

Análisis del flujo no saturado para el diseño de una barrera multicapa⁽¹⁾

ANTONIO LLORET MORANCHO (*)
EDUARDO ALONSO PÉREZ DE AGREDA (*)

RESUMEN Las barreras del suelo multicapa expuestas a la atmósfera en su superficie superior constituyen un elemento de gran importancia en las propuestas de los esquemas de aislamiento de residuos radiactivos. La impermeabilidad de la barrera está garantizada mediante una capa de arcilla compactada, extendida sobre una capa de drenaje que se utiliza para controlar la magnitud de la infiltración. La parte superior está constituida por una cubierta de suelo vegetal y una capa que actúa como barrera biológica que descansan sobre una capa de arena en contacto con la superficie superior de la arcilla. Todas las capas se compactan inicialmente en estado no saturado. Se ha realizado un análisis del flujo no saturado a través de la barrera multicapa. Las salidas del agua al sistema de recolección y control del agua infiltrada, se han modelado por medio de la introducción de un sumidero que afecta a los elementos de las capas de arena en contacto con dicho sistema. Se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad que afecta a diversos parámetros de la barrera y se propone un método simplificado de cálculo para encontrar el caudal de agua que se infiltra a través de la capa de arcilla en condiciones estacionarias. Una de las conclusiones más relevantes es que la barrera puede dividirse en dos sistemas (superior: capas de protección y dren de arena superior; e inferior: capa de arcilla y dren de arena inferior) que se comportan de forma independiente.

ANALYSIS OF UNSATURATED FLOW FOR THE DESIGN OF A MULTILAYERED BARRIER

ABSTRACT Barriers of multilayered soil whose upper surface is exposed to the atmosphere constitute an extremely important element in the insulation plans proposed for radioactive waste. The impermeability of the barrier is guaranteed by a layer of compacted clay, extended over a drainage layer which is used to control the extent of the infiltration. The upper part is composed of a covering of plant soil and a layer which acts as a biological barrier on top of a layer of sand which is in contact with the upper surface of the clay. All the layers are first compacted in an unsaturated state. An analysis of the unsaturated flow through the multilayered barrier has been carried out. The water outlets to the collection and infiltration control system have been modelled by means of sink terms which affects those elements of the layers of sand in contact with said system. A sensitivity analysis has been carried out, affecting several parameters of the barrier, and a simplified method of calculation is proposed to determine the amount of water which filters through the clay layer in stationary conditions. One of the most significant conclusions is that the barrier can be divided into two systems (superior: protective layers and upper sand drain; and inferior: clay layer and lower sand drain) which behave in an independent manner.

Palabras clave: Barrera multicapa; Eliminación de residuos; Flujo; Saturación; Arena; Arcilla; Filtración; Dren.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las posibles soluciones de aislamiento de residuos tóxicos sellados en estructuras de hormigón está basada en la utilización de la impermeabilidad de capas de arcilla. Una capa de 1 a 2 m de espesor de arcilla compactada puede asegurar niveles muy bajos de infiltración de agua desde la superficie de los vertederos durante periodos de tiempo muy grandes (cientos de años). Para poder controlar los pequeños caudales infiltrados, la barrera de arcilla compactada se extiende sobre una capa de arena mucho más permeable que a su vez se coloca por encima de una lámina de plástico que

cubre la estructura de hormigón que se pretende proteger. Por otra parte, es importante proteger la propia barrera arcillosa contra el deterioro causado por agentes ambientales (ciclos de secado-humedecimiento, heladas, erosión por escorrentía, infiltración favorecida por conductos excavados por animales y por la acción de raíces, etc.). A estos efectos, es conveniente colocar una capa adicional como protección biológica de la capa arcillosa. Esta capa está cubierta a su vez por una capa superficial de tierra orgánica con vegetación que favorece los fenómenos de evapotranspiración. Por último, parece apropiado eliminar la mayor cantidad de agua antes que entre en contacto con la superficie de la arcilla. Para alcanzar este fin se coloca una capa intermedia de arena, entre la barrera de arcilla y la capa superior de protección. Esta capa de arena está conectada a un sistema de evacuación de aguas externo donde se controla el caudal recogido.

Los conceptos precedentes conducen a un sistema de barrera multicapa en la que las diferentes capas poseen muy diferentes permeabilidades y curvas de retención de agua.

(1) Artículo presentado en la XIII Conferencia Internacional de la ISSMFE, celebrado en New Delhi, 1994.

(*) Departamento de Ingeniería del Terreno, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, U.P.C. Barcelona.

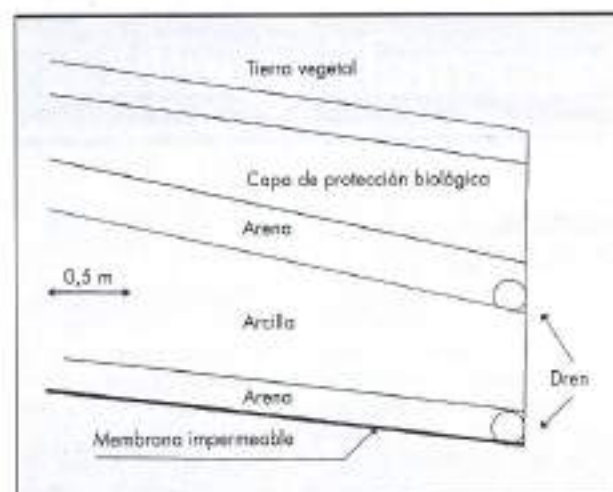


FIGURA 1. Esquema de una barrera multicapa.

Otra característica del sistema es que los distintos materiales se colocan y compactan "in situ" en condiciones no saturadas. El análisis del flujo no estacionario inducido por la infiltración constituye un aspecto clave en el diseño de la barrera y en la elección de los materiales más apropiados.

La Figura 1 muestra una sección representativa del borde inferior de una propuesta de barrera multicapa en la que todas las capas buzan uniformemente un pequeño ángulo hacia los drenes laterales que actúan como colectores.

2. CONDICIONES EN LOS DRENES

El análisis que se presenta se ha efectuado con el programa NOSAT. Este programa resuelve de forma acoplada el flujo de aire y agua en un suelo no saturado deformable (Alonso *et al.*, 1988). En este caso, se ha considerado el suelo indeformable. El procedimiento habitual empleado por NOSAT para simular las condiciones de contorno en una superficie de rezume consiste en considerar que cuando en un nodo del contorno (inicialmente no saturado y supuesto impermeable al agua), la presión del agua se iguala a la atmosférica, a partir de entonces, se impone una succión nula en dicho nodo. Este sencillo procedimiento se diseñó y se ha empleado con éxito en la modelación del llenado de presas de materiales sueltos (Lloret *et al.*, 1993). En este caso, la presión del agua crece monótonicamente en los nodos del contorno. Si la situación es distinta el procedimiento puede producir errores. Por otra parte, para obtener resultados precisos, la separación entre los nodos a lo largo de la superficie de rezume debe ser relativamente pequeña en comparación con el movimiento esperado del nivel freático en dicha zona. En el caso particular del problema de la infiltración a través de una barrera de arcilla, la altura del agua en los drenes de arena (especialmente en el inferior) es muy pequeña y en muchos casos inferior al milímetro. En esta situación para controlar adecuadamente el volumen de agua drenado sería necesario emplear mallas extremadamente finas.

Para solucionar los problemas descritos, se ha desarrollado una formulación alternativa. La idea es simular el drenaje del agua mediante un término sumidero en la ecuación de continuidad del agua que afecta al elemento que contiene

la superficie de rezume. La condición que se debe garantizar es que el caudal extraído en el sumidero sea tal que en el nodo del contacto de la arena con el colector externo, la presión del agua no supere nunca a la atmosférica.

En la práctica se adopta el siguiente procedimiento: Considerar (Fig. 2) un contorno $B'C'$ en el borde inferior de la barrera multicapa. La capa de arena está representada por ABCD. En la misma figura se indica la malla de elementos finitos y el nivel freático establecido en la capa de arena. El contorno BC de la capa de arena descarga agua en el tubo de drenaje representado en la figura. En el procedimiento de cálculo se elige al nodo C del elemento "el" para especificar que en él no se supera la presión atmosférica. Antes de que el dren actúe efectivamente como tal, el nodo C tiene una presión de agua negativa (Fig. 3). En esta fase, los cálculos se realizan asumiendo que el contorno $B'C'$ es impermeable. A medida que el agua se infiltra, la presión en C crece y eventualmente alcanza el valor cero. Se ha establecido una pequeña tolerancia ($p^* = 1.5 \text{ Pa}$) para activar el sumidero en elemento "el" cuando $p_{ac} \geq p^*$. Esto ocurre, por ejemplo cuando en la figura 3 el valor de la presión del agua en C alcanza el valor $p_{ac}^{(2)}$. La magnitud del sumidero se establece de forma iterativa en el programa hasta asegurar que la presión del agua en C, (p_{ac}), permanece entre los límites $\pm p^*$.

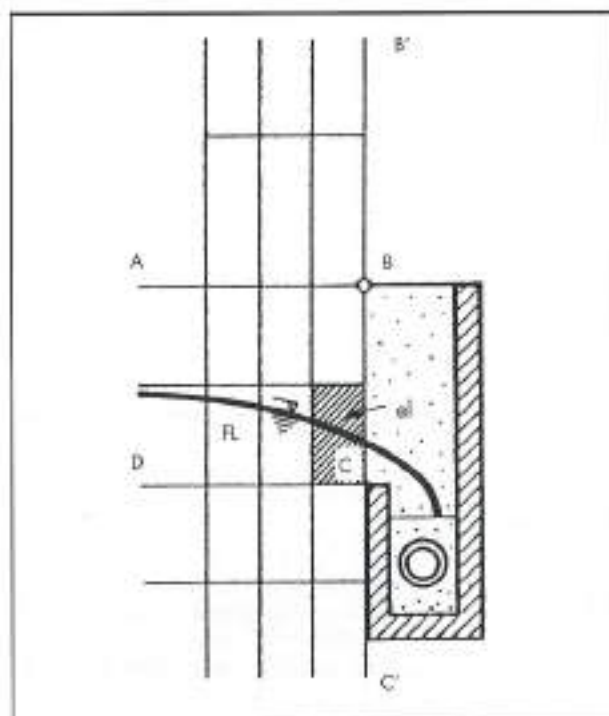


FIGURA 2. Modelado de las condiciones de salida en los drenes de arena.

3. MODELADO DE LA BARRERA MULTICAPA

Las propiedades del suelo que controlan el comportamiento hidráulico de la barrera son la curva de retención del agua (succión-humedad) y la variación de la permeabilidad al agua con el grado de saturación o con la succión. En la figura 4 se muestra la curva de retención adoptada para cada uno de los cuatro suelos utilizados; las curvas muestran un valor de entrada de aire razonablemente bien definido y

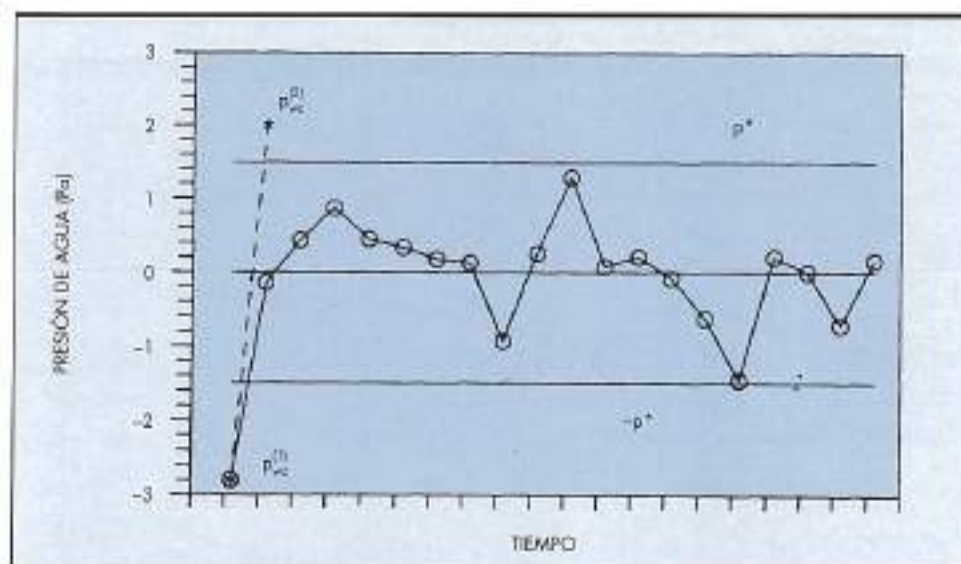


FIGURA 3. Evolución de la presión del agua en el nodo asociado a la salida del agua en los drenes.

claro límite para el grado de saturación irreducible. En la misma figura puede observarse cómo las condiciones iniciales del suelo en el momento de la compactación corresponden a un estado muy seco. En la figura 5 se muestra la variación de la permeabilidad con el grado de saturación. Puede observarse cómo la permeabilidad al agua se reduce drásticamente cuando el grado de saturación se reduce hasta los valores próximos a la saturación irreducible. Por otra parte, la permeabilidad varía más suavemente en un amplio rango de valores próximos a la saturación.

La geometría del problema ha sido discretizada por medio de una malla de 364 elementos finitos lineales de 4 nodos que totalizan 406 nodos. A fin de facilitar la estabilidad

y convergencia, se ha reducido el tamaño de los elementos en las proximidades de los contactos entre materiales de muy distinta permeabilidad. El contorno izquierdo corresponde al eje de simetría y se considera impermeable junto con el borde inferior. En la superficie se ha considerado un caudal de infiltración constante de 10^{-5} m/s. El contorno de la derecha se ha supuesto impermeable excepto en las capas de arena donde se ha implementado la condición de dren descrita anteriormente. La distancia entre contornos verticales es de 25 m.

Las dos consideraciones más importantes en el diseño de las barreras multicapa son el caudal drenado a largo plazo a través de la capa arcillosa y el tiempo necesario para que

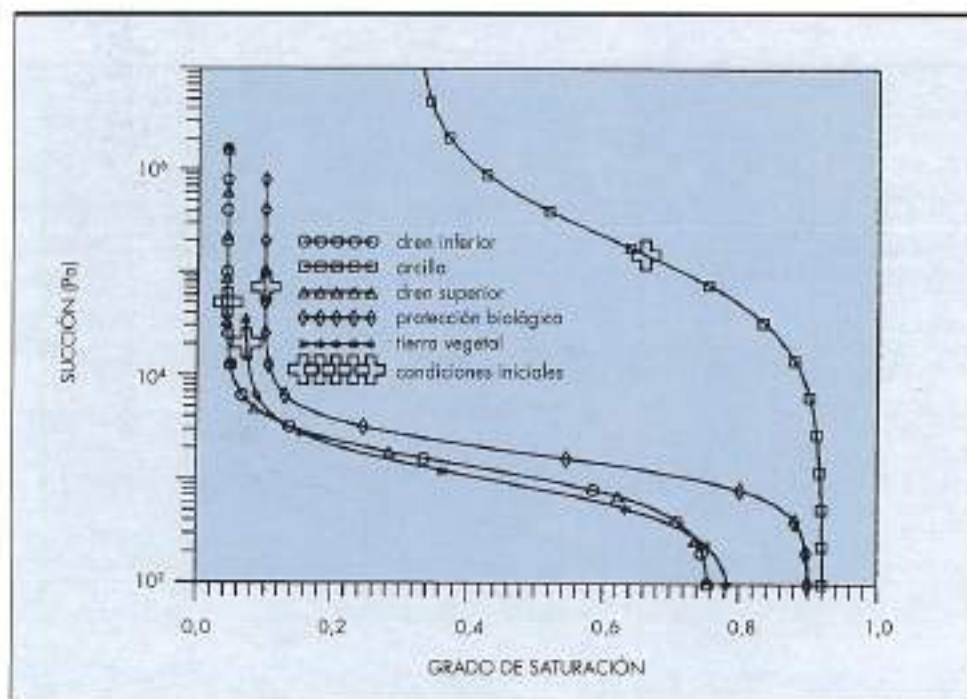


FIGURA 4. Relación succión-grado de saturación y condiciones iniciales.

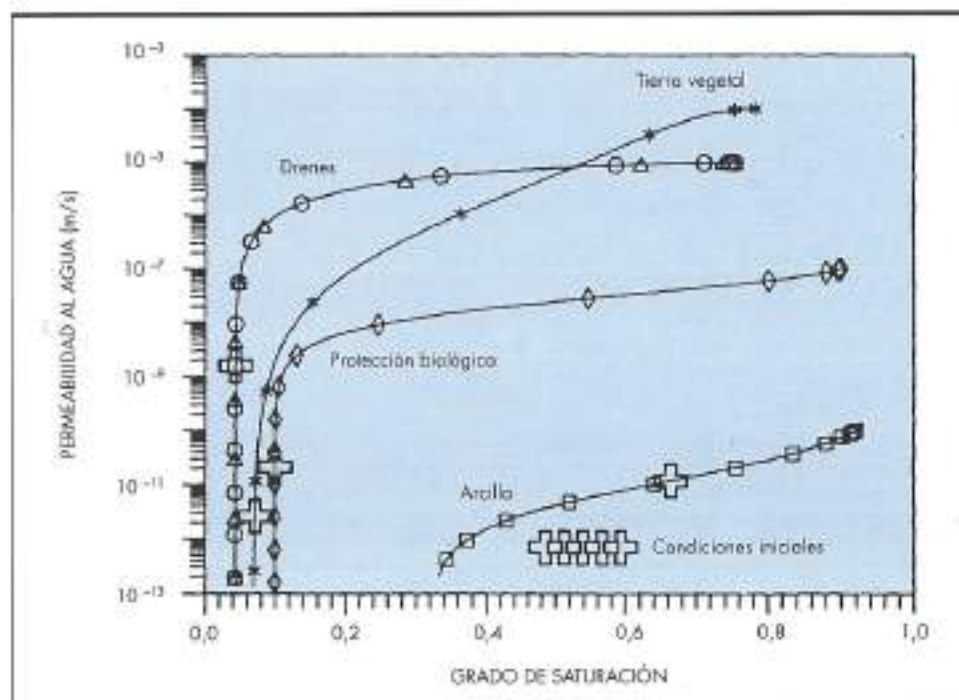


FIGURA 5. Relación permeabilidad al agua-grado de saturación y condiciones iniciales.

el agua empieza a salir por el dren de arena inferior. En la figura 6 se muestra esta información para el caso particular descrito anteriormente. El agua empieza a salir por el dren inferior 1.789 días (4,9 años) desde el inicio de la infiltración. El caudal calculado es de 0,27 l/día-m (por metro profundidad de barrera). El agua empieza a salir por el dren superior a los 73 días desde el inicio del flujo y el caudal drenado es de 21,43 l/día-m lo que representa el 98,5% de la infiltración superficial.

La succión inicial asumida en las diferentes capas ha sido la siguiente: tierra vegetal: 20 kN/m^2 , capa de protección biológica (esquistos): 70 kN/m^2 , capas de arena: 50 kN/m^2 , capa de arcilla: 150 kN/m^2 . En la figura 7A se muestran los importantes cambios de succión que han tenido lugar durante el primer mes de infiltración. En la parte inferior de la capa de arcilla, la succión se mantiene cerca de su valor original. La succión en el dren inferior se ha incrementado debido a la proximidad de la arcilla. Sin

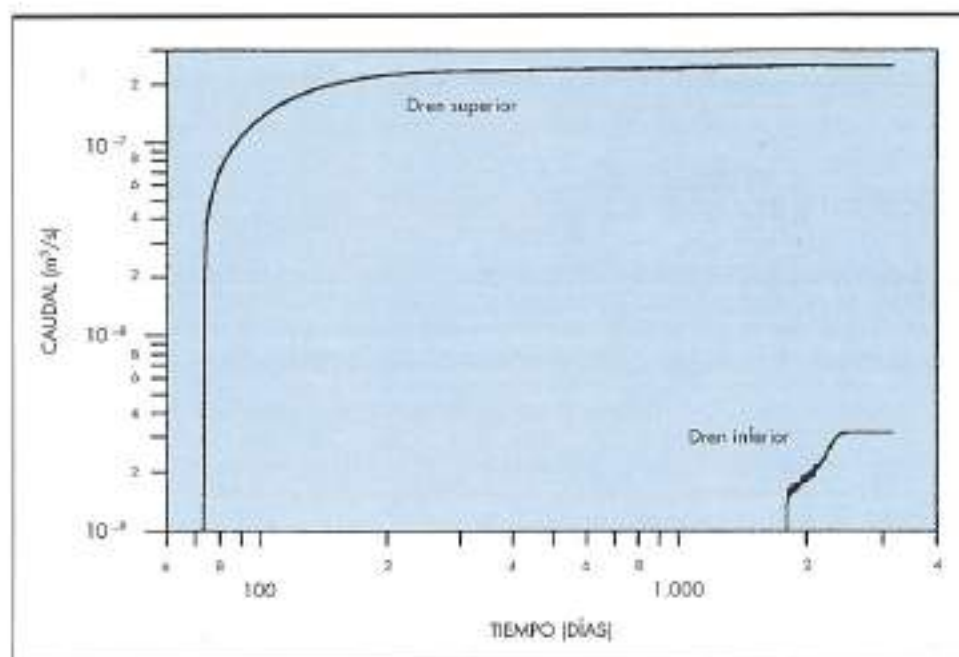


FIGURA 6. Caudales drenados en las capas de arena inferior y superior.

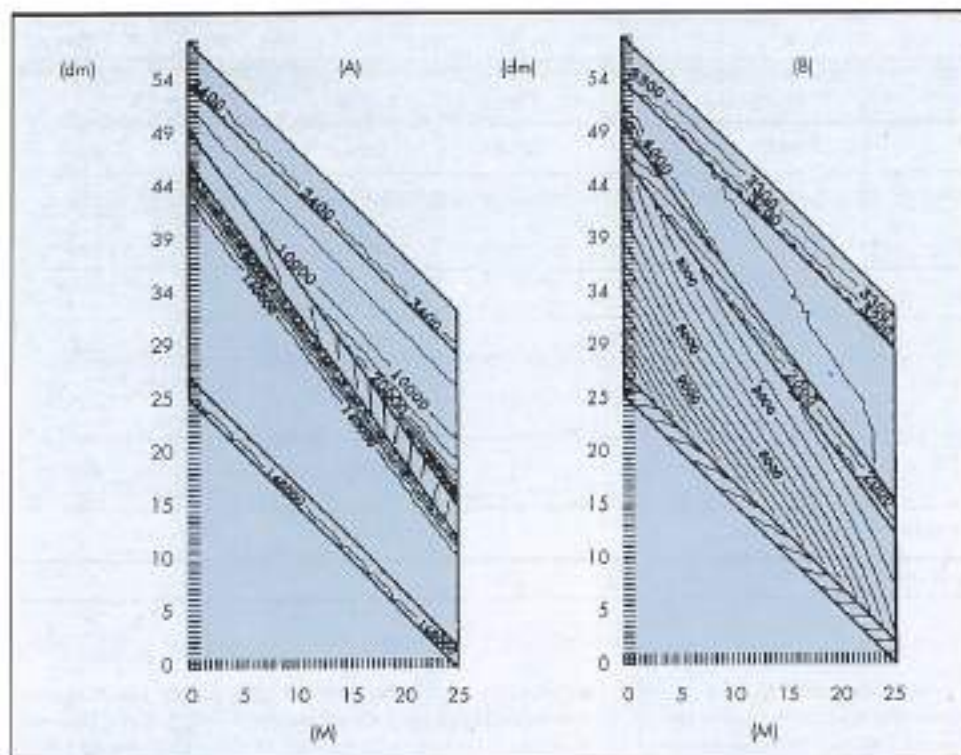


FIGURA 7. Mapa de succiones [Pa]: A) $t = 1$ mes; B) $t = 8,7$ años.

embargo, las succiones se han reducido drásticamente en las dos capas más superficiales. Los máximos gradientes se concentran en la parte superior de la arcilla donde se puede apreciar un frente de saturación que progresa hacia la base de la barrera. Ocho años y medio más tarde (fig. 7B) se han alcanzado las condiciones estacionarias en el régimen de infiltración. Las succiones han decrecido hasta valores muy bajos y la circulación de agua es muy regular: vertical en las capas impermeables y subhorizontal en los drenes de arenas.

4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se ha realizado un análisis de sensibilidad de cara a conocer mejor el comportamiento de la barrera. Los cambios esenciales afectan a la capa de arcilla. En la Tabla 1 se recogen las variaciones de succión inicial, permeabilidad y espesor que se han considerado. La succión inicial está ligada a la humedad empleada en el proceso de compactación. Los casos (2) y (3) corresponden a una compactación más seca que la del caso (1) que se toma como referencia.

El caso (3) difiere del caso (2) en la forma de la curva de retención y la permeabilidad de la capa de barrera biológica. En el caso (3) esta capa se asume como de granulometría más gruesa. El caso (4) corresponde a una disminución uniforme de 0,5 m en el espesor de la capa de arcilla y el caso (5) corresponde a una disminución de dos órdenes de magnitud en el valor de su permeabilidad. Los cambios del caso (4) y (5) se combinan en el caso (6). En la Tabla 1, se muestra el tiempo de salida del agua en los drenes superior e inferior (t_s y t_i) y los caudales drenados en condiciones estacionarias (Q_s y Q_i). En la columna (e) se muestra la relación entre el caudal drenado en el dren de arena superior (Q_s) y el valor de la infiltración total (Q_t). Por último en la columna (f) se recoge el cociente entre el caudal drenado en el dren inferior

(por unidad de superficie horizontal) y el valor de la permeabilidad saturada de la arcilla k_{sat} .

Los resultados obtenidos conducen a las siguientes consideraciones:

- A largo plazo, el dren superior recoge, en todos los casos, más del 98% de la infiltración superficial. Ello se explica por el pequeño caudal que se infiltra a través de la capa de arcilla. Este último caudal está directamente relacionado con la permeabilidad de la arcilla y sólo marginalmente con otros factores.
- La barrera multicapa, es de hecho, la superposición de los sistemas, superior e inferior, casi independientes entre sí. El sistema superior está compuesto por las dos capas más superficiales y el dren superior de arena y el sistema inferior por la capa de arcilla y el dren inferior. Esta independencia se manifiesta en un doble sentido: un menor espesor o una succión inicial diferente en la capa de arcilla no afecta al comportamiento del sistema superior (caudal drenado y tiempo de salida del agua). Por otra parte, un cambio en la curva de retención de la capa de protección biológica no modifica el flujo drenado en el sistema inferior —comparar los casos (2) y (3)—.
- El valor del cociente entre el caudal drenado por unidad de superficie y la permeabilidad —columna (f)— sería la unidad en el caso de un flujo vertical regido por un gradiente unidad. Los valores calculados indican un gradiente vertical a largo plazo, algo mayor que uno. Esto se explica por el valor positivo de las succiones que se mantienen en la arena inferior en el contacto arcilla-arena. Esas succiones son algo mayores que las pequeñas succiones calculadas en el dren de arena superior. Este resultado conduce un método simplificado para calcular el

DEFINICIÓN DEL CASO	(a) t_e (d)	(b) h (d)	(c) Q_0 (l/d-m)	(d) Q_1 (l/d-m)	(e) Q_0/Q_1 (%)	(f) $\frac{Q_0}{k_{\text{mst}}}$
(1) Referencia (ver texto)	73,03	1.788,9	21,43	0,27	98,71	1,26
(2) Menor succión inicial en arcilla ($s_0 = 80 \text{ kN/m}^2$)	63,49	866,9	21,43	0,27	98,71	1,26
(3) Menor succión inicial y capa de protección de granulometría más gruesa	21,63	859,7	21,43	0,27	98,72	1,25
(4) Menor espesor de arcilla [-0,5 m]	73,62	930,0	21,38	0,32	98,51	1,48
(5) Menor permeabilidad de arcilla ($k_{\text{mst}} = 10^{-12} \text{ m/s}$)	54,07	= 575 a	= 21,7	*	= 99,98	*
(6) Menor espesor y permeabilidad [6] = [4] + [5]	54,07	93.450	21,7	0,0034	99,98	1,59

[*]: No se realizó el análisis hasta condiciones estacionarias.

TABLA 1. Resultados del análisis de sensibilidad.

caudal drenado a través de la capa de arcilla: $Q = i k_{\text{mst}} e$, donde i es un gradiente mayor que uno pero menor de 1,6, independientemente de otros factores como el espesor de la capa de arcilla.

El tiempo de salida de la primera gota de agua en el dren inferior t_1 depende de varios factores: la permeabilidad de la capa de arcilla, su curva de retención, su espesor y su succión inicial. Esta última dependencia se

explica por el fuerte carácter no lineal de las curvas de retención de agua y de la permeabilidad. Para una succión inicial dada en la arcilla, el valor de t_1 puede representarse en términos de espesor de arcilla y permeabilidad. Las combinaciones más naturales de esos dos parámetros son el e/k_{mst} o H^2/k_{mst} , donde e el espesor medio de arcilla y H el semiespesor medio de dicha capa ($H = e/2$). La figura 8 muestra cómo un gráfico de este

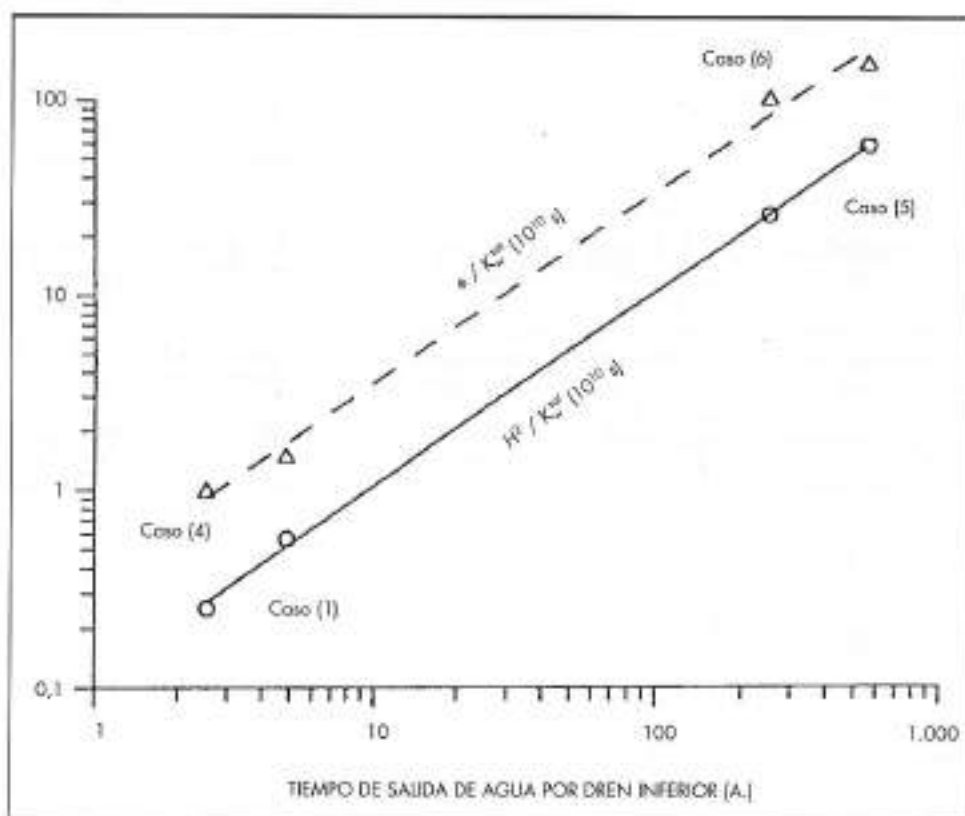


FIGURA 8. Relación entre el tiempo de salida del agua a través del dren inferior, el espesor de arcilla y la permeabilidad.

tipo puede utilizarse, en primera aproximación, para estimar, en la barrera analizada, el tiempo necesario para que el agua salga por primera vez en el dren inferior.

5. CONCLUSIONES

En esta comunicación se presenta la metodología y los resultados de un estudio del flujo bidimensional no saturado a través de una barrera multicapa compuesta por suelos con permeabilidades y curvas de retención muy diferentes. Para simular la existencia de superficies de rezume de espesor mucho más pequeño que el tamaño de los elementos finitos utilizados, se ha desarrollado un nuevo procedimiento que modela el comportamiento de los drenes de arena mediante la existencia de un sumidero. Las principales conclusiones obtenidas del análisis del flujo de una barrera tipo, sometida a una infiltración constante en superficie han sido las siguientes:

- a) El particular diseño de la barrera descrita, hace que conceptualmente pueda ser considerada como la superposición de dos sistemas independientes.
- b) El caudal de infiltración estacionario a través de la capa de arcilla depende sólo de su permeabilidad saturada. Se ha propuesto un procedimiento simple para calcular el caudal de agua que se infiltra. Este procedimiento implica que el gradiente global en la capa de arcilla es algo mayor que la unidad debido a que se mantienen succiones positivas en la capa de arena inferior.

- c) El tiempo de respuesta de la capa de arcilla depende de su permeabilidad y curva de retención, de su espesor y de su succión inicial. Para una determinada variación de la permeabilidad y humedad con la succión y para una succión inicial dada, se ha obtenido una relación entre el espesor de arcilla, la permeabilidad saturada y el tiempo necesario para que el agua salga por el dren inferior. Esta relación puede utilizarse como una sencilla guía, útil en este caso particular. Sin embargo, no ha sido posible obtener reglas simples de uso general.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con el soporte de la Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs de France (ANDRA).

REFERENCIAS

- ALONSO, A.; BATLLE, F.; GENS, A. y LLORET, A. "Consolidation analysis of partially saturated soils. Application to earthdam construction". Numerical Methods in Geomechanics. Innsbruck. pp. 1303-1308. (1988).
- LLORET, A.; ALONSO, E. E.; GENS, A.; BATLLE, F. y DELAHAYE, C. "Análisis de la construcción y llenado de presas de materiales sueltos". Simposio sobre Geotecnia de Presas de Materiales Suelos. Zaragoza. pp.191-204. (1993).

PREMIO FUNDACIÓN ESTEYCO

La Fundación Esteyco, cuyo objetivo es la difusión y el progreso de la Ingeniería y la Arquitectura, convoca un premio a la mejor monografía sobre facetas humanísticas, estéticas o históricas de la ingeniería civil y de la arquitectura. El premio está dotado con 500.000 pesetas.

Podrán optar al premio aquellos trabajos de carácter divulgativo sobre las materias mencionadas que se reciban en la sede de la Fundación Esteyco antes del 31 de septiembre de 1995. Los textos se

presentarán en DIN A-4 a doble espacio con una extensión máxima de 100 páginas.

El patronato de la Fundación Esteyco designará el jurado que decidirá la monografía ganadora. El jurado hará público el fallo antes del 31 de diciembre de 1995.

La Fundación Esteyco se reserva el derecho a publicar la monografía ganadora, lo que se supone aceptado por parte del autor al presentarla al premio.