

IMPERMEABILIZACIÓN DE VASOS DE EMBALSE CONSIDERACIONES SOBRE EL PROYECTO DISEÑO DE BASES DRENANTES

Fernando MUZÁS LABAD

Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Profesor de Mecánica del Suelo ETSAM

RESUMEN: La necesidad de aprovechar al máximo los recursos hidráulicos, obliga, muchas veces, a elegir, para depósitos de acumulación de agua, emplazamientos que no reúnen buenas condiciones de impermeabilidad. En el presente artículo se exponen diversas consideraciones sobre el proyecto de sistemas de impermeabilización superficial, que recogen varios años de experiencia. Frecuentemente bajo el sistema de impermeabilización es preciso disponer bases drenantes, cuyo cálculo se aborda para diseñarlas con la suficiente capacidad de evacuación.

PALABRAS CLAVE: IMPERMEABILIZACIÓN, EMBALSES, BASES DRENANTES

1. INTRODUCCIÓN

La conciencia de que el agua y la energía son dos productos primarios escasos viene obligando a los técnicos a tratar de aprovechar al máximo los recursos hidráulicos, teniendo que elegir muchas veces, como depósitos de acumulación de agua (con fines energéticos, agrícolas o de abastecimiento) emplazamientos que, siendo adecuados desde el punto de vista topográfico, no reúnen buenas condiciones de impermeabilidad.

Para hacer frente a los problemas de filtración o pérdida de agua, y hacer viable o económica la construcción de embalses en emplazamientos hasta entonces

desechados, se pensó inicialmente, como método de impermeabilización, en la disposición de tapices o revestimientos superficiales, utilizando materiales tradicionales como la arcilla y el hormigón hidráulico o bituminoso.

La impermeabilización mediante tapices de arcilla compacta puede ser solución para el tratamiento de zonas locales de alta permeabilidad, siempre que se adopten precauciones que aseguren su integridad (disposición de capas filtro, uso de textiles anticontaminantes) y pueda desecharse el riesgo de fisuración por desecación o movimientos del soporte. Este sistema requiere, normalmente, importante espesor de arcilla, que debe estudiarse en función de la carga hidráulica y del coeficiente de permeabilidad que pueda obtenerse en la obra. La eficacia del tratamiento exige un adecuado proyecto del enlace con todo tipo de estructuras y con las zonas laterales del terreno consideradas como suficientemente impermeables.

La utilización de revestimientos a base de aglomerantes hidráulicos o bituminosos requiere, en principio, espesores más reducidos. Su rigidez puede ser un inconveniente, si debido a la deformabilidad del soporte estos revestimientos llegan a fisurarse.

Más recientemente se inició la búsqueda de nuevos sistemas de impermeabilización que permitiesen alcanzar económicamente buenos resultados. La aparición en el mercado de los materiales sintéticos abrió una perspectiva nueva en este campo, al permitir aplicar, como tratamiento de impermeabilización superficial, láminas de pequeño espesor construidas mediante bandas prefabricadas o mediante un proceso de fabricación «in situ».

La adopción de un sistema u otro de impermeabilización superficial no es un problema estrictamente económico o de durabilidad, sino que depende fundamentalmente del correcto diseño global, del que dependen en definitiva el éxito del sistema de impermeabilización que se elija.

En el presente trabajo se exponen, en primer lugar, diversas consideraciones sobre el proyecto de sistemas de impermeabilización, consideraciones que de alguna manera recogen varios años de experiencia en este campo. Hay ocasiones en las que resulta

aconsejable, o necesario. disponer bases drenantes, bajo la capa de impermeabilización, cuyo estudio se aborda en la última parte del artículo, para diseñarlas con la suficiente capacidad de evacuación del agua.

2. PROYECTO DE UN SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN

Cuando se aborda la impermeabilización de un vaso de embalse, mediante la disposición de un revestimiento de pequeño o mediano espesor, hay que tener en cuenta no sólo las características de los materiales que en principio se puedan emplear, sino también una serie de fenómenos —no siempre bien identificados—, cuyo análisis conviene efectuar para adoptar el sistema global que mejor se adapte a las circunstancias y los condicionantes particulares de cada caso.

En general, los factores a tener en cuenta son los siguientes:

1. Permeabilidad:

- a) General del revestimiento.
- b) Problemas de borde.

2. Adaptación al soporte:

- a) Durante la construcción.
- b) Bajo la carga de agua.
- c) Variaciones térmicas.
- d) Retracción.

3. Subpresión:

- a) Agua del terreno.
- b) Filtración a través de revestimiento.
- c) Aire del terreno o del contacto.
- d) Vapor de agua.

4. Acciones mecánicas:

- a) Viento.
- b) Oleaje.
- c) Costras de hielo.
- d) Otras causas.

5. Durabilidad y mantenimiento.

A continuación haremos algunos comentarios sobre cada uno de estos factores.

2.1. Permeabilidad

Es el primer factor a tener en cuenta, cuando se trata de materiales tradicionales, para dimensionar el espesor del revestimiento. Como ya se ha comentado anteriormente, la eficacia del tratamiento depende sólo del coeficiente de permeabilidad que pueda conseguirse en obra, sino fundamentalmente de la capacidad del material para no fisurarse por desecación, variaciones térmicas o movimientos del soporte bajo la carga de agua.

Las láminas de pequeño espesor, prefabricadas o construidas «in situ», presentan coeficientes de permeabilidad de DARCY muy bajos (10^{-11} cm./seg. a 10^{-13} cm./seg.), que incluso se conservan con grandes deformaciones. Estas permeabilidades tan bajas se determinan normalmente por métodos indirectos.

En la práctica, es muy difícil conseguir que la filtración se limite al valor teórico correspondiente al coeficiente de permeabilidad del material, ya que siempre se producen pequeñas imperfecciones de construcción estadísticamente inevitables, que pueden dar lugar a caudales bastante mayores.

Debido a ello, es por lo que internacionalmente se ha admitido como límite práctico de la filtración el valor de 0,1 l / ha . seg., por cada metro de columna de agua.

Conviene señalar que este límite práctico de permeabilidad es no obstante bastante

exigente, ya que con una carga de agua de 20 m., por ejemplo, la filtración equivale, aproximadamente, a la que se produciría a través de una lámina totalmente impermeable en la que existiera un orificio de 1 cm² de sección en cada Ha, o bien un poro de 0,1 mm. de diámetro por cada metro cuadrado.

De estos razonamientos se deduce la importancia que puede tener cualquier tipo de rotura o de fisuración en el revestimiento de impermeabilización, por pequeña que sea, y la conveniencia de prestar gran atención a la concepción global del sistema de impermeabilización y al proceso de ejecución, con vistas a eliminar riesgos.

Atención especial hay que prestar a los problemas de borde, como pueden ser el enlace del revestimiento con todo tipo de estructuras, o el sellado con zonas de terreno suficientemente impermeables, proyectando las disposiciones o elementos oportunos que garanticen que el agua no va a llegar rápidamente al trasdós del revestimiento, por falta de recorrido o de presión en los contactos. Cuando hay incertidumbre respecto a la adherencia o no puede aplicarse el peso necesario en los bordes, puede ser recomendable disponer placas o pernos que aseguren la impermeabilidad de los mismos.

2.2. Adaptación al soporte

La primera condición al construir un sistema de impermeabilización, es que quede lo más perfectamente adaptado a la geometría e incluso a la rugosidad del soporte, para evitar que luego, al actuar la presión del agua, se produzcan tensiones indeseables que provoquen la rotura del revestimiento con pérdida de sus propiedades globales de impermeabilización. Es importante también eliminar al máximo la presencia de aire entre revestimiento y soporte, para evitar subpresión de aire según se comenta más adelante.

En este sentido cualquier sistema construido «in situ» tiene ventajas respecto a otros prefabricados, ya que estos requieren superficies perfectamente regladas para conseguir una buena adaptación al soporte. En ocasiones puede ser conveniente disponer una capa de regularización con objeto de mejorar las posibilidades de

adaptación y disminuir los riesgos de punzonamiento al actuar la presión del agua.

Una vez construido el revestimiento de impermeabilización, es evidente que debe ser capaz de seguir los movimientos del soporte provocados por la carga hidráulica, y adaptarse a él en función de las variaciones térmicas o la posible retracción.

Las láminas delgadas admiten, en general, deformaciones importantes, incluso superiores al 50%, sin perder sus propiedades, lo que las hace aptas para absorber los movimientos del terreno e incluso asientos diferenciales. Especial interés puede tener la resistencia de la lámina al desgarro, y la dificultad de propagación de éste cuando se produce. A pesar de que algunas láminas tengan buenas propiedades a este respecto, cuando en algunas zonas son de prever asientos diferenciales o movimientos importantes, conviene proyectar disposiciones especiales con reservas de material que garanticen en lo posible el correcto funcionamiento de la lámina de impermeabilización.

2.3. Subpresión

En embalses de cierta importancia, es evidente que la subpresión puede producir daños en el sistema de impermeabilización durante los procesos de llenado y vaciado del embalse. Este peligro puede proceder no sólo de la presencia de agua en el trasdós, sino también de la acumulación de aire o de vapor de agua.

El agua puede llegar al trasdós de la capa o lámina de impermeabilización, en primer lugar a través del propio terreno, cuando con ella se corta el flujo natural de las aguas infiltradas en el mismo. Puede ser también agua de lluvia que simplemente se cuela en el trasdós desde la superficie, y finalmente puede proceder del propio embalse, por filtración lenta a través del sistema de impermeabilización o por escape a través de roturas.

En todos los casos, salvo que pueda evitarse o descartarse alguna de estas entradas de agua, debe estar estudiada y garantizada su evacuación para eliminar riesgos de posibles levantamientos y roturas en caso de un desembalse rápido o en época de

lluvias y embalse vacío, como a veces ocurre en canales cuyo revestimiento se rompe al infiltrarse el agua por el trasdós del mismo.

El aire entre el terreno soporte y la capa o lámina de impermeabilización es bastante difícil de eliminar por completo, al igual que ocurre con el empapelado de paredes. Siempre existe la posibilidad de que queden pequeñas burbujas, que luego, al actuar la presión del agua, o tienen posibilidad de escapar por el terreno o se van desplazando hacia cotas más altas, donde se van acumulando provocando el levantamiento, despegue o rotura de la lámina. Si la lámina estaba adherida al soporte, este desplazamiento del aire puede provocar el despegue total por efecto «pelado».

Esta es una primera causa de la acción del aire en el trasdós, que puede aparecer con soportes prácticamente indeformables; pero en general el problema es mayor cuanto mayor es la deformabilidad del terreno al actuar la presión del agua, ya que el aire contenido en el mismo o tiene posibilidad de escapar a la atmósfera, o acaba acumulándose en las zonas altas, o levantando la capa de impermeabilización.

Un fenómeno parecido a este del aire puede presentarse por la acción de vapor de agua. Hay que tener en cuenta que en el trasdós del revestimiento pueden acumularse pequeñas cantidades de agua, simplemente en forma de humedad, por infiltración o por condensación asociada a fenómenos térmicos del suelo. Durante las horas de insolación en las zonas de embalse vacío, puede producirse la evaporación de dicha agua y crearse una especie de colchón gaseoso, con peligro para el sistema, que podría verse sometido a esfuerzos y deformaciones no deseables, igual que con el aire.

En general el conjunto de fenómenos que se acaba de enumerar carece de importancia si el terreno es suficientemente permeable al aire y al agua, y el nivel freático es profundo. En otros casos los problemas quedan resueltos disponiendo una capa porosa o base drenante bajo el revestimiento de impermeabilización. En los taludes esta capa debe tener en la parte superior conductos de ventilación a la atmósfera, y en la parte inferior los oportunos desagües (Fig. 1). En los fondos de embalsé cabe estudiar dispositivos análogos de eliminación del aire y del agua,

aunque en ocasiones el problema puede tener menor importancia siempre que se disponga un lastre adecuado.

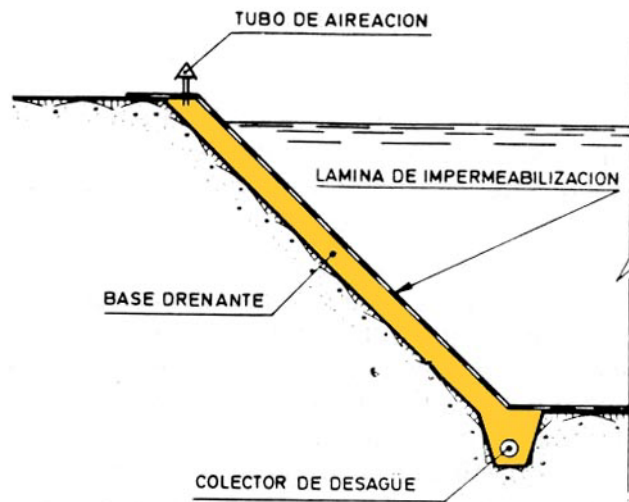


Figura 1. — Esquema de base drenante en taludes.

Conviene señalar, si se dispone de una base drenante, que su naturaleza debe ser compatible con los asientos del terreno soporte, y que incluso puede obligar a que la lámina o capa de impermeabilización sea capaz de hacer frente a su posible fisuración al actuar la presión del agua.

2.4. Acciones mecánicas

En primer lugar la capa o lámina de impermeabilización debe ser capaz de resistir las tensiones a que pueda verse sometida por la deformación del soporte.

Ahora bien, además, los revestimientos deben hacer frente a determinadas acciones mecánicas, como las debidas al viento, oleaje, costras de hielo en zonas frías u otras originadas por la acción del hombre o de los animales que constituyan la fauna de la zona.

Los revestimientos de cierto espesor normalmente se comportan bien ante estas acciones; las láminas delgadas, sin embargo, aunque tengan excelentes propiedades

resistentes, necesitan, por falta de peso, ir adheridas a un soporte o protegidas superficialmente.

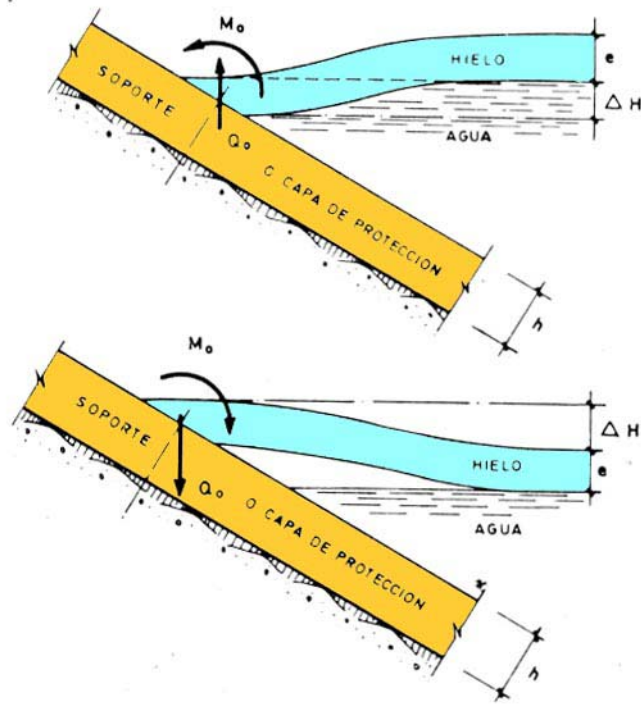


Figura 2. — Acción sobre el talud de una costra de hielo con subida o bajada del embalse.

En zonas frías, en las que pueda llegar a helarse la superficie del agua y formarse costras de hielo adheridas al revestimiento de impermeabilización, debe prestarse atención al proyecto de todo el conjunto para hacer frente a una subida o bajada del embalse. En estos casos hay que disponer una capa capaz de resistir esfuerzos similares a los indicados en la figura 2, cuya magnitud depende de la resistencia del hielo y del espesor de la costra que pueda formarse.

2.5. Durabilidad y mantenimiento

En ciertos casos estos factores pueden ser de importancia. La durabilidad del revestimiento de impermeabilización, en general es función de la naturaleza, de sus propiedades y de su capacidad para hacer frente a determinados agentes agresivos de tipo físico-químico.

Particular interés puede tener la facilidad de mantenimiento y reparación, ya que en caso de avería, y por razones económicas, no siempre es posible bajar el agua del embalse para efectuar los trabajos oportunos o no se dispone del tiempo necesario para ello.

3. ESTUDIO DE BASES DRENANTES

Ya se ha comentado anteriormente que en algunos casos resulta conveniente disponer en el trasdós de las capas o láminas de impermeabilización una capa drenante para hacer frente a la subpresión del agua, del aire o del vapor de agua.

En lo que sigue a continuación se recogen una serie de consideraciones para proyectar estas bases drenantes con suficiente capacidad de evacuación para eliminar, por gravedad, el agua que pueda filtrarse a través del propio sistema de impermeabilización. No se contempla la evacuación del agua procedente del terreno, que requiere un estudio particular para cada caso concreto, y que puede implicar la evacuación de caudales más importantes.

Admitiremos que la filtración por la lámina de impermeabilización es la admitida internacionalmente de 0,1 l / Ha.seg. por cada metro de carga de agua, lo que equivale a un caudal unitario por metro cuadrado de superficie:

$$q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{seg}} \right) = 10^{-8} \cdot H(\text{m})$$

siendo H la carga hidráulica expresada en metros.

3.1. Base drenante horizontal

Imaginemos una base drenante horizontal de espesor e (m.) y constituida por un

material de permeabilidad K (m/seg.).

Consideremos en primer lugar que el desagüe es perimetral, según un círculo de radio R (Figura 3).

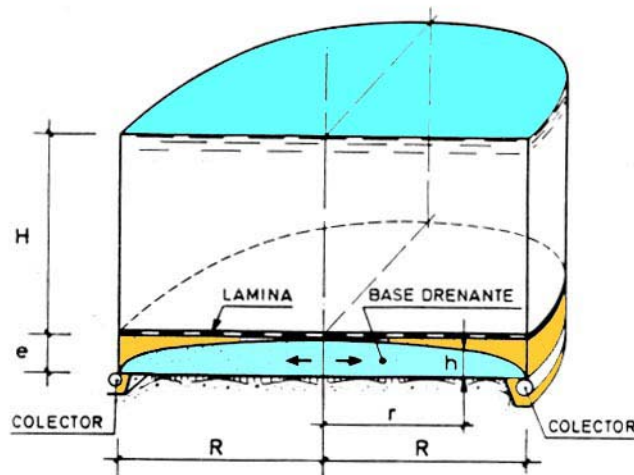


Figura 3. — Base drenante horizontal con colector circunferencial.

En esta hipótesis se establecerá una circulación de agua radial y centrífuga dentro de la base drenante, debiendo cumplirse que el caudal que atraviesa la superficie cilíndrica de radio r ha de ser igual a la filtración dentro de la misma, es decir:

$$[1] \quad Q_r \left(\frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \right) = (2\pi r h) \cdot K \cdot i = (\pi r^2) \cdot 10^{-8} \cdot H$$

siendo h el espesor de agua dentro de la base drenante.

El gradiente hidráulico vale $i = -dh/dr$ con lo que sustituyendo [1] se obtiene:

$$[2] \quad r \cdot dr = \left(- \frac{2 \cdot 10^8 \cdot K}{H} \right) \cdot h \cdot dh$$

Integrando esta ecuación y admitiendo que en el centro la capa está saturada, es decir $h = e$ para $r = 0$, se obtiene:

[3]

$$r^2 = \frac{2 \cdot 10^8 \cdot K}{H} \cdot (e^2 - h^2)$$

Si el desagüe perimetral se encuentra a la distancia $r = R$, haciendo en este punto, $h=0$, se deduce:

[4]

$$R = e \sqrt{\frac{2 \cdot 10^8 \cdot K}{H}}$$

En esta expresión:

R = Radio máximo de evacuación por gravedad en metros.

e = Espesor de la base drenante en metros.

H = Carga hidráulica en metros.

K = Coeficiente de permeabilidad de la capa en m/seg.

Puede comprobarse que en el borde de evacuación, $r = R$, el gradiente hidráulico $i = \infty$, ya que la curva de alturas de agua h tiene forma de elipse.

A título de ejemplo/si $e = 0,10$ m. y la base drenante es un hormigón poroso de permeabilidad, $K = 10^{-4}$ m/seg., resulta $R=4.50$ m. Si la base fuera de grava con permeabilidad $K = 10^{-2}$ m/seg., $R = 44,7$ m.

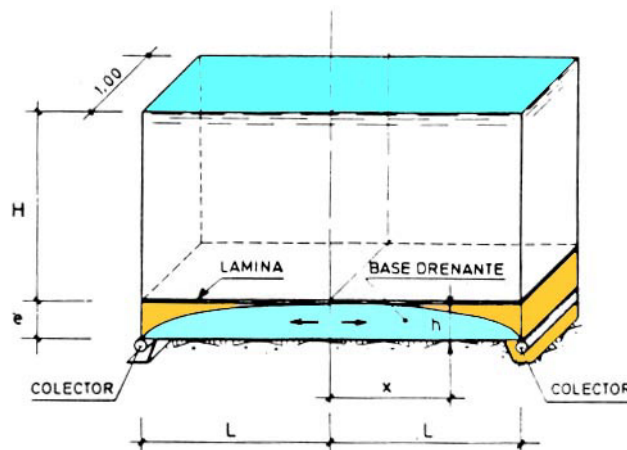


Figura 4. — Base drenante horizontal con colectores paralelos.

Consideramos en segundo lugar (Fig. 4), que la base drenante tiene dos colectores paralelos situados a una distancia $2L$. En este caso se establecerá un flujo bidimensional, debiendo cumplirse, de manera análoga al caso anterior, para una rebanada de 1 m. de ancho.

$$[5] \quad Q_x \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m} \cdot \text{seg}} \right) = h \cdot K \cdot i = x \cdot 10^{-8} \cdot H$$

Procediendo a la integración, y estableciendo las condiciones en los bordes, se obtiene:

$$[6] \quad L = e \sqrt{\frac{10^8 \cdot K}{H}}$$

expresión análoga a la [4], que proporciona la distancia máxima de evacuación hacia un colector longitudinal.

Cuando los colectores de desagüe de la base drenante se sitúan a mayor distancia que las determinadas por las expresiones [4] ó [6], la capacidad de desagüe por gravedad únicamente se mantiene en los bordes, entrando el agua en carga dentro del dren fuera de esas zonas. El régimen de circulación de agua obedece a otro modelo matemático, ya que los caudales de filtración varían de un punto a otro, en función de la carga efectiva de agua sobre la lámina de impermeabilización.

3.2. Base drenante inclinada (Problema plano)

A continuación se contempla otra disposición en la que la base drenante tiene pendiente hacia un borde, según se indica en la figura 5.

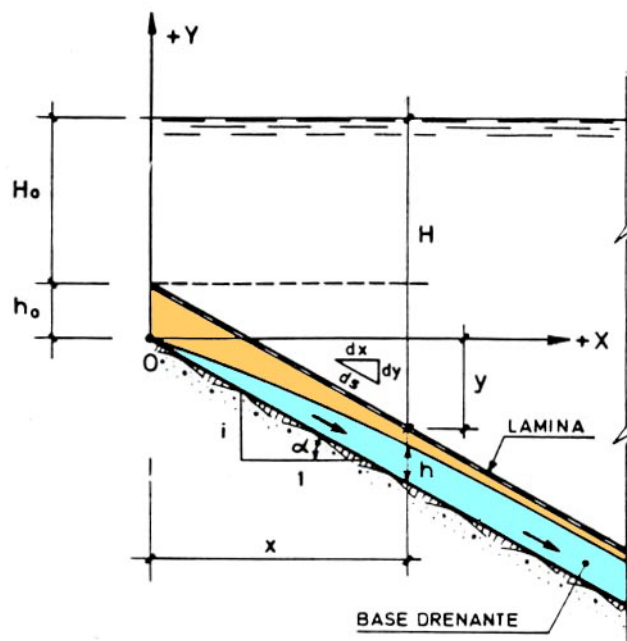


Figura 5.— Base drenante inclinada. Problema plano.

El planteamiento del problema es el siguiente:

Carga de agua: $H = H_0 + i \cdot x$

Filtración elemental:

$$df = \frac{H}{10^8} \cdot ds = \frac{H}{10^8} \cdot \frac{dx}{\cos \alpha}$$

Filtración hasta la distancia x:

$$[7] \quad f_x = \int_0^x df = \frac{1}{2 \cdot 10^8 \cdot \cos \alpha} (2H_0 \cdot x + i \cdot x^2)$$

Suponiendo que la lámina de agua circulando por la capa drenante venga definida por las coordenadas x, y, el caudal en circulación valdrá:

$$[8] \quad q_x = (y + i \cdot x) \cdot K \cdot \left(-\frac{dy}{dx} \right)$$

Igualando las expresiones [7] y [8], se obtiene:

$$[9] \quad (y + i \cdot x) \frac{dy}{dx} = - \left(\frac{1}{2 \cdot 10^8 \cdot K \cdot \cos \alpha} \right) (2H_0 \cdot x + i \cdot x^2)$$

La ecuación diferencial [9] no tiene (que sepamos) solución analítica, pero integrada por procedimientos numéricos (método de Runge-Kutta) se obtiene una lámina de agua como la representada en la figura 6, cuyo calado depende de la situación del punto de evacuación de las filtraciones.

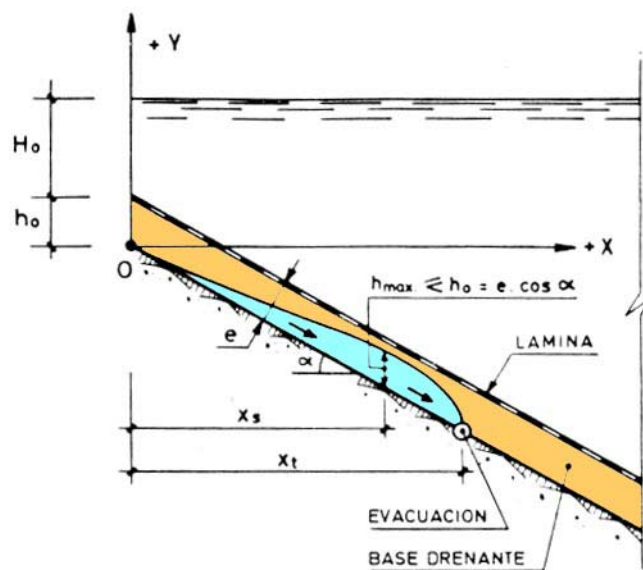


Figura 6. – Base drenante inclinada. Forma de la lámina de agua.

Para que la base drenante no entre en carga, el calado $(y + ix)$ tendrá que ser, como máximo, igual al espesor vertical de dicha capa $h_0 = e/\cos\alpha$. En este punto, además, el gradiente hidráulico (dy/dx) deberá ser igual a $-i$. Sustituyendo estos valores en la expresión [9], puede obtenerse la abscisa X_s de dicho punto, que resulta:

[10]

$$X_s = -\frac{H_0}{i} + \sqrt{\left(\frac{H_0}{i}\right)^2 + e \cdot 2 \cdot 10^8 \cdot K}$$

La abscisa máxima X_t del tramo, para un determinado espesor de la capa drenante, puede calcularse en ordenador, mediante un programa que integre la ecuación diferencial.

A efectos prácticos, puede ser suficiente disponer los puntos de evacuación a la abscisa X_s anteriormente calculada [10], con lo que se dispondrá de un cierto margen de seguridad.

En el caso de Taludes (Fig. 7), la carga de agua en el origen es nula ($H_0 = 0$), simplificándose la expresión [10].

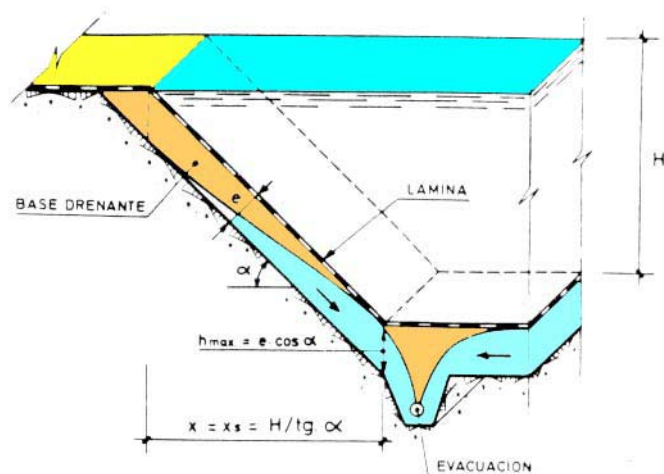


Figura 7. – Base drenante en talud plano con punto de saturación en el pie.

En este caso resulta más práctico deducir el espesor necesario de base drenante en función de la proyección horizontal del talud X , obteniéndose:

[11]

$$e = \frac{1}{2 \cdot 10^8 \cdot K} \cdot x^2$$

siendo:

e = espesor de la base drenante (sección normal) en metros.

K = permeabilidad de la base drenante en m/seg.

X= proyección horizontal del talud en m.

i = pendiente de la base drenante = H/X.

La expresión [11] está del lado de la seguridad, si al pie del talud se encuentra el punto de evacuación.

A título de ejemplo, en la Tabla 1 recogemos a continuación algunos valores de la expresión [11], suponiendo que la base drenante está constituida por hormigón poroso, de permeabilidad $K = 10^{-4}$ m/seg.

TABLA 1
Espesores del hormigón poroso en taludes ($K = 10^{-4}$ m/seg)

Pendiente del talud	MÁXIMA CARGA DE AGUA $H = X \cdot i$		
	10 metros	20 metros	30 metros
1/3	4,5 cm	18,0 cm	40,5 cm
1/2	2,0 cm	8,0 cm	18,0 cm
1/1	0,5 cm	2,0 cm	4,5 cm

Para fondos de embalse o de depósitos con pendientes suaves, recogemos en las Tablas 2 y 3 algunos valores de la longitud máxima del tramo hasta el punto de evacuación, para que no entre en carga la capa drenante.

En estos cuadros puede apreciarse la importancia de la pendiente «i», pero sobre todo la de la permeabilidad de la capa drenante, resultando aconsejable disponer bases de grava para no tener que multiplicar los puntos de evacuación.

TABLA 2
Longitud horizontal máxima de tramo en metros
Con hormigón poroso ($k = 10^{-4}$ m/seg)

Carga de agua en origen H_0 (m)	Espesor e (m)	PENDIENTE DE LA BASE DRENANTE			
		i = 0,00	i = 0,05	i = 0,10	i = 0,15
10	0,1	3,16	7,32	11,47	15,23
	0,2	6,32	14,48	22,07	28,33
	0,3	9,48	21,48	31,98	40,03
20	0,1	2,24	4,31	6,49	8,66
	0,2	4,48	8,59	12,83	16,91
	0,3	6,72	12,85	19,04	24,81
30	0,1	1,83	3,20	4,66	6,14
	0,2	3,66	6,39	9,26	12,13
	0,3	5,49	9,58	13,82	18,00

TABLA 3
Longitud horizontal máxima de tramo en metros
con base de grava ($k = 10^{-2}$ m/seg)

Carga de agua en origen H_0 (m)	Espesor e (m)	PENDIENTE DE LA BASE DRENANTE			
		i = 0,00	i = 0,05	i = 0,10	i = 0,15
10	0,1	31,6	297,5	362,8	388,8
	0,2	63,2	447,5	548,6	575,3
	0,3	94,8	620,1	693,0	719,5
20	0,1	22,4	207,3	294,4	336,6
	0,2	44,8	362,1	471,7	519,1
	0,3	67,2	491,6	611,9	661,4
30	0,1	18,3	155,2	242,9	293,1
	0,2	36,6	285,0	408,2	469,4
	0,3	54,9	399,0	542,4	608,7

En la figura 8 se recogen los resultados del cálculo efectuado en ordenador, para un

caso particular de base drenante.

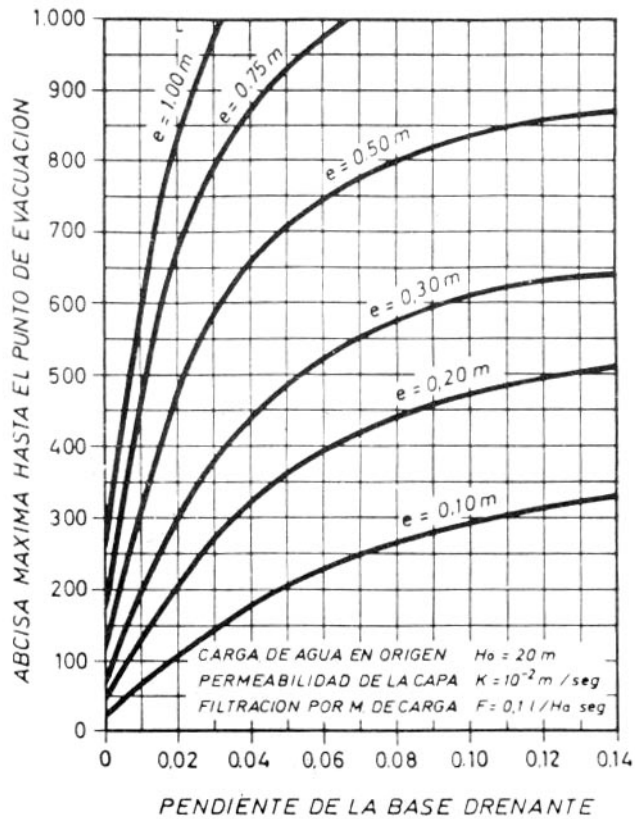


Figura 8. — Condiciones de evacuación por gravedad de una capa de grava como base drenante en un caso particular.

3.3. Base drenante inclinada (Superficie cónica)

Cuando en lugar de taludes planos se trata de superficies de forma cónica (zonas de acuerdo o antiguos cráteres aprovechados como vasos de embalse), el espesor de base drenante resulta mayor en función de los radios de curvatura. El planteamiento matemático es un poco más complejo (Fig. 9)

Caudal en circulación

$$[13] \quad q_x = (R - x)d\theta \cdot (y + ix) \cdot K \cdot \left(-\frac{dy}{dx} \right)$$

Igualando las expresiones [12] y [13], se obtiene:

$$[14] \quad (y + ix) \frac{dy}{dx} = - \left(\frac{1}{6 \cdot 10^8 \cdot K \cdot \cos \alpha} \right) \cdot \left(\frac{6 \cdot H_0 \cdot R \cdot x + 3(iR - H_0)x^2 - 2ix^3}{R - x} \right)$$

Esta ecuación se transforma en la [9] cuando R tiende a infinito.

La abscisa del punto de saturación se obtendría haciendo en la ecuación anterior

$$(y + ix) = e / \cos \alpha \quad \text{y} \quad dy/dx = -i$$

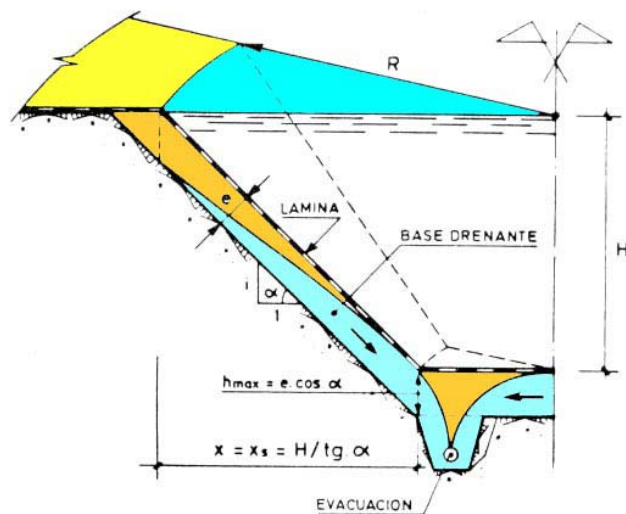


Figura 10. — Base drenante en talud cónico con punto de saturación en el pie.

En caso de taludes (Fig. 10), la carga de agua en origen es nula ($H_0=0$) simplificándose la expresión [14], pudiendo obtenerse una expresión similar a la [11] que da el espesor de la base drenante en función de la proyección horizontal del talud X.

$$e = \frac{1}{6 \cdot 10^8 \cdot K} \cdot \frac{3R - 2x}{R - X} \cdot x^2$$

Esta expresión queda del lado de la seguridad cuando al pie del talud se sitúa el punto de evacuación. Un cálculo más afinado hay que hacerlo en ordenador.

4. FINAL

Esperamos que las ideas expuestas en el presente trabajo puedan ser de utilidad a aquellas personas que tengan que abordar la concepción y diseño de Sistemas de Impermeabilización Superficial de Vasos de Embalse, problema que, aunque sencillo, se encuentra por ahora poco tratado en la bibliografía.