

BRECHAS EN BORDOS DE ARCILLA FORMADAS POR DESBORDAMIENTO

Ricardo Orozco Rivas y Moisés Berezowsky

Resumen:

Se describe un método para calcular el mecanismo de formación de una brecha en un bordo o dique de tierra como consecuencia de su falla por desbordamiento. La brecha se va formando conforme el flujo erosiona el bordo; este proceso, sumamente complejo, se incluye en el modelo numérico que aquí se describe mediante una relación empírica entre el esfuerzo cortante actuante y la tasa de erosión en un suelo cohesivo. Con la metodología propuesta se obtiene simultáneamente el hidrograma que sale por la brecha y el desarrollo de la erosión en el bordo. Se compara el método con los datos de la falla de la presa Teton; se obtiene buena concordancia entre valores calculados y los reportados del gasto máximo, de la duración de la falla y de la profundidad de la brecha. El método es ideal para el cálculo del efecto aguas abajo de la falla, por desbordamiento, de bordos y de pequeñas presas de tierra.

Palabras clave: brechas en ríos, erosión, modelo numérico.

Introducción

Una de las mayores preocupaciones del ingeniero hidráulico se refiere a la falla de bordos, diques o presas. Así por ejemplo, en Europa desde hace algunos años se lleva a cabo un proyecto para revisar la seguridad de todas las presas, y calcular las inundaciones que habría en caso de falla de dichas obras.

Existen relativamente pocos datos documentados de fallas en bordos, aunque éstas sean frecuentes y ocasionen cuantiosos daños. Sin embargo, se tiene amplia información acerca de fallas en presas. De acuerdo con Baecher et al. (1980), las fallas más comunes en presas de tierra y de enrocamiento se deben al desbordamiento, tubificación o deslizamiento de taludes en el vaso de almacenamiento. Para los fines de este trabajo, se centrará la atención en las fallas por desbordamiento.

Marengo (1996) reporta 144 fallas de este tipo en 1105 presas de 33 países; de estas fallas 61 fue-

ron totales. El desbordamiento puede ser causado por escasa capacidad del vertedor, operación deficiente de las compuertas, evaluación inadecuada del caudal que pasa por la obra de desvío durante la construcción o retrasos en la misma.

En este trabajo, se considera como brecha a una abertura transversal en un bordo o dique ocasionada por el flujo que se vierte sobre el mismo. Al formarse una brecha, ocurre una súbita liberación de agua y sedimentos. El análisis que aquí se presenta se circunscribe a estructuras (como bordos y diques) de arcilla con sección homogénea.

Mecanismo de formación de una brecha

Los estudios de inundación por falla de un bordo o una presa abarcan cinco componentes fundamentales: a) determinación de la falla de la presa; b) obtención del hidrograma que sale por la brecha y sobre el dique; c) tránsito de la avenida resultante en la zona aguas abajo de la estructura; d) cálculo

Instituto de Ingeniería, UNAM 04510, Coyacán, DF, México;
ror@litoral.iingen.unam.mx; mbv@quetzal.iingen.unam.mx

Artículo recibido el 14 de julio de 1999, y aceptado con pequeñas modificaciones para su publicación el 23 de mayo de 2000.

del área de la zona de inundación y los tiempos de recorrido de la avenida, así como de los daños materiales y económicos; e) elaboración de un programa de emergencia que puede incluir el diseño de estructuras para proteger poblados, fábricas, etc.

Dada la complejidad del problema para determinar la forma en que falla un bordo y, por tanto, predecir el hidrograma resultante, la hipótesis comúnmente aceptada es que la falla es súbita, lo cual representaría la condición más desfavorable. Esto permite calcular el flujo aguas abajo de la estructura, considerando el almacenamiento contenido por una pared vertical que es removida de manera repentina.

En este trabajo, se plantea un procedimiento para obtener la forma de la falla de un dique y el hidrograma correspondiente.

Con base en un análisis estadístico de presas dañadas por desbordamiento (MacDonald y Langridge - Monopolis, 1984; Ponce, 1982; Singh y Snorrason, 1982; Singh, 1988), es posible deducir las siguientes propiedades de las brechas y formas de falla:

- La mayoría de las brechas tienen una morfología trapezoidal, según se esquematiza en la figura 1, donde B es el ancho superior de la brecha, b es el ancho de plantilla de la brecha, d es la profundidad de la brecha, y H es la altura del dique. En general, se conservan las relaciones $B/b \approx 1.3$, $B/d \approx 3$ y el talud $k \approx 3$.
- La relación B/b es inversamente proporcional a H.

El tiempo de falla es, en general, menor a tres horas, y en más de la mitad de los casos referidos duró menos de 90 minutos.

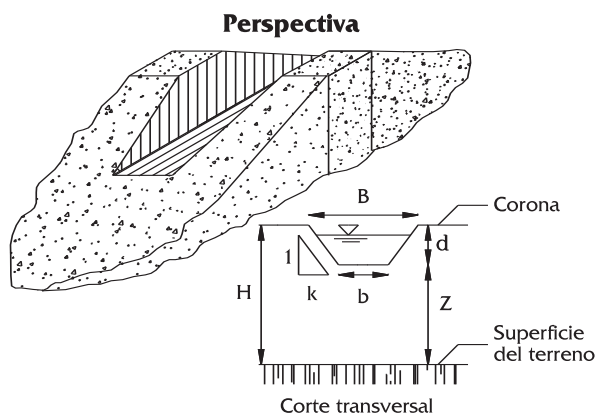


Figura 1. Morfología de la brecha

Conviene destacar que el desarrollo de la brecha depende de la forma del bordo (que es a su vez función de la topografía), de la resistencia de los materiales, del método constructivo, así como de la duración y magnitud del flujo sobre la estructura. Debido a la dificultad del problema, predecir con exactitud la forma de la brecha es prácticamente imposible.

Desde el punto de vista conceptual, la erosión de una brecha puede considerarse como un fenómeno de interacción agua - suelo en el cual:

- El flujo sobre el dique produce la fuerza que erosiona la brecha.
- La brecha crece en función del caudal que va pasando por la misma.
- A menos que el bordo sea capaz de resistir los esfuerzos causados por el flujo y, por tanto, no sea socavado, el crecimiento de la brecha continuará hasta que el embalse se vacíe o que el dique se erosione totalmente.

Descripción matemática del problema

Se parte de las ecuaciones de continuidad en el embalse y una relación entre la erosión y el flujo. La ecuación de continuidad se escribe como:

$$\frac{dV}{dt} = I - O - Q_b - Q_{bo} \quad (1)$$

donde V es el volumen del almacenamiento (m^3), I es el gasto que entra al embalse (m^3/s), O es el gasto de salida por el vertedor (m^3/s), Q_b es el gasto de salida por la brecha (m^3/s), Q_{bo} es el gasto que se vierte sobre el bordo en la zona donde no hay brecha (m^3/s), y t es el tiempo (s).

El caudal por el vertedor se obtiene con la ecuación general de los vertedores (incluyendo las compuertas en su caso), ver por ejemplo USBR (1967). Los gastos que pasan sobre el bordo y a través de la brecha se estiman considerando el criterio que propone Lozoya (1983) para calcular el flujo sobre obras de desvío durante el cierre de cauces. El caudal por la brecha se obtiene a partir de la expresión:

$$Q_b = mb\sqrt{2g} H_b^{3/2} \quad (2)$$

donde Q_b es el gasto vertido sobre la brecha (m^3/s), H_b es la carga hidráulica (m), b es el ancho medio de la brecha (m), g es la aceleración de la gravedad, (m/s^2), m es un coeficiente que depende del ahogamiento de la vena líquida, así como de la forma de

la brecha. Si L es la longitud total del bordo, el caudal vertido sobre el bordo, restándole el que pasa por la brecha, será:

$$Q_{bo} = m (L - B) \sqrt{2g} H_{bo}^{3/2} \quad (3)$$

donde L es la longitud total del bordo y B se define en la Figura 1.

El coeficiente m en las ecuaciones (2) y (3) se obtiene de una gráfica presentada por Lozoya (1983). Aquí se tomó $m = 0.4$, que corresponde a un vertedor de cresta ancha descargando libremente. Debido a la complejidad del fenómeno de erosión en suelos cohesivos y a la incertidumbre en la formación de la brecha, es muy difícil plantear un modelo matemático que lo represente. En la literatura se plantean varios criterios al respecto. Por ejemplo, Singh (1988) sugiere relacionar la erosión con una función de V^α , donde $\alpha = 1$ ó 2 ; siendo V la velocidad media del flujo en la brecha. Con esta hipótesis, es posible obtener una solución analítica de la ecuación (1). Con el fin de estimar la tasa de erosión en suelos cohesivos, aquí se utiliza el procedimiento propuesto por Arulanandan et al. (1980). Primero, es necesario determinar lo que estos autores denominan el esfuerzo cortante crítico que la ar-

cilla resiste. Para ello, se requieren datos que provienen de análisis de laboratorio: composición química, relación de adsorción de sodio, dispersión dieléctrica y concentración de sales en el agua de los poros del suelo. Con la figura 2, se obtiene el esfuerzo cortante crítico. Cabe aclarar que dicho esfuerzo no corresponde estrictamente al concepto empleado en suelos no cohesivos pues, según lo definen Arulanandan et al. (1980), en el caso de las arcillas equivale al esfuerzo mínimo para el cual hay erosión incipiente.

Estos autores presentan una curva (figura 3) basada en numerosos datos de campo y de laboratorio, para calcular la tasa de erosión (es decir, la cantidad de suelo erosionado) a partir del esfuerzo cortante crítico. Con base en los datos de dicha figura, en el rango $0.6 < \tau_c < 2 \text{ N/m}^2$, la relación de cambio de la tasa de erosión, R_p , se obtiene con la función exponencial negativa siguiente (Arulanandan et al., 1980, Berezowsky et al., 1992):

$$R_p = 0.364 e^{-1.3\tau_c} \quad (4)$$

donde R_p (s^{-1}).

Si τ_c es mayor de 2 N/m^2 , resulta un valor de

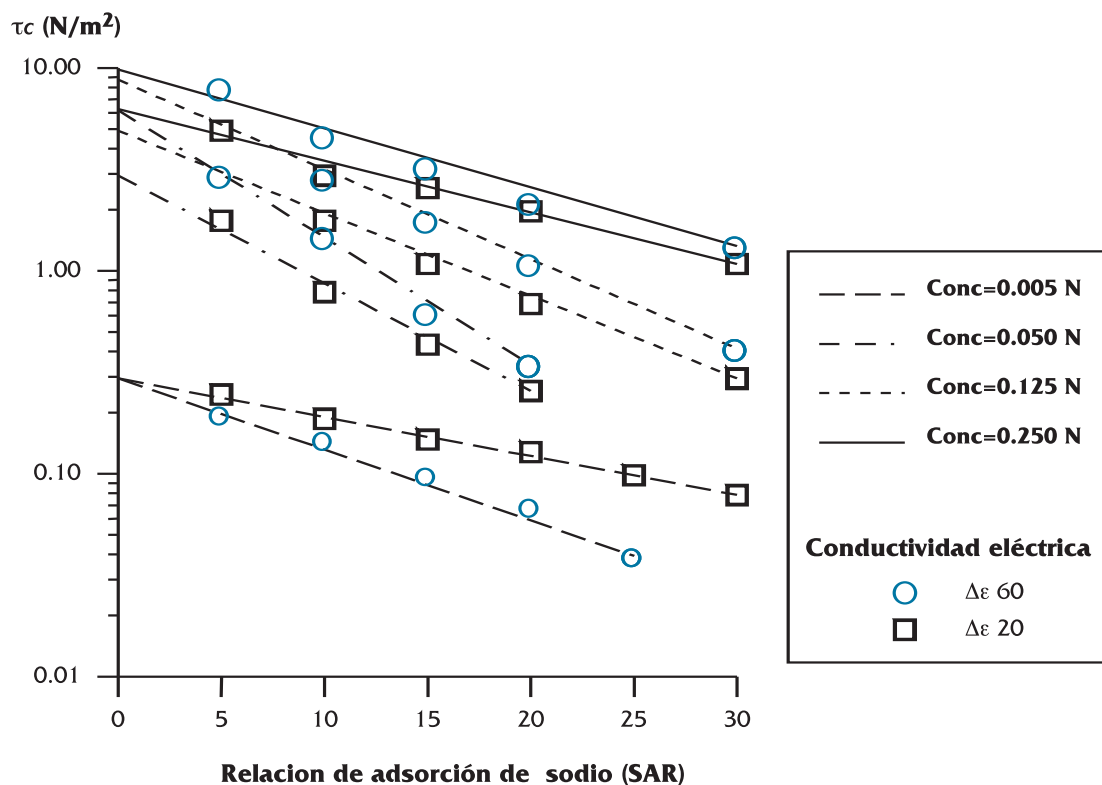


Figura 2. Esfuerzo cortante crítico, según Arulanandan et al. (1980)

R_p pequeño, pero prácticamente constante, o sea, hay erosión aun en un suelo firme, compacto y resistente, lo cual no necesariamente es cierto. Para valores grandes de τ_c , R_p debe tender a cero. Por otro lado, puesto que se consideran suelos cohesivos, el límite inferior de la curva es $\tau_c = 0.6 \text{ N/m}^2$,

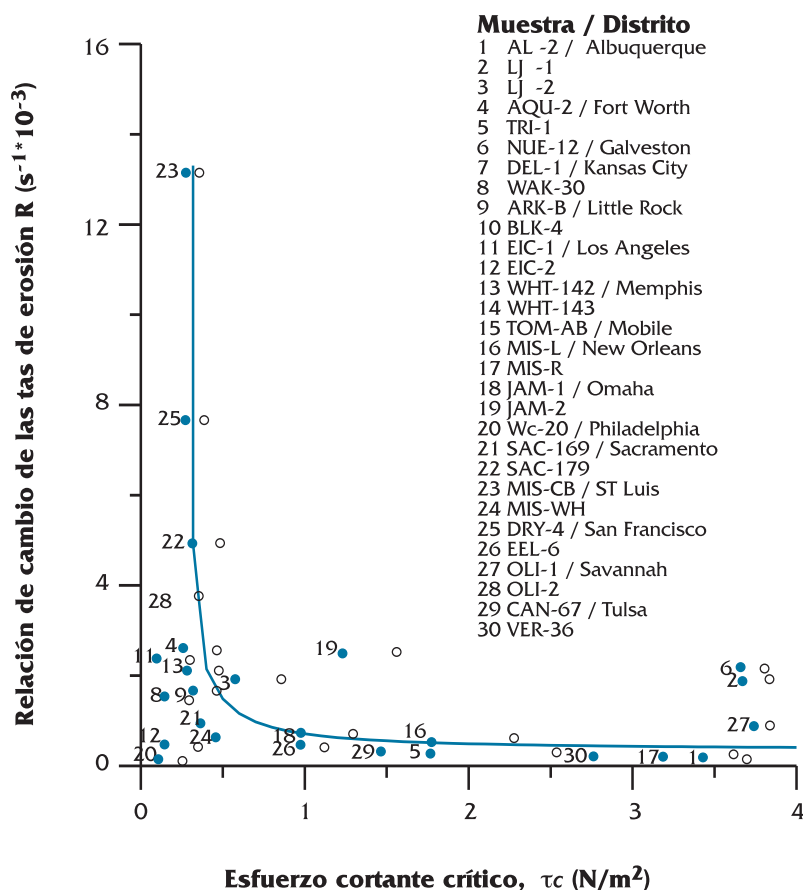


Figura 3. Relación de cambio de la tasa de erosión (R_p) vs esfuerzo cortante crítico (τ_c) para muestras inalteradas probadas utilizando agua destilada como flujo erosivo, según Arulanandan et al. (1980)

ya que para esfuerzos cortantes críticos menores de este valor, el suelo tiende a comportarse como no cohesivo. El avance de la erosión en la brecha, tomando en cuenta la diferencia entre el esfuerzo cortante actuante y el crítico (Osman y Thorne, 1988) está dado por:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{R_p \tau_c}{\rho_m g} \left(\frac{\tau_o}{\tau_c} - 1 \right) \quad (5)$$

donde Z es el avance de la erosión (m), $\tau_o = \rho g R_h S_f$ es el esfuerzo cortante que ejerce el flujo (N/m^2), ρ es la densidad (masa) del agua (kg/m^3); ρ_m es la densidad (masa) del material (kg/m^3); R_h es el radio hidráulico (m), y S_f es la pendiente de la línea de energía.

La ecuación (5) indica la distancia que se erosiona un suelo en dirección normal a la frontera agua - suelo. Aquí, se acepta el conocido principio de que el esfuerzo cortante en el fondo de la sección trapecial de un canal es mayor que el que actúa en los taludes. Por ello, el avance de la erosión ocurre principalmente en la dirección vertical y, dado que los taludes tienden a ser relativamente tendidos, el proceso erosivo en éstos se debe a la combinación de efectos de la acción del esfuerzo actuante y de la pérdida de apoyo en el fondo por el avance vertical de la erosión. Por tanto, la variable Z de la ecuación (5) representa la cota de la plantilla de la brecha conforme avanza la erosión.

Para determinar S_f , se supone que hay flujo crítico en la brecha y se emplea una ecuación de resistencia al flujo, en este caso la de Manning.

Formación del modelo

Las expresiones 1 y 5 constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, con variables dependientes V y Z ; los caudales y los esfuerzos cortantes actuantes son funciones del nivel del agua y de las características del flujo a través de la brecha. Aquí, se soluciona este sistema de ecuaciones con el método numérico de Heun, (ver por ejemplo, Berezowsky y Mancilla, 1986).

Se ha desarrollado un código para el cálculo de la falla de bordos. Como datos, se requiere conocer el hidrograma de entrada al almacenamiento, el nivel inicial del agua en el mismo, la curva elevaciones-volúmenes, las características del vertedor, el esfuerzo cortante crítico del suelo en el bordo, y un valor estimado del ancho en la base de la brecha; El procedimiento de cálculo es el siguiente; en cada instante:

1. Se obtiene el caudal de ingreso, a partir del hidrograma, I .
2. A partir del nivel del agua en el almacenamiento se obtiene el gasto por el vertedor, O
3. Si el nivel del agua es inferior al del bordo, se determina el nuevo nivel en el almacenamiento con la ecuación de continuidad en el embalse
4. Si el nivel del agua es mayor que el del bordo, se determina el gasto por el bordo con la ecuación (3); si la brecha aún no se forma, se toma la lon-

- gitud total del bordo
- Se obtiene el cortante que produce el flujo sobre el bordo o en la brecha; (o; si es mayor que el crítico del suelo, se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales (1) y (5) de donde resulta el nuevo nivel del embalse, el caudal por la brecha y la profundidad de la misma.

Este último caudal tiene poca duración, pues el nivel en el almacenamiento desciende rápidamente a medida que se forma la brecha.

El modelo tiene un algoritmo para cambiar el incremento de tiempo de cálculo. Si el nivel del agua en el embalse al inicio de los cálculos es inferior al del bordo, se puede emplear un intervalo

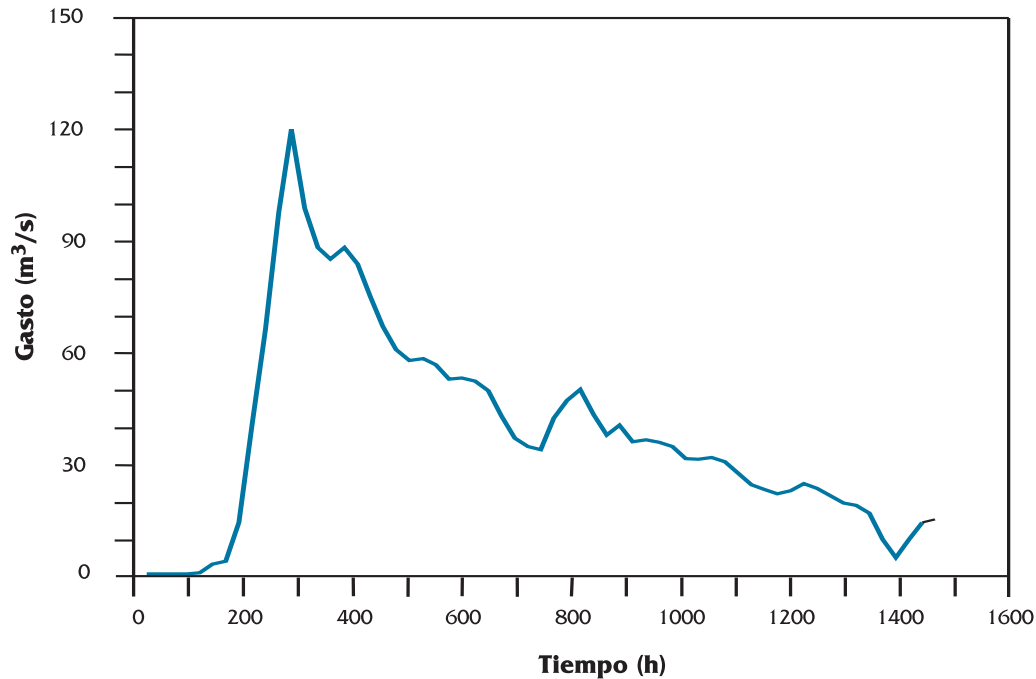


Figura 4. Hidrograma de entrada a la presa Teton.

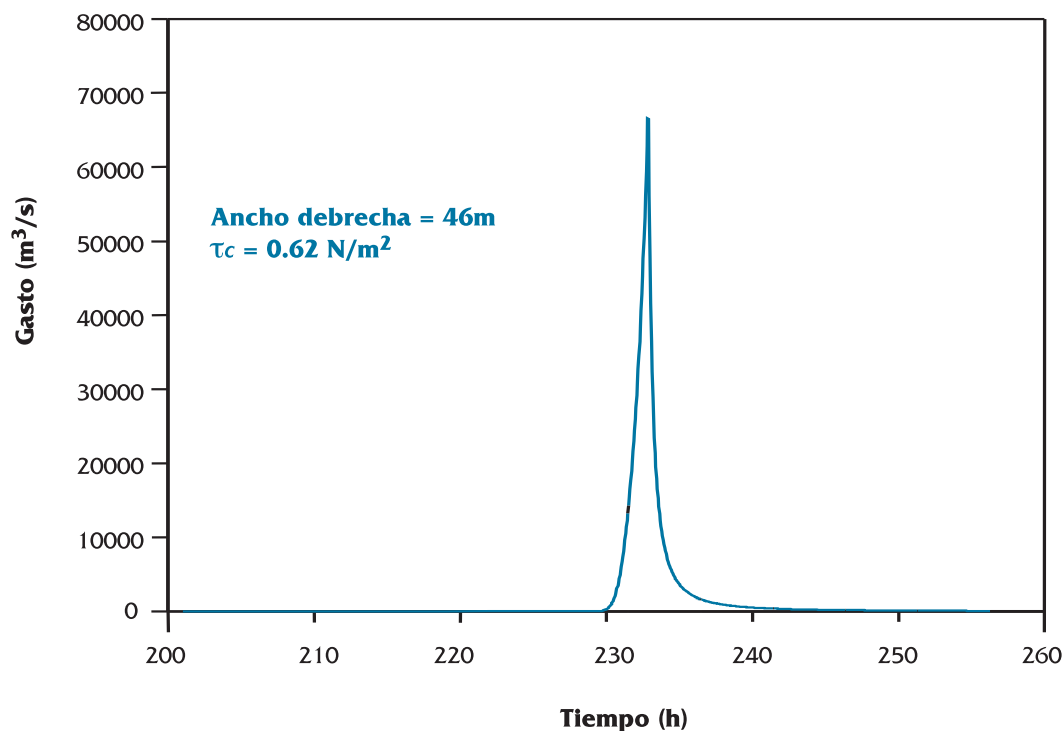


Figura 5. Hidrograma de salida por la brecha.

grande (del orden de horas). En el momento en que el bordo es rebasado, debe emplearse un incremento de tiempo muy pequeño (del orden de minutos). Por ello, en el algoritmo se detiene el cálculo en el momento en que el bordo es rebasado; se reinicia el cálculo con el nuevo incremento de tiempo a partir del último valor del nivel del agua en el embalse anterior al rebase.

Validación del modelo

Se emplean los datos de la presa Teton, en EUA, presentados por Ballofet (1982) y Singh (1988). Esta presa de tierra fue construida en 1972 y falló cuatro años más tarde por desbordamiento sobre el dique. La altura máxima del bordo era de 93 m, con un ancho de corona de 10 m, y taludes de 3 aguas arriba y 2.5 aguas abajo; el volumen almacenado al NAMO (nivel de aguas máximas ordinarias) era de 356 millones de m^3 . Durante la falla, se formó una brecha cuya base tenía 46 m de ancho y 79 m de profundidad. Se estimó una duración del proceso de falla de 4 horas y un caudal máximo de salida por la brecha de $66000 \text{ m}^3/\text{s}$. No se cuenta con datos de la configuración del almacenamiento, y se tiene sólo el pico del hidrograma de entrada que es de $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Por ello, se supuso una forma como la que se muestra en la figura 4; también se consideró que la elevación inicial del agua en el embalse era de 92.5 m, correspondiente al NAME (nivel de aguas máximas extraordinarias). Se utilizó un coeficiente de Manning de 0.04 en la brecha.

La escasez de datos geotécnicos impidió la determinación cuantitativa del esfuerzo cortante

crítico del suelo que formaba la cortina; sin embargo, el reporte de la falla permite deducir que el suelo era blando y erosivo. Aquí, se iteró modificando únicamente el esfuerzo cortante crítico, hasta encontrar correspondencia entre el caudal máximo estimado y el calculado.

Tabla 1 Resultados de la simulación de falla de la presa Teton

	Calculado	Estimado
Gasto máximo de salida por la brecha, en m^3/s	66 572	66 000
Duración de la avenida, en h	4:42	4:00
Esfuerzo cortante máximo calculado, en N/m^2	2700	—
Velocidad máxima del agua en la brecha, en m/s	20.66	—
Gasto pico de entrada, en m^3/s	102	102
Gasto pico por el vertedor, en m^3/s	37.05	26.7
Gasto pico por el bordo, en m^3/s	1.55	—
Gasto pico total de salida, en m^3/s	66 572	66 102
Elevación máxima del agua, en m	93.02	—
Profundidad de la brecha, en m	93	79

En la Tabla 1, se resumen los principales valores aquí obtenidos (con un esfuerzo cortante crítico de $0.62 \text{ N}/\text{m}^2$) y se comparan con las estimaciones reportadas por Singh (1988); ambos resultados concuerdan bastante.

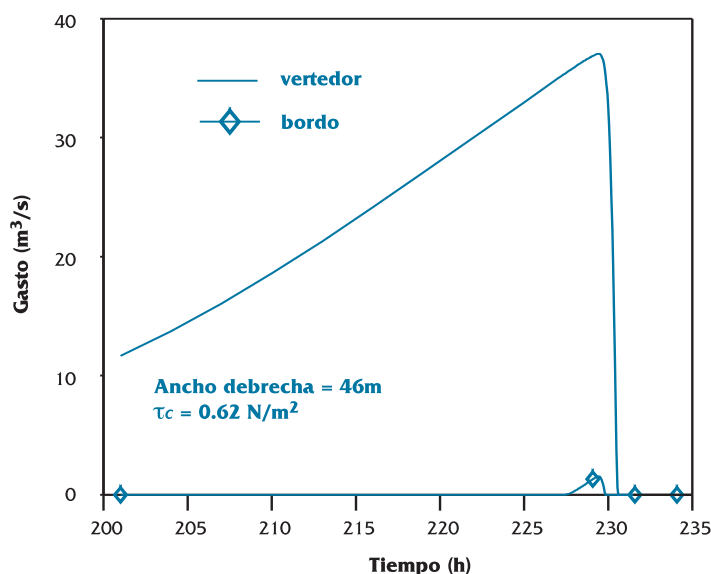


Figura 6. Hidrogramas de salida por el vertedero y por el bordo

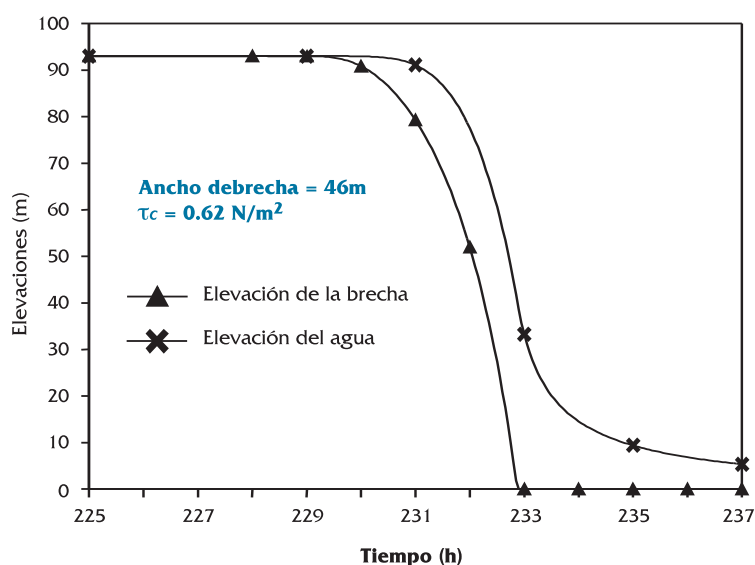


Figura 7. Evolución de las elevaciones de la brecha y del agua con el tiempo.

En la figura 5 se muestra el hidrograma de salida por la brecha y en la figura 6 un detalle de los hidrogramas por el vertedor y sobre el bordo. Nótese la gran magnitud del gasto por la brecha, así como, la breve duración del hidrograma. Los hidrogramas por el vertedor y el bordo son muy pequeños en comparación con el de la brecha. La evolución de la cota de la brecha y del agua en el embalse se indican en la figura 7.

Conclusiones y recomendaciones

El mecanismo de formación de una brecha es un fenómeno complejo que involucra muchos elementos, entre los cuales destacan la geometría del bordo y las propiedades mecánicas del material que lo constituye. Además, este proceso presenta múltiples facetas debido a la interacción agua - suelo, y se desarrolla con gran rapidez. El método aquí descrito se limita a estructuras de tierra con sección homogénea; para otro tipo de sección, como materiales gradados o no homogéneos, la interacción agua - suelo es mucho más complicada y prácticamente imposible de modelar.

El método de cálculo expuesto en este trabajo tiene las siguientes características:

- Incluye el gasto de la avenida, así como el desalojado por el vertedor; éste último gasto no se considera en la mayoría de los métodos publicados.
- Utiliza un criterio empírico para determinar el avance de la erosión en la brecha. Dicho criterio fue propuesto por Arulanandan et al. (1980) para el caso de suelos cohesivos. Existen otros criterios que abordan el tema (ver, por ejemplo, Pouey, 1998), que podrían adaptarse al modelo aquí propuesto.
- La falla por desbordamiento en presas se puede deber a una o varias causas, entre ellas: la escasa capacidad del vertedor, la operación deficiente de las compuertas, las evaluaciones erradas de los gastos pico, las demoras durante la construcción o la falla de una presa aguas arriba. El modelo aquí planteado permite obtener el desarrollo de una brecha en diques o bordos formada por desbordamiento y el hidrograma correspondiente.

Una de las incógnitas que produce mayor incertidumbre es la morfología de la brecha durante su proceso evolutivo; primero, resulta muy difícil

conocer *a priori* la ubicación del punto de inicio de la brecha; después, no se puede predecir el ancho que tendría la brecha, el cual se ha supuesto aquí en función de la profundidad de la misma; finalmente, la brecha se desarrolla de manera tridimensional y, dado que el bordo aumenta su ancho conforme se descende hacia su base, a medida que se profundiza la brecha, se incrementa el suelo que debe ser erosionado, por lo cual se puede deducir que disminuye la velocidad del fenómeno.

La variable más importante en el modelo aquí expuesto es la tasa de erosión en un suelo cohesivo. Dicha tasa depende de la composición química, estructura, localización en el banco de materiales e historia de esfuerzos del suelo, de las reacciones físico-químicas que intervienen en la erosión y, por último, de aspectos constructivos (compactación, humedad, etc.). La tasa mencionada puede deducirse con los criterios presentados, aunque en algunos casos conviene obtenerla experimentalmente.

Algunas recomendaciones para evitar que se forme una brecha en un bordo son:

- Cuidar la calidad de las arcillas; de ser posible, emplear arcillas caoliníticas o ilíticas y evitar arcillas montmoriloníticas.
- Vigilar los hundimientos diferenciales y la presencia de grietas por tensión, pues son puntos potenciales para el inicio de una brecha.
- Tener un alto control de calidad en el proceso constructivo de la obra y darle un buen mantenimiento.
- Evitar, siempre que sea posible, el desbordamiento.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente apoyado por CONACYT y por CNA. Margarita López Herranz hizo la revisión de estilo.

Referencias

- Arulanandan, K, Gillogley, E, y Tully, R (1980), Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils, Reporte GL-80-5, US Army corps of Engineers, Water Ways Experiment Station, Vicksburg, Miss, EUA.
- Baecher, G, Pate, M, de Nueville, R, (1980), Dam failure in benefits cost analysis. Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, 106.

- Ballofet, A. (1982). Numerical analysis of the Teton dam failure flood. *Journal of hydraulic research* No. 4, 317-328
- Berezowsky, M, y Mancilla, A. (1986). Solución Numérica de la ecuación diferencial del flujo gradualmente variado. *Series del Instituto de Ingeniería, UNAM* No. 499. México, 149 pp.
- Berezowsky, M., Jiménez, A.A. y Franco C.G., (1992). Predicción del corrimiento de márgenes cohesivas en ríos. *Series del Instituto de Ingeniería, UNAM* No. 552. México, 106 pp.
- Lozoya, J, Maza J.A., (1983). Manual de diseño de obras civiles, Hidrotecnia, A.2.12 Obras de desvío. Tomo I, Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, 42-51.
- MacDonald T.C. y Langridge - Monopolis J. (1984). Breaching characteristics of dam failures. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, 110(5), 567-586.
- Marengo, H.(1996). Análisis de riesgo de falla en presas, estadísticas y parámetros de referencia. *Ingeniería hidráulica en México*, Vol. XI, Núm. 2, II Época mayo - agosto. México, 65-77.
- Ponce, V. M. (1982) Documented cases of earth dam breaches. San Diego State University. Series No. 82149, San Diego Cal.
- Pouey N. (1998) Erosión hídrica. Universidad Nacional de Rosario Editora. Argentina, 164 pp.
- Osman, A. M. y Thorne, C.R. (1988) "Riverbank stability analysis. I: Theory", *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 114, 2, EUA, 134-150.
- Sing K. P. y Snorrason, A. (1982) Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam parameters and simulation models. State Water Survey Division. Report 289. Surface water Section at University of Illinois, Urbana III.
- Singh, V.P. y Scarlatos P.D. (1988). Analysis of gradual earth - dam failure. *Journal of hydraulic engineering* No. 1 Enero, 21-42.
- USBR(1967). Diseño de presas pequeñas. Cia. Editorial Continental, México, 639 pp.