

DRENAJE DE OBRAS DE TIERRA APLICACION A EMBALSES SUBALVEOS

Por VENTURA ESCARIO,
Ingeniero de Caminos.

Presenta el autor un procedimiento aproximado para determinar el proceso de drenaje en obras de tierra, y hace su aplicación a presas de tierra, pistas de aeropuertos y embalses subálveos, haciendo breves comentarios finales sobre el grado de aproximación del método.

Los problemas de filtración suelen ser generalmente complicados.

Cuando se trata de situaciones en que hay que estudiar un caso de filtración después de llegar a un régimen de equilibrio, es decir, cuando las condiciones no varían con el tiempo, suele ser posible resolver el problema obteniendo las redes de filtración.

Lo más sencillo para ello es, por regla general, dibujárselas a mano, lo cual no es tan difícil como algunos ingenieros suponen. Se ahorra, además, tiempo y dinero en relación con la resolución por medio de otros métodos, tales como la analogía eléctrica, a los cuales sólo será preciso recurrir en casos muy especiales.

Algunos problemas de este tipo pueden incluso resolverse por medio de fórmulas matemáticas aproximadas.

La situación se complica mucho más cuando interviene la variable tiempo, es decir, cuando se trata de problemas de filtración en régimen no uniforme.

Suele ser en estas condiciones necesario relacionar el proceso de drenaje con el tiempo transcurrido.

La mayoría de las veces es prácticamente imposible resolver el problema de una manera matemáticamente exacta, aunque se trate de casos, digamos, geométricos.

Sin embargo, es posible hacer algunas simplificaciones, que aunque a primera vista pueden parecer

inaceptables, conducen en muchos casos a resultados lógicos, como se ha podido comprobar mediante ensayos en modelo reducido.

Pasamos ahora a estudiar tres casos de drenaje y en el epígrafe final de este artículo hacemos unos breves comentarios sobre el grado de exactitud a que el método puede conducir en cada uno de ellos.

1. Presas de tierra.

Desembalse rápido (*):

Al vaciar un embalse rápidamente, tan rápidamente que vamos a suponer instantáneamente, estudiemos cómo variará el proceso de drenaje con el tiempo.

En la figura 1.^a se han dibujado dos curvas que representan, en dos instantes determinados, la forma aproximada de la superficie libre del agua, después de vaciar el embalse.

A efectos de cálculo sustituiremos cada curva por una recta que encierre la misma superficie (línea de trazos).

Es decir (fig. 2.^a), que suponemos que todas las superficies libres son rectas que giran alrededor del punto *A*.

Supongamos que *AN* es la correspondiente al

(*) A. Casagrande: Cursos de la Universidad de Harvard sobre Mecánica del Suelo.

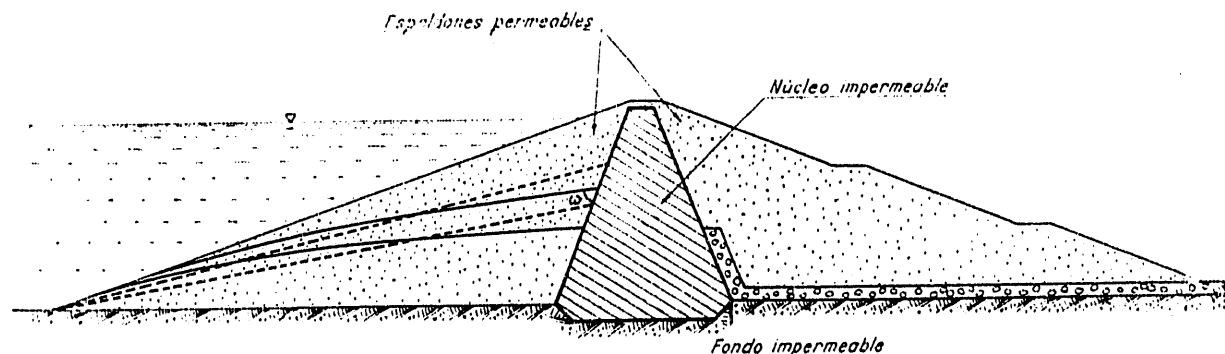


Figura 1.^a

instante t , y AP la correspondiente al instante $t + dt$.

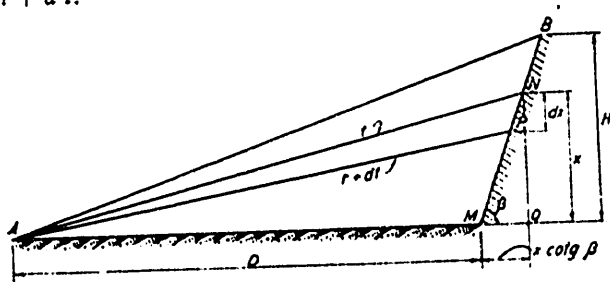


Figura 2.^a

Según la ley de Darcy, sabemos que:

$$q = \frac{dV}{dt} = k \cdot i \cdot S. \quad [1]$$

Siendo $\left\{ \begin{array}{l} q = \text{caudal desagüado.} \\ V = \text{volumen de agua.} \\ k = \text{coeficiente de permeabilidad.} \\ i = \text{gradiente hidráulico.} \\ S = \text{sección de que se trate.} \end{array} \right.$

En esta hipótesis de líneas rectas podemos tomar:

$$i = \frac{NQ}{AQ} = \frac{x}{D + x \cotg \beta}. \quad [2]$$

Como sección S adoptaremos la sección media del triángulo AMN , o sea:

$$S = \frac{1/2 D x}{D + x \cotg \beta}. \quad [3]$$

Sustituyendo [2] y [3] en [1], resulta:

$$\frac{dV}{dt} = k \frac{D x^2}{2 (D + x \cotg \beta)^2} \quad [4]$$

Pero por otra parte, dV es igual al área del triángulo elemental APN , que es el área drenada:

$$dV = \frac{n_e}{2} D dx, \quad [5]$$

en donde n_e es la porosidad efectiva del suelo, es decir, el tanto por ciento de huecos que quedan sin agua después de drenar; este valor n_e es inferior a la porosidad total n , porque parte del agua queda retenida por capilaridad entre los granos.

Combinando [4] y [5] resulta la ecuación diferencial:

$$n_e \left(\frac{D}{x} + \frac{1}{\tg \beta} \right)^2 dx = -k dt. \quad [6]$$

Haciendo intervenir en lugar de x el valor $U =$ tanto por ciento de área drenada, o sea:

$$U = \frac{\text{área } ANB}{\text{área } AMB} = 1 - \frac{x}{H};$$

y adoptando los nuevos valores:

$$T = \frac{k H t}{n_e D^2}; \quad [6']$$

$$J = \frac{H}{D} \cotg \beta,$$

la ecuación diferencial [6] integrada se convierte en:

$$T = \frac{U}{1-U} + 2J \log_n \frac{1}{1-U} + J^2 U, \quad [7]$$

ecuación que buscábamos que relaciona el tanto por ciento de drenaje U con el factor tiempo T .

Con ayuda de esta expresión se puede también dibujar la línea de la superficie libre al cabo de un cierto tiempo, t .

Para ello basta tener en cuenta que la velocidad de descenso, $v_{s\beta}$, del punto N , a lo largo de PM , se puede obtener siguiendo la misma hipótesis, pues haciendo $PN = dl$, tendremos:

$$v_{s\beta} = \frac{dl}{dt}$$

y como según [5]:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{2} n_e \frac{dl}{dt} D \sen \beta,$$

se deduce:

$$v_{s\beta} = \frac{k}{n_e \sen \beta} \left(\frac{H}{D} \right)^2 \frac{dU}{dT}. \quad [8]$$

Como por otra parte, el gradiente hidráulico en N , según se deduce también con gran sencillez, es (ver ω en figura 1.^a):

$$i_{s\beta} = \frac{\sen(\beta - \omega)}{\cos \omega},$$

se obtiene, por otro lado:

$$v_{s\beta} = \frac{k}{n_e} \cdot i_{s\beta} = \frac{k}{n_e} \frac{\sen(\beta - \omega)}{\cos \omega}. \quad [9]$$

Combinando [8] y [9], se puede obtener ω , ya que $\frac{dU}{dT}$ se puede deducir de [7].

Para dibujar la curva de la superficie libre al

cabo de un cierto tiempo, t , ya se conoce, por tanto, el valor del área que ha de encerrar, por [7], y el valor de ω en la forma que hemos indicado; por tanto, es fácil situarla para obtener la red de filtración.

Un procedimiento análogo se puede seguir para determinar el progreso de la saturación de una presa con el tiempo en cuyo detalle no vamos a entrar.

2. Pistas de aeropuertos.

Los firmes de las pistas de aeropuertos pueden saturarse de agua en determinadas condiciones: por ejemplo, a base del agua que se filtra a través de grietas y juntas o incluso a través de un pavimento poco impermeable, cuando se trata de un firme apoyado sobre una base impermeable.

En estas condiciones, cuando las cargas actúan, se produce un flujo ascendente de agua por grietas y juntas que tiende a desintegrar los pavimentos bituminosos y a producir el conocido fenómeno del "pumping" en los de hormigón hidráulico. Además, la capacidad de carga de un firme granular disminuye considerablemente cuando sus elementos están sumergidos.

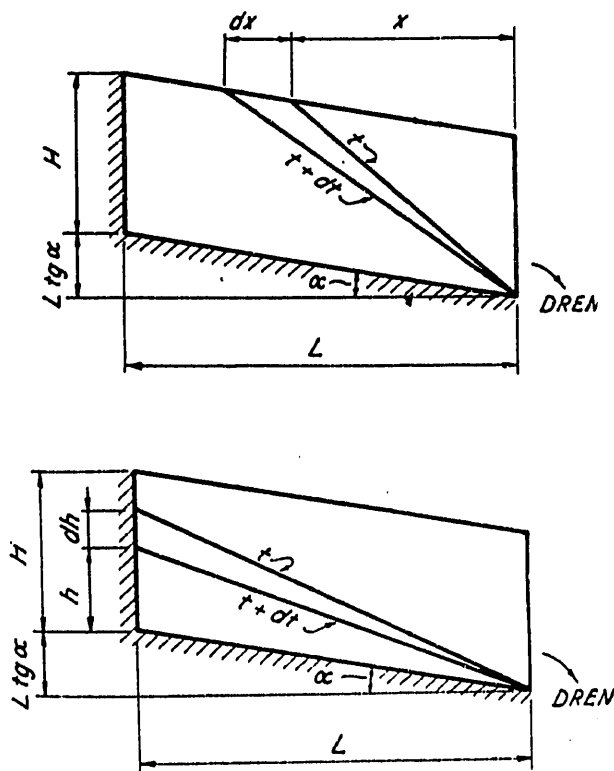


Figura 3.^a

A. Casagrande y W. Shanon (*) han estudiado detenidamente este problema teórico y prácticamente, comparando los resultados de sus hipótesis con observaciones experimentales.

Recomiendan que se proyecte el drenaje de tal forma que, si fuera de esperar que el firme pudiera saturarse, se obtenga un 50 % de drenaje en menos de diez días, cuando no se disponga de otros datos.

No vamos a entrar en el detalle de cómo llevar a cabo su deducción teórica, por estar descrita ya en la citada revista española.

En la figura 3.^a se puede ver que la hipótesis de superficie libre recta girando alrededor del punto donde está situado el dren, es la misma que en el caso de drenaje de presas de tierra.

Las expresiones finales a que llegan son:

Base horizontal:

$$\text{Para } U \leq 0,5 \dots T = 2 U^2$$

$$\text{Para } U \geq 0,5 \dots T = \frac{U}{2 - 2 U}$$

Base inclinada:

$$\text{Para } U \leq 0,5 \dots T = 2 U J - J^2 \log_n \frac{J + 2 U}{J};$$

$$\text{Para } U \geq 0,5 \dots T = J + J \log_n \frac{2 J - 2 U J + 1}{(2 - 2 U)(J + 1)} - J^2 \log_n \frac{J + 1}{J}.$$

Siendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \frac{2 k H t}{c n_e L^2}; \\ J = \frac{H}{L} \cotg \alpha. \end{array} \right. \quad [10]$$

Por medio de ensayos en modelo reducido y en escala natural han determinado los valores de la constante c y dan gráficos para su obtención.

Para los valores de J normales en aeropuertos, resulta que c varía entre 1,5 y 2,4. El valor medio $c = 2$ convierte a [10] en:

$$T = \frac{k H t}{n_e L^2},$$

expresión exactamente igual a la empleada para el caso de presas de tierra descrito anteriormente.

(*) "Base course drainage for airport pavements". Transactions A.S.C.E. Vol. 117 (1952).

"Drenaje de bases de firmes en pavimentos de aeropuertos". Informes de la Construcción, 56.

3. Embalses subálveos.

Es frecuente encontrar auténticos vasos subterráneos alojados en depresiones impermeables rellenas de acarreo permeables.

A veces es económicamente conveniente cerrar dichas depresiones por medio de una presa subterránea.

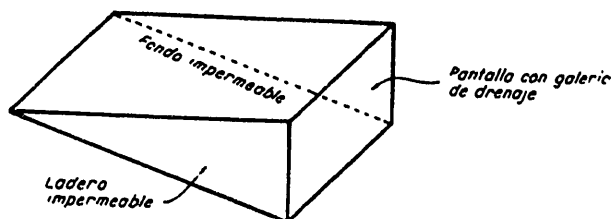


Figura 4.ª

Ultimamente se nos presentó el problema de estudiar el rendimiento de uno de estos embalses.

Se trataba del cauce de un río sobre un fondo impermeable mioceno, relleno por los acarreo que constituían la primera terraza fluvial.

El cauce impermeable era fácilmente asimilable a un vaso de la forma indicada en la figura 4.ª, cerrándolo con una pantalla de 200 m. de longitud con una galería filtrante adosada. En uno de los extremos de la galería va la casa de bombas.

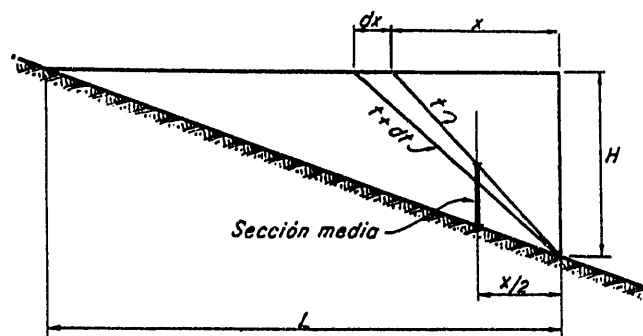


Figura 5.ª

Se trataba de averiguar cuál sería el rendimiento que se podría esperar de tal embalse cuando, suponiéndolo lleno, se empezara a agotar. La hipótesis más desfavorable era en el caso de su utilización en periodo de estiaje, en que la aportación subterránea se podía suponer nula.

Siguiendo hipótesis análogas a las descritas para

el caso de presas de tierra y pistas de aeropuertos y tomando (fig. 5.ª):

$$\text{Gradiente hidráulico medio: } i = \frac{H}{x};$$

$$\text{Sección media: } S = \frac{H}{2} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right),$$

se llega a la siguiente expresión:

$$T = \log_n \frac{1}{(1 - U)} - U.$$

Adoptando para nuestro caso los valores:

$$n_e = 0,10.$$

$$k = 0,002 \text{ m./seg.}$$

$$H = 6 \text{ metros.}$$

$$L = 1.100 \text{ metros.}$$

se obtiene la curva de la figura 6.ª.

De ella se deduce el tanto por ciento de embalse o volumen total de agua drenado al cabo de un cierto número de días, t .

Gráficamente se han determinado y situado en la escala de la derecha los caudales q que se obtendrían en los diferentes periodos, deduciendo las medias diarias hasta los diez días, y después las medias correspondientes a periodos de diez días.

Así, por ejemplo, se ve que el quinto día se obtiene solamente un caudal medio de unos 19 litros/seg., cuando el tanto por ciento de embalse drenado no llega al 30 %.

Grado de aproximación del método.

Para el caso de aeropuertos, según hemos indicado, A. Casagrande y W. L. Shannon han determinado el valor del parámetro c , mediante ensayos en modelo reducido.

En las figuras 7.ª y 8.ª, tomadas de la publicación citada, se resumen los resultados de dicha investigación.

Como puede observarse, el valor $c = 2$ puede, con suficiente aproximación, representar las condiciones medias para un aeropuerto.

Sin embargo, cuando la relación L/H (fig. 3.ª) es menor de 5, el valor de c crece muy rápidamente y ya no puede aceptarse el valor medio $c = 2$.

Ni para caso de embalses subálveos, ni para el de presas de tierra existe una experimentación análoga. Por ello hemos tomado en ambos estudios el valor $c = 2$ a falta de mejores datos.

Para el caso del embalse subálveo que hemos descrito, dicho valor parece ser perfectamente acep-

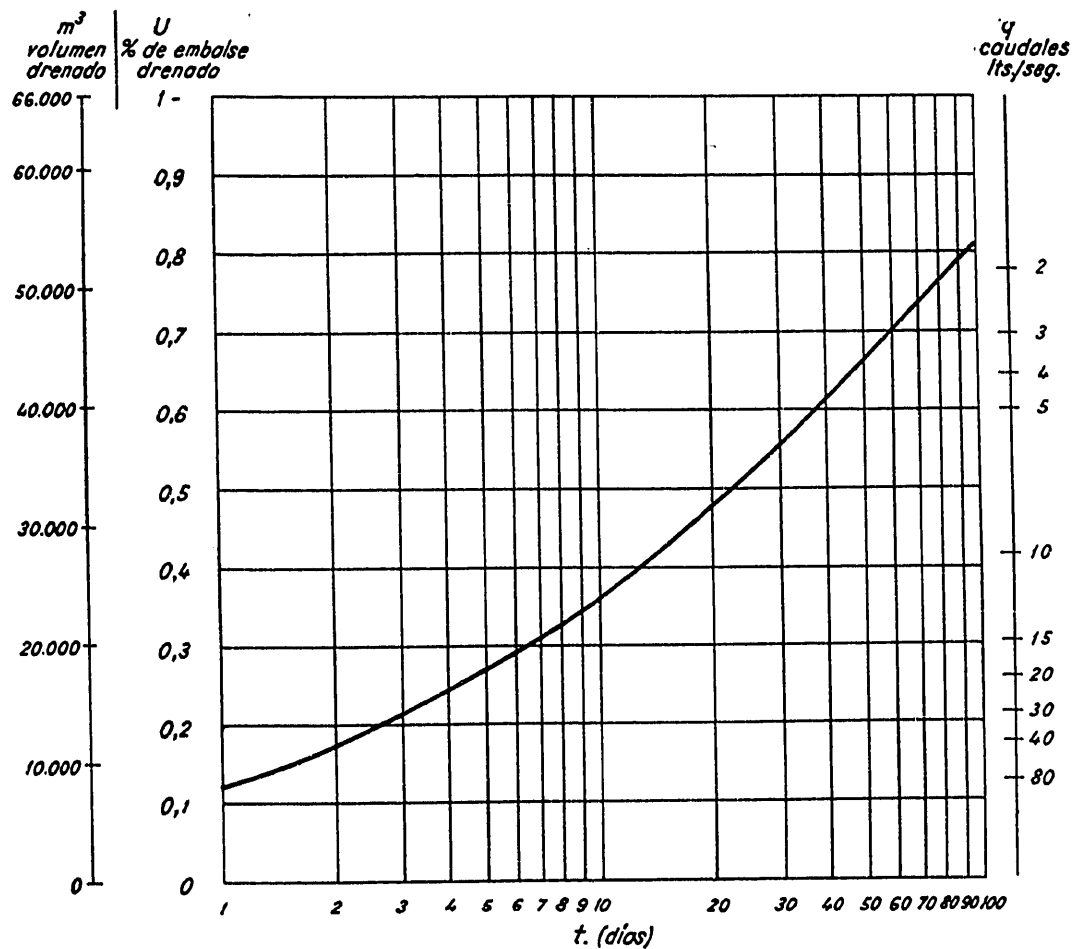


Figura 6.^a

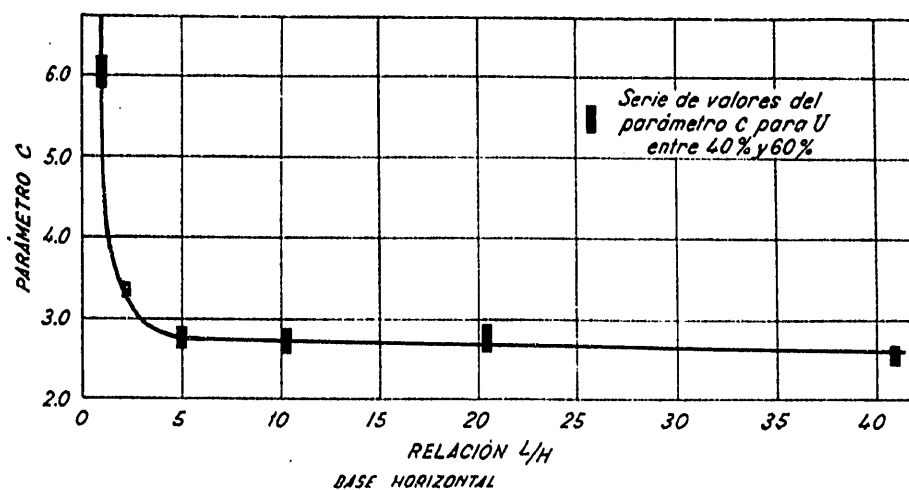


Figura 7.^a

table, por ser sus proporciones tales que no hay duda estamos fuera de la rama ascendente de la curva de la figura 7.^a.

Hay que tener en cuenta, de todas formas, que en estos problemas casi nunca se requiere más que una idea aproximada del proceso. Además, por otra

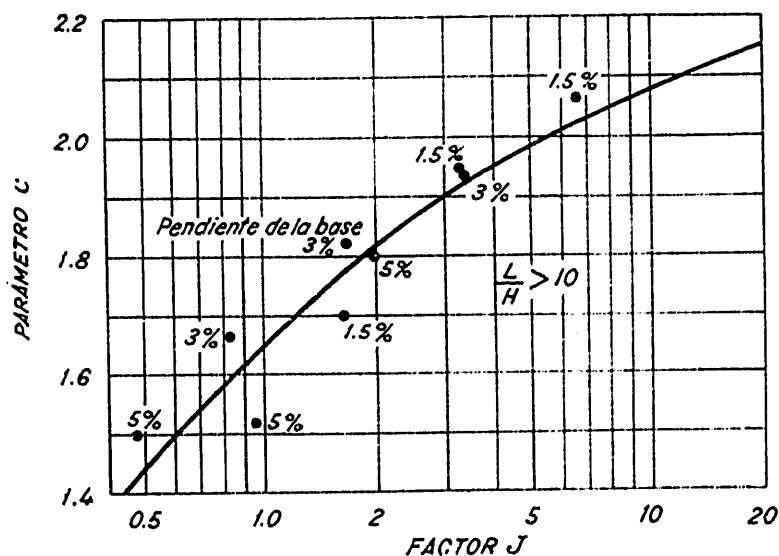


Figura 8.^a

Para el caso de presas de tierra, dejamos a juicio del lector la estimación del posible error a que ello pueda conducir.

parte, intervienen factores tales como el coeficiente de permeabilidad k , en cuya determinación nunca se podrá anticipar una gran exactitud.