

CONDICIONES PARA EL BUEN FUNCIONAMIENTO DE UNA CAPA DRENANTE

CONDITIONS FOR WELL PERFORMANCE OF A SUBDRAINAGE LAYER

por **Fernando Muzás Labad**

*Dr. Ingeniero de Caminos C. y P.
Profesor de Mecánica del Suelo ETSAM*

RESUMEN: Se analiza el funcionamiento de una capa drenante, suponiendo que a través del pavimento o desde el terreno le llega un caudal uniforme de agua. En régimen de flujo permanente, se diferencian dos zonas: una de saturación, donde el calado crece hasta alcanzar el espesor de la capa, y otra de evacuación, en la que el calado decrece hasta el punto final donde se produce la descarga. La longitud de estas dos zonas depende del caudal que se infiltra y de las características de la capa drenante tales como permeabilidad, espesor y pendiente. Se determina la abscisa del punto de saturación y el calado de agua en ambas zonas, mediante integración numérica por el método de Runge-Kuta. Se comprueba que para pequeñas pendientes la longitud eficaz de un dren resulta bastante reducida. El diseño de una capa drenante debería hacerse considerando los parámetros de funcionamiento, situando el punto de descarga a una distancia que garantice su eficacia.

ABSTRACT: The performance conditions of a subdrainage layer are analysed, assuming that an uniform flow of water infiltrates through the pavement or from the ground. With permanent flow, two zones may be distinguished: one of saturation, where the depth of water increases and other of evacuation, in which the depth decreases towards the discharge point. The length of these two zones depends on the infiltration rate and the characteristics of the layer such as permeability, thickness and slope. The abscise of the saturation point is determined and the water depth, along the two zones, is computed by numeric methods following the Runge-Kuta method. It is verified that for reduced slopes, the efficient length of the layer becomes enough small. The design of a drainage layer should be made considering the parameters involved in its performance, locating the discharging point at a distance that secures the layer efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

Hace unos años el autor tuvo oportunidad de participar en el proyecto y construcción de sistemas de impermeabilización de embalses mediante membranas bajo las cuales es aconsejable disponer en general una base drenante. En principio, a pesar de que el material de las membranas es muy poco permeable, se admite que la filtración puede ser del orden de 0,1 l/Ha/seg. por cada metro de columna de agua, lo que equivale a un caudal específico $q = 10^{-8} \cdot H$ (m/seg.), siendo H la carga de agua en metros.

La circunstancia de tener que justificar en algún caso el funcionamiento del sistema aconsejó estudiar el comportamiento de las bases drenantes, publicando algunos resultados en 1986 en un artículo titulado "**Impermeabilización de vasos de embalse. Consideraciones sobre el diseño de bases drenantes**", publicado en la Revista de Obras Públicas.

El principal resultado del estudio teórico, comprobado en la realidad, es que una capa drenante tiene muy poca eficacia si la pendiente es reducida, llegando a entrar en carga bajo el embalse, para que se puedan evacuar los caudales de filtración.

Partiendo de esta experiencia, en la presente comunicación se trata de analizar el funcionamiento de una capa drenante dispuesta bajo un firme de carretera y establecer algunas condiciones que se deben cumplir para que dicha capa pueda resultar eficaz, es decir sea capaz de eliminar los caudales de agua previstos.

2. HIPÓTESIS DE PARTIDA

La primera hipótesis que se debe establecer es el caudal específico de agua que puede llegar a la capa, filtrando a través del pavimento, aunque también podría llegar por la base. Este caudal necesariamente ha de

ser función de la intensidad de lluvia y de la permeabilidad del pavimento. Es evidente que el agua de lluvia para circular sobre el pavimento necesita una cierta pendiente en la superficie de la lámina y un cierto espesor de la misma que se va formando mediante acumulación progresiva hasta que se alcanza una situación de régimen. Además de este caudal de escorrentía, una parte del agua se infiltrará a través del pavimento, bien porque éste sea algo permeable o bien porque existan juntas o defectos que faciliten la infiltración.

No es objeto de la presente comunicación estudiar la magnitud de este caudal específico, pero es evidente que al igual que en el caso de las membranas de impermeabilización se ha llegado a admitir un valor de cálculo, en el caso del drenaje interno de los firmes de carretera sería conveniente estudiar el tema y llegar a formular unas recomendaciones que tuvieran en cuenta los principales parámetros como son:

1. Intensidad de lluvia
2. Espesor del pavimento
3. Permeabilidad real o aparente del mismo
4. Pendiente de la superficie del pavimento

La segunda hipótesis de partida consiste en considerar que la capa drenante es de espesor y pendiente uniformes y que sus características vienen definidas por los siguientes parámetros:

1. Espesor de la capa
2. Pendiente de la capa
3. Coeficiente de permeabilidad del material

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Partiendo de las hipótesis anteriores, el planteamiento del problema consiste en considerar que a partir del **punto inicial de la capa**, donde se produce el comienzo de la infiltración, el calado y la pendiente del agua en cada punto debe ser tal que el caudal

circulante sea igual al recogido por la capa desde el origen hasta ese punto.

En principio el planteamiento teórico debería consistir en estudiar la red de filtración dentro de la capa en régimen de lámina libre, lo que conduciría a una serie de curvas de corriente y otras equipotenciales. En el comienzo de una capa indefinida de gran espesor, puede comprobarse que las líneas de corriente son rectas pasando por el origen y circunferencias con centro asimismo en el origen, experimentando luego una cierta modificación debido a la influencia del punto en el que se produzca la descarga de agua.

En el caso que nos ocupa de una capa de pequeño espesor en comparación con la distancia que puede recorrer el agua dentro de la capa, parece admisible, con suficiente aproximación, considerar secciones verticales y velocidades horizontales definidas por la pendiente de la lámina de agua en superficie.

En estas condiciones, a continuación se efectúa el planteamiento teórico del problema, partiendo de los siguientes parámetros iniciales:

- Q Caudal específico de filtración en $m^3/m^2/seg$
- e Espesor de la capa en m
- i_0 Pendiente de la capa
- K Coeficiente de permeabilidad del material en m/seg.
- x Distancia desde el origen en m
- y Calado de agua en m

A la distancia x el caudal total infiltrado en la capa por metro de anchura, vale:

$$q = Q \cdot x \quad (1)$$

A la misma distancia " x " el caudal circulante por metro de anchura de dren, de acuerdo con la teoría de Darcy, será:

$$q = y \cdot v = y \cdot K \cdot i \quad (2)$$

siendo " i " el gradiente hidráulico de valor " $i = i_0 - dy / dx$ ".

Igualando ambas expresiones (1) y (2) se obtiene la ecuación diferencial que regula la circulación del agua dentro de la capa:

$$y \cdot K \cdot \left(i_0 - \frac{dy}{dx} \right) = Q \cdot x \quad (3)$$

Puede comprobarse que una solución particular de esta ecuación diferencial corresponde a la relación lineal " $y = \alpha \cdot x$ ", transformándose la ecuación diferencial (3) en la siguiente ecuación algebraica:

$$\alpha \cdot (i_0 - \alpha) = \frac{Q}{K} \quad (4)$$

de la que puede despejarse el valor de " α ". Esta solución, en la que el calado de agua crece linealmente, corresponde a un régimen de funcionamiento que puede existir al comienzo de la capa, pero no es una solución válida para la zona final, en la que se debe producir la descarga de los caudales de agua recogidos.

Si a una determinada distancia " x_s " del origen, se llega a la saturación del dren, es decir se hace " $y = e$ " y, además, " $i = i_0$ ", es decir " $dy / dx = 0$ ", según la ecuación (3) se verificará que:

$$x_s = e \cdot i_0 \cdot \frac{K}{Q} \quad (5)$$

La abscisa de este punto, que llamaremos **punto de saturación**, divide el régimen permanente de circulación de agua en dos zonas: 1) en la primera el caudal de agua aumenta desde el origen con un calado creciente de la lámina de agua, hasta que se alcanza el espesor de la capa " e " y podría denominarse **zona de saturación**; 2) en la segunda zona el caudal de agua sigue aumentando pero el calado de la lámina de agua va decreciendo hacia el punto final de la capa, donde se produce la descarga de agua y podría denominarse **zona de evacuación**.

El calado de la lámina de agua en ambas zonas se puede obtener a partir del punto de saturación, efectuando la integración de la ecuación diferencial, tanto hacia el origen

como hacia el punto de descarga de agua, mediante cálculo en ordenador por diferencias finitas, siguiendo por ejemplo el método de Runge-Kuta.

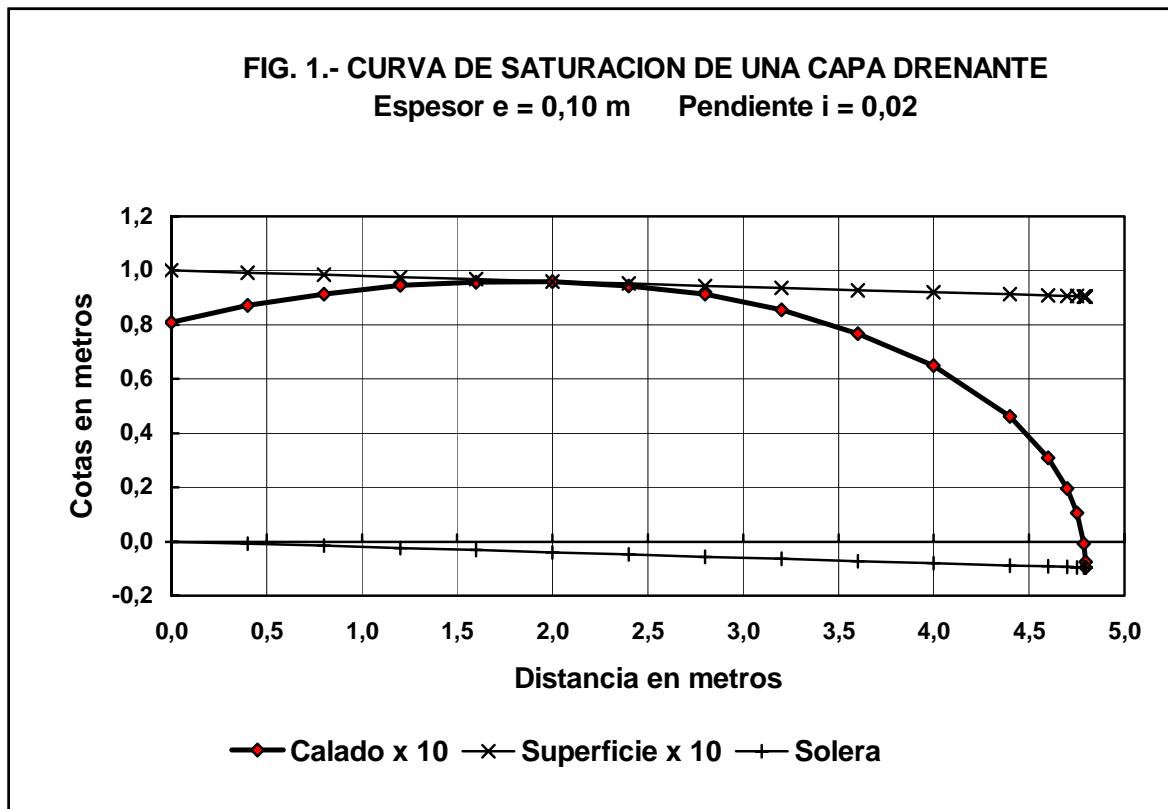
Con la integración hacia el origen se llega a determinar el **calado de agua en el origen de la capa** que resulta nulo cuando el punto de saturación está suficientemente alejado, mientras que en el caso de una capa horizontal el calado en el origen se hace igual al espesor la misma, ya que, según se deduce de la ecuación (5), cuando " $i_0 = 0$ " el punto de saturación se sitúa a la distancia " $x_s = 0$ ".

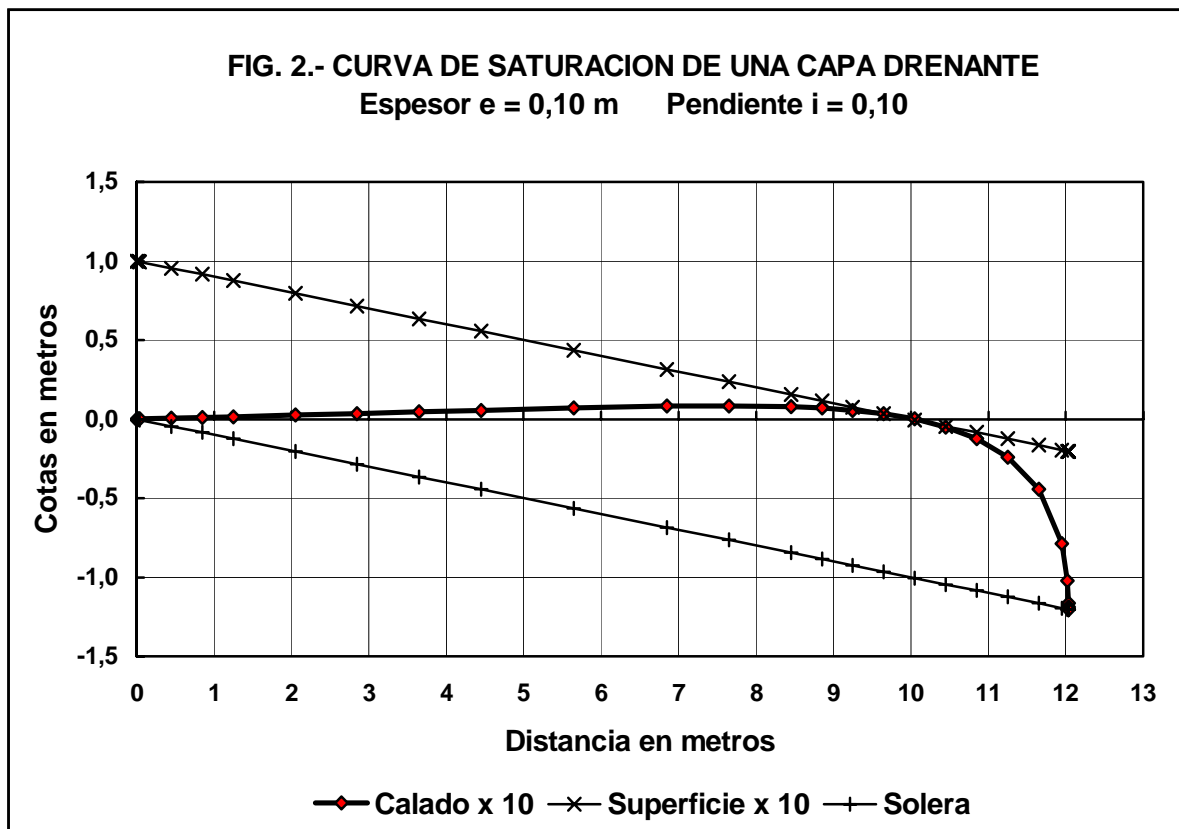
Mediante la integración hacia adelante, se llega a un punto en el que el calado se hace nulo, pero el gradiente hidráulico y por tanto la velocidad del agua alcanza un valor infinito.

Este punto, que denominaremos **punto de descarga**, corresponde al final del dren y en él se debe producir la evacuación del caudal total de agua infiltrado a lo largo de la capa drenante.

En las figuras adjuntas Fig.1 y Fig.2 puede verse la forma que adopta la lámina de agua, aumentada de escala, para dos casos particulares con distinta pendiente " i_0 " y con el mismo valor de la relación: " $K / Q = 1000$ ".

Debe señalarse que si la longitud total del dren es mayor que la obtenida mediante el cálculo indicado anteriormente, la capa drenante puede desaguar pero existiría una zona de dren totalmente saturado verificándose " $y = e$ " pero como el caudal debería ser mayor que el que corresponde a la velocidad con pendiente " i_0 ", necesariamente el dren tendría que entrar en carga, existiendo una línea de energía por encima de la cara superior de la capa drenante.





3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Según se recoge en la ecuación (5) la **abscisa del punto de saturación "x_s"**, es proporcional al espesor de la capa "e", a la pendiente "i₀" y a la relación "K / Q" entre la permeabilidad del material y el caudal específico de infiltración. Manteniendo esta misma relación, la solución para una determinada pendiente puede darse en forma adimensional ya que si se hace el cambio de variables "X = x / e" "Y = y / e" la ecuación diferencial (3) se transforma en:

$$Y \cdot \left(i_0 - \frac{dY}{dX} \right) = \frac{Q}{K} \cdot X \quad (6)$$

que tiene idéntica solución cuando la abscisa relativa de saturación tiene el mismo valor:

$$X_s = \frac{x_s}{e} = i_0 \cdot \frac{K}{Q} \quad (7)$$

De la relación (4) deducida de la solución lineal "y = α · x" que puede existir al comienzo de la capa, y que corresponde a una ecuación de 21 grado en "α", se obtiene el valor:

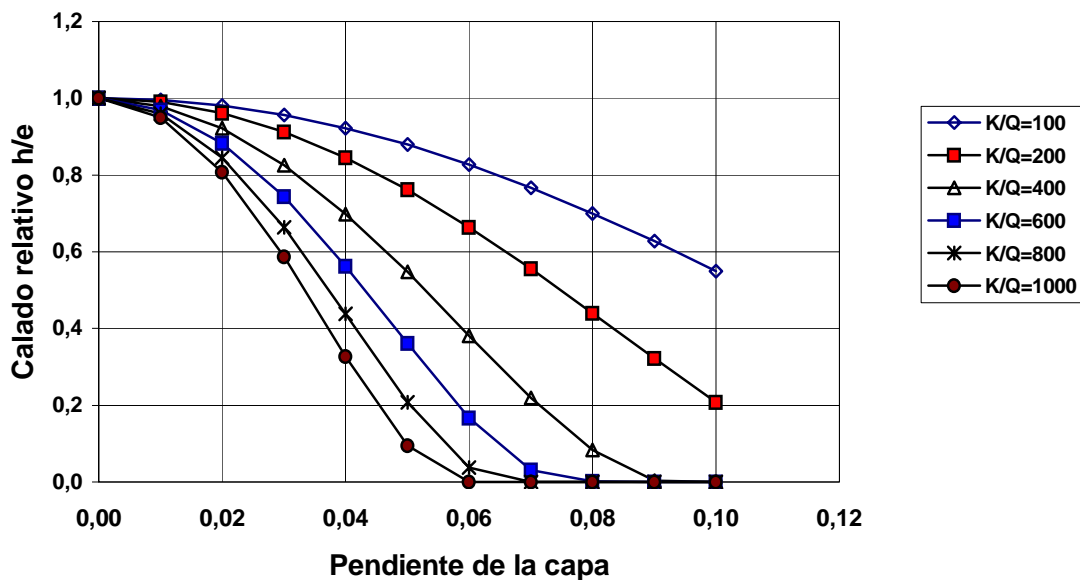
$$\alpha = \frac{i_0}{2} - \sqrt{\left(\frac{i_0}{2}\right)^2 - \frac{Q}{K}} \quad (8)$$

En esta expresión se observa que la relación "Q/K" no puede tener cualquier valor ya que el radicando no puede ser negativo pues la solución resultaría imaginaria; en consecuencia para que la solución exista, se debe cumplir que:

$$\frac{Q}{K} \leq \left(\frac{i_0}{2}\right)^2 \quad (9)$$

Cuando esta relación no se cumple, no puede existir en el origen una zona con la solución particular y el calado en el origen resulta mayor que cero, como sucede cuando el dren es horizontal.

FIG. 3.- CALADO EN EL ORIGEN DE UNA CAPA DRENANTE EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN K/Q



En las figuras adjuntas Fig.3 y Fig.4 se recogen los resultados adimensionales del calado en el origen "h" y de la longitud eficaz "L" de una capa drenante de espesor "e", para diversos valores de la relación "K/Q = 100 a 1.000", en función de la pendiente "i₀".

Debe señalarse que en una carretera la pendiente de cálculo hacia el punto de descarga, así como la distancia hasta el mismo, corresponden, en cada caso, a los valores que resultan de combinar la pendiente transversal de la explanada con la pendiente longitudinal del trazado.

4. CONCLUSIONES

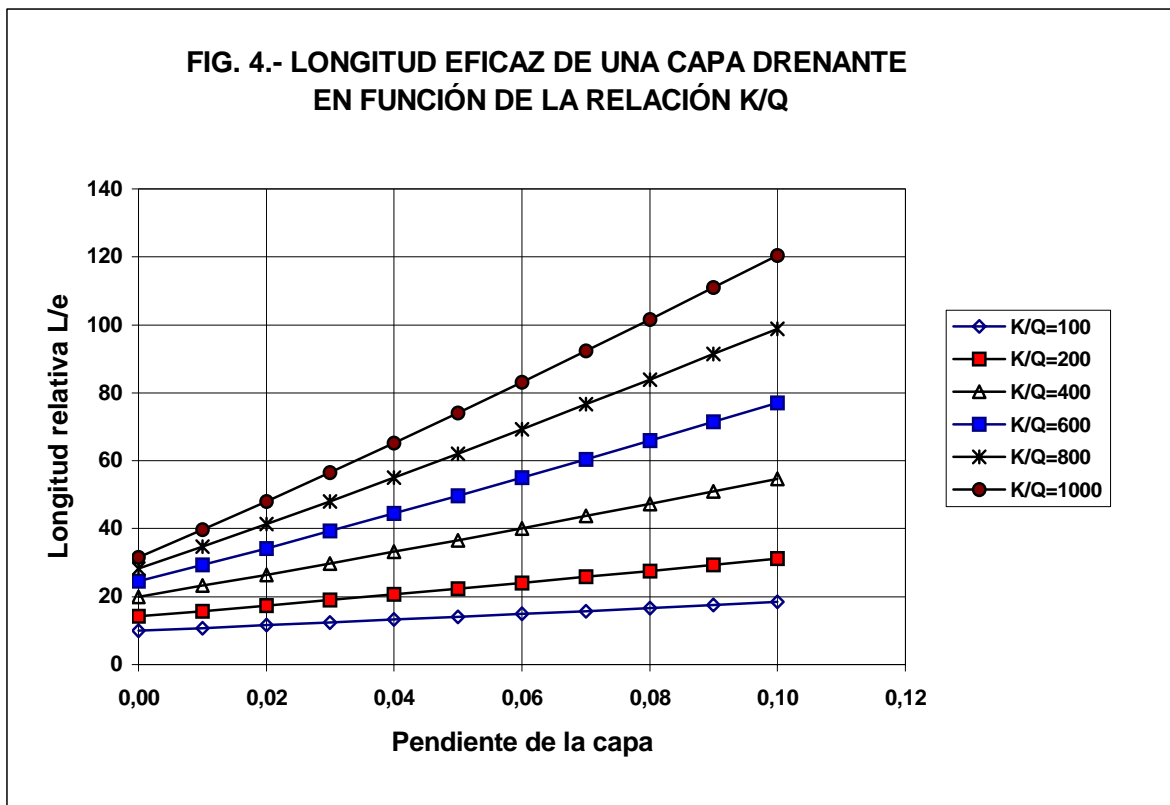
Del estudio esbozado en la comunicación se deduce como primera conclusión que una capa de drenaje del firme de una carretera puede resultar ineficaz, y por tanto antieconómica, si no reúne las condiciones necesarias para evacuar los caudales de agua que pueda recoger.

Para que una capa drenante no entre en carga, la longitud entre el origen y el punto de descarga de agua no debe superar el valor obtenido en el cálculo, teniendo en cuenta para ello los valores que resultan de combinar la pendiente transversal de la explanada con la pendiente longitudinal del trazado.

El diseño de una capa drenante debe hacerse considerando, en primer lugar, el caudal específico de infiltración de agua, función naturalmente de la intensidad de lluvia y de la permeabilidad del pavimento o de las condiciones del terreno subyacente.

A continuación deben definirse las características de la capa drenante tales como la permeabilidad del material, el espesor y la pendiente transversal, de manera que para cualquier situación a lo largo del trazado, la distancia entre el origen de la alimentación de agua y el punto de descarga no supere el valor teóricamente necesario.

FIG. 4.- LONGITUD EFICAZ DE UNA CAPA DRENANTE EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN K/Q



Para garantizar la eficacia de la capa drenante es también necesario que el sistema que se disponga para la evacuación del agua drenada, estén correctamente diseñados.

BIBLIOGRAFÍA

MUZÁS, F.: "*Impermeabilización de vasos de embalse. Consideraciones sobre el diseño de bases drenantes*", Revista de Obras Públicas, Febrero 1986.