeramente supuesto.

23. *Presa de gravedad de Cheurfas (Argelia).*—Altura, 30 metros. Se terminó en 1884. Por defectos de las margas en que se apoyaba el estribo derecho, que resultaron permeables, al llenarse el embalse en 1885 aumentaron las filtraciones, que arrasaron las margas y se rompió la presa.

Agua abajo de ésta, sobre el mismo río Sig, estaba ubicada otra presa, la de Saint Denis du Sig, de 19 metros de altura, que no pudo soportar la ola de riada y fué arrasada.

24. *Presa Austin, Texas (E. U.).*—Es diferente de la otra presa del mismo nombre rota en Pensilvania. Era presa-vertedero (azud). Alcanzó la lámina vertiente 3,70 metros de altura sobre la coronación, y a consecuencia, además, de socavaciones en su pie, que lo descalzaron, debió iniciarse el vuelco que produjo un levantamiento del pie de agua arriba, penetrando el agua en la grieta, originando la subpresión y siguiendo el deslizamiento de la presa dividida en trozos. En este accidente murieron siete personas.

La causa de la rotura fué, pues, la socavación del terreno en el pie de la presa, que produjo una reducción de la base de sustentación, quedando fuera de su núcleo la resultante, produciéndose tensiones agua arriba, apertura de grietas, subpresión y deslizamiento. (Barrages, de Bonnet, 1931, pág. 650.)

25. *Presa de gravedad Molare (Italia).*—La de este nombre que ataja el torrente Orba, se llama Bric Zerbino y tiene 47 metros de altura. Pero para cerrar una depresión natural en la margen izquierda, agua arriba de aquélla, se construyó otra presa llamada Sella Zerbino, de 15 metros de altura, ambas de gravedad.

Los desagües superficiales (12 sifones) y aliviadero y los de fondo, podrían proporcionar una evacuación de 880 m.³/s. La cuenca es de 141 km.² En agosto de 1935 se produjo una riada del orden de 2000 m.³/s. Los desagües superficiales y los de fondo (alguno de éstos no funcionó bien) fueron incapaces para evacuar tal caudal y el agua volcó sobre las dos presas con lámina vertiente de 2,25 sobre la primera y 2,45 sobre la segunda. fista, más débil y apoyada sobre roca fragmentada y no defendida en su pie de las erosiones, volcó, causando numerosas víctimas.

Se pensó que el caudal específico sería sólo de 2 m.³/s./km.² Y la riada catastrófica dió un caudal de 15 m.³/s./km.² Esta riada es mayor que la que se deduce de las fórmulas Fuller y Creager. En los datos de Hanna para cuencas de 100 a 200 kilómetros cuadrados, se obtiene un valor específico medio de 2 metros cúbicos por segundo por km.² Pero hay alguna observación que dé 13,60 m.³/s./km.²