

Comentario al artículo "Fisuración y erosión interna en presas de materiales sueltos", de M. Romana Ruiz y A. Bernal Riosalido, publicado en el mes de diciembre de 1975.

Por LUIS DEL CAÑIZO Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Dentro de la meritoria recopilación efectuada, no se cita la aportación de E. Nonveiller y P. Anagnosti (V Congreso de Mecánica de Suelos, París, 1961), bastante conocida en España por citarla Jiménez Salas en esta misma Revista (abril 1964). De dicho estudio se deduce la condición $B > c/\gamma$ para núcleo vertical de espesor b , densidad sumergida y cohesión c , pues de este modo una grieta ya iniciada se cerraría sola por fluición plástica del material.

El problema tratado es muy difícil y complejo, pudiéndose hoy sólo dar valores cualitativos, como los del cuadro final de los autores. Como influyen muchos factores resulta difícil aislar uno sólo, y cualquiera de los criterios propuestos más o menos sencillo, aunque se apoye en algún factor verdaderamente influyente, tendrá excepciones entre aquellas presas en las que predominen otras circunstancias; así, pues, en la figura 8 se confirma el peligro de los materiales poco plásticos, y los casos excepcionales (8, 20, 6, 16) se comprueba en la tabla 2 que corresponden a presas muy altas y deformables, con taludes fuertes o con un gran espesor de cimiento compresible. Si en la figura 11 se añadieran los puntos correspondientes a las presas 25, 44, 45, 46 y 47 no cumplirían el criterio propuesto, y serían excepciones, como la 29.

Por otro lado, la interpretación de las nubes de puntos es a veces muy subjetiva. De la figura 3 de Biarez, se puede deducir la conclusión A, 1,5 en lugar de la dada 1 B 4, y en la figura 8 se deduce una recta que se apoya en una nube de sólo tres puntos.

El criterio propuesto simplifica al imitado de Biarez en cuanto que suprime la influencia de la uniformidad de la granulometría y del espesor de la tongada. En efecto, la influencia de la uniformidad con el exponente 1/7 es casi como no considerarla, pero sin embargo es intuitivo y está comprobado que el empleo de una "escollera densa" donde los huecos entre las piedras mayores se rellenan por otras inferiores, aumentando el número de puntos de contacto, conduce a presas menos deformables y que asientan menos. En de-

finitiva, el aplastamiento de esos puntos de contacto causado por la concentración de tensiones, provocará un aumento de la deformación, motivo por lo que el coeficiente es doble para el material de cantera. En cuanto al espesor de la tongada, debe influir, pero conjuntamente con la energía o los medios de compactación empleados, pudiéndose expresar quizá mejor en función de la densidad relativa lograda.

En mi opinión, un intento de cuantificar para tener éxito, debe recurrir a fórmulas más complejas. Además de los factores geométricos ya incluidos en el nuevo criterio propuesto, deben añadirse otros, como son el espesor del cimiento compresible (mayor altura eficaz), el espesor del núcleo (teoría de Nonveiller) e incluso la magnitud de los taludes de la propia presa (limitan algo los asentos) o un cierto factor de forma. Por ejemplo, una cierta forma de arco en planta crea ciertas compresiones longitudinales que pueden dificultar la aparición de fisuras transversales, y también refuerza la estabilidad del talud de aguas abajo y aminora sus desplazamientos horizontales, dificultando la aparición de grietas longitudinales. Es oportuno citar aquí la aportación realizada mediante cálculos tridimensionales en elementos finitos, que señalan las zonas traccionadas con distintos taludes de presa y laderas, o con diferente deformabilidad relativa al núcleo y espaldones, abriendo un camino para contrastar y completar los criterios geométricos de fisuración ("Symposium Application finite element method in Civil Engineering", Nashville, noviembre 1969; Desai, "Proceeding Symposium Application finite element method in Geotechnical engineering", Vichsburgo, septiembre 1972, págs. 170 y 435; Einstein, "Application of F.E.M. to analysis of earth dam", Seminario Universidad Río de Janeiro, septiembre 1974).

Pero un criterio sólo geométrico quedaría incompleto y debería abarcar los parámetros característicos de los materiales y su puesta en obra, que influyen en la facilidad para seguir las deformaciones (densidad relativa, índice de plasticidad, humedad de compactación). Lo más importante sería lograr un buen modelo matemático tensodeformacional del material en presencia de trac-

ciones, para poder utilizar precisamente sus parámetros (deformación máxima sin fisuración en relación al estado tensional, resiliencia, módulo elástico ficticio lineal o no lineal, o cualquiera que fuera el significativo). También

cabe la posibilidad de disponer de una serie de criterios parciales (por ejemplo, uno geométrico y otro del material) que deben cumplirse simultáneamente, para evitar así las excepciones.

Contestación de los autores

Agradecemos a nuestro compañero Luis del Cañizo sus comentarios sobre nuestro artículo "Fisuración y erosión interna en presas de materiales sueltos". La atención y minuciosidad con la que nos ha leído y comentado es prueba del interés del tema.

Sin embargo, quisiéramos volver a escribir que nuestro objetivo era simplemente ayudar al proyectista con unos criterios previos. Y el proyectista de presas no es, ni tiene por qué ser, un especialista en Geotecnia, sino más bien un ingeniero competente con capacidad de síntesis.

Estamos plenamente de acuerdo en la complejidad de un tema abordado hasta ahora solamente en alguno de sus aspectos parciales y en la conveniencia de lograr en el futuro un planteamiento más general.

Consideramos interesante el cálculo tridimensional en elementos finitos, que naturalmente deberá basarse en una previa definición del comportamiento del material (tridimensional, en compresión y en tracción, en función de su granulometría, plasticidad, compacidad, humedad de puesta en obra...). Sin embargo, dichos cálculos no serán realizables en la práctica en algunos años. En nuestra visita al Waterways Experiment Station del Corps of Engineers, de Vicksburg, en junio de 1974 pudimos hablar con Palmerton, quien había realizado un cálculo tridimensional de una presa de materiales sueltos.

Aunque la había simplificado en una cuarta parte considerándola doblemente simétrica, para preparar la entrada del cálculo de ordenador necesitó realizar una maqueta en plástico de la malla de elementos finitos. Este cálculo le ocupó alrededor de un año. También Desai está realizando cálculos tridimensionales de elementos finitos. En junio de 1975, que pudimos verle en la Universidad de Virginia, en Blackburg, estaba realizando un cálculo sencillo de un pilote en una malla tridimensional que serviría como tesis de Master a uno de sus estudiantes.

Se comprende la inaplicabilidad del procedimiento en el momento actual al cálculo de todas las presas en las que se sospeche la existencia de problemas de fisuración, debiendo reservarse para cálculos de investigación y alguno real especialmente difícil.

Por este motivo el artículo se ceñía a una vía semi-empírica, que permitió alcanzar unos ciertos criterios, limitados, pero que nos fueron útiles en el estudio de casos reales y que deseamos y esperamos podrán ser de utilidad a los proyectistas españoles en otros casos semejantes. De entre los numerosos criterios sólo se han recogido los que han tenido cierta sanción práctica y por eso hemos excluido a Anagnosti.

Cara al futuro el tema sigue abierto a la experimentación en una doble faceta:

1. La comparación de las estructuras proyectadas con ensayos de fisuración en laboratorio que permitan estimar la fisurabilidad del material. Esta vía ha sido en parte la adoptada en los recientes trabajos de investigación en curso en el Laboratorio del Transporte (cuyos resultados avanzados en una nota en el *Journal of the A.S.C.E.* esperamos que sean pronto publicados). También la Escuela de Cambridge ha atacado el problema mediante ensayos a flexión de vigas de caolín instrumentadas con el cuidado y la precisión (diríamos que artesana) en ella habituales. Los ensayos estaban avanzados a finales de 1974 y la tesis doctoral a la que pertenecían debe estar ya leída.

2. El cálculo, ya citado anteriormente, de las presas de tierra mediante modelos de elementos finitos. Nadie mejor que Luis del Cañizo, animador de un seminario sobre el tema en la Escuela de Caminos, para contarnos el estado actual y anunciarnos la fecha, ya no tan lejana como hace unos años se podía esperar, en que tales métodos de cálculo serán operativos y prácticos. Esperamos su artículo.