

Influencia del drenaje subterráneo en el comportamiento estructural de las carreteras^(*)

Por Ignacio MORILLA ABAD

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Tan importante para el comportamiento estructural de las carreteras es el drenaje superficial como el drenaje subterráneo, si bien no siempre se presta a este la misma consideración en el proyecto y ejecución de pavimentos. En el artículo se estudia el cálculo del drenaje, disposiciones constructivas, control de calidad y conservación del drenaje subterráneo.

1. INTRODUCCION

1.1. El drenaje subterráneo en los proyectos

Es muy frecuente ver en los proyectos de carreteras que el capítulo de drenaje trata, exclusivamente, o casi en su totalidad, del «drenaje superficial» que en realidad debería llamarse «desagüe y conducción de aguas superficiales», «encauzamiento del agua superficial» o algo similar y se ocupa muy poco del drenaje subterráneo. Además, el llamado «drenaje superficial» está acompañado por cálculos de caudales, escorrentías, ondas de avenidas en cauces transversales, cálculos y dimensionamiento de tubos, cunetas, pontones, marcos, etc., mientras que el drenaje subterráneo es poco frecuente que vaya acompañado de cálculos de caudales de infiltración, caudales en los medios porosos, dimensionamiento de zanjas filtrantes, cálculo de tubos, etc.

Así pues, se da la paradoja de que una unidad esencial para la vida del firme, como es el drenaje subterráneo, tiene muy poca importancia relativa en los cálculos generales de la carretera, cuando además el presupuesto de esta unidad resulta muy bajo en comparación con el presupuesto general de la obra.

Cuando se comparan los costes de varios proyectos de firme es importante tener en cuenta

no solamente el coste inicial y el mantenimiento rutinario, sino también los costes de refuerzo y reparación durante la vida de la carretera. Esto último no se hace normalmente.

La inclusión de sistemas eficaces de drenaje subterráneo encarecen ligeramente el coste total, y, por ello, algunas veces no se incluyen en el proyecto y se tiene solamente en cuenta el drenaje superficial. A pesar de esto, el coste total de un pavimento mal drenado puede ser más de dos veces el de un pavimento con buen drenaje, y la omisión de éste puede suponer en la mayoría de los casos un acortamiento de la vida de la carretera y una mayor cantidad de costes de reparación.

Este concepto de «coste total» debe ser modificado, a nuestro juicio, haciendo intervenir más factores de los habituales y dando más importancia a aquellas unidades de obra que puedan alargar la vida de la carretera o aumentar su nivel de servicio como es el caso de un buen drenaje subterráneo.

La estimación del coste total debería hacerse mediante una fórmula similar a la que proponemos:

$$CT = \frac{CP + CE + CC + CR + CU + CS}{\sum AV \cdot NS}$$

en las que:

CT = COSTE TOTAL (Relativo entre varias soluciones).

CP = COSTES DEL PROYECTO

CE = COSTES DE LA EXPROPIACIONES

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de agosto de 1988.

- CC = COSTES DE LA CONSTRUCCION
- CR = COSTES DE CONSERVACION PREVENTIVA Y DE REPARACIONES
- CU = COSTES DE UTILIZACION (Consumos, Tiempos, Tráfico generado).
- CS = COSTES SOCIALES (Generación o deterioro de riqueza en la zona, modificaciones hidrológicas, pérdida de suelo agrícola, generación de turismo).
- AV = AÑOS DE VIDA UTIL
- NS = NIVEL DE SERVICIO DE CADA AÑO

Es evidente, que si un adecuado sistema de drenaje subterráneo alarga la vida útil y el nivel de servicio de una carretera, disminuye el coste total, aunque aumente ligeramente el coste de construcción.

En los métodos de cálculo de la sección transversal de una carretera se emplean parámetros de caracterización de las diferentes capas que no tienen en cuenta de una manera completa el efecto del agua.

Los métodos normales de proyecto de sección estructural de carreteras tienen en cuenta tensión, deformaciones, cambios de volumen y fatiga bajo cargas repetidas, pero ignoran los efectos dinámicos del exceso de agua que pueden ser más importantes que el resto de los factores. La erosión entre un pavimento superficial y su base puede ocurrir independientemente del espesor o rigidez de las capas.

Por ejemplo, se usa el CBR para caracterizar la explanada o la subbase, pero este ensayo que indica la capacidad portante, o la resistencia a las cargas, aunque se hace en estado de saturación del terreno, no tiene en cuenta los efectos dinámicos, ni las alternancias de humedad-sequedad.

Lo mismo puede decirse del ensayo de placa de carga, que frecuentemente no se correlaciona con la humedad del terreno, y puede inducir a errores importantes por este motivo. Al ser un ensayo estático por su lenta velocidad de carga, tampoco tiene en cuenta los efectos dinámicos.

Los cálculos estructurales de las capas del firme se basan en la determinación de módulos de deformación, resistencias a compresión, flexión o tracción, todos ellos parámetros influidos

por la humedad o grado de saturación de las capas de aglomerado asfáltico o de la gravacemento.

Los parámetros de cálculo se basan en ensayos incorrectos en la mayoría de las veces, pues hay que buscar un equilibrio entre capacidad portante y drenabilidad, evitando que la determinación de la primera quede influida por la presencia continua de agua por fallar la segunda.

Durante los primeros proyectos de John McAdam ya se sabía qué bases abiertas proporcionaban un buen drenaje, aunque no se construyeron todas ellas en las debidas condiciones. Cuando se colocaron de forma correcta su comportamiento fue excelente, sin embargo, cuando no se dispusieron tongadas anticontaminantes, la arcilla o el limo de las capas subyacentes colmató estas bases abiertas, deteriorándose el pavimento por falta de drenaje.

A causa del mal comportamiento de las bases abiertas se pasó, en movimiento pendular, a las bases bien graduadas y cerradas, y por miedo a que los drenes se colatasen por filtraciones a través de las bases, se colocaron bases con muchos finos, con lo cual no drenaban lo suficiente y no ejercían efecto benéfico alguno sobre los pavimentos suprayacentes.

Durante mucho tiempo las principales características de las capas de los proyectos de firmes eran la densidad y la estabilidad más que la drenabilidad.

Los proyectos se basaban en la resistencia y capacidad portante de las subbases en condiciones de saturación (pero sin evaluar los efectos dinámicos de las cargas sobre el agua libre intersticial), y se suponía que el drenaje no era importante, o bien que actuaba correctamente.

Aunque se sabían las virtudes del drenaje, cuando las condiciones del proyecto empeoraban, se construían bases más fuertes, más gruesas o de mejor calidad, en lugar de mejorar la drenabilidad del terreno.

Muchos proyectistas preconizan que no es ni práctico, ni económico y quizás ni necesario eliminar el agua rápidamente de las secciones estructurales, y por lo tanto, las bases y subbases actualmente en uso son muy poco permeables. Además, los materiales utilizados en arcenes en muchos casos, actúan como barre-

ras o presas que impiden el movimiento lateral del agua.

El uso de materiales pobremente drenantes en arcenes, o bien el uso de una sucesión de capas igual a la calzada, pero de menor espesor hacen que la calzada esté trabajando mucho tiempo en estado sumergido, con el consiguiente peligro de deterioro. Afortunadamente, son cada vez más frecuentes los firmes drenantes.

1.2. Desequilibrio entre la importancia del drenaje y la utilización de datos para su cálculo.

El deterioro del pavimento y las diferentes capas de la explanada está directamente relacionado con la permanencia del agua en la sección estructural, sin embargo, el proceso de cálculo deja mucho que desear en la mayoría de los casos.

Se calcula perfectamente el agua de lluvia que cae sobre la carretera, la capacidad de cunetas y tubos de desagüe y la recogida de todas las aguas superficiales de la explanación, pero no se calcula con exactitud el grado de infiltración en las diferentes capas, estimándose muy deficientemente los caudales de entrada a cada una de ellas. Todavía suele ser más inexacto el cálculo del flujo a través de cada medio poroso (bases o subbases) pues los parámetros que intervienen en la ley de Darcy: permeabilidad, gradiente hidráulico y sección de flujo se calculan muy someramente o se estiman con grandes errores, sobre todo, la permeabilidad, que es variable con la carga hidráulica y con el grado de compactación. Por último, es muy poco frecuente ver un cálculo relacionado con el tiempo de permanencia del agua en el firme o bien, una estimación de los periodos de tiempo en los que las diferentes capas se encuentran saturadas.

¿Por qué se da esta situación anómala?. Probablemente porque los problemas de las aguas superficiales se detectan durante la construcción o pueden ponerse de manifiesto mediante sondeos, observación de cauces, etc. Por el contrario, las aguas de filtración manifiestan su acción después de que el pavimento está construido y además lo hacen de una manera menos observable, y no necesariamente de una forma instantánea.

Aunque el agua superficial puede acortar la vida del firme a la mitad de la prevista, cuando hay mal drenaje, durante los primeros años sus efectos pueden pasar inadvertidos. El único indicio puede ser manchas cerca de juntas o grietas, o la aparición de pequeñas grietas. Muchas veces el agua sale entre el pavimento de la calzada y el arcén forzada por el tráfico y un efecto artesiano.

Cuando el agua sale entre arcén y calzada es porque entre las capas de firme y base hay un espacio de cavidades y poros, lleno de agua, que pone a la carretera como si estuviera sumergida. Muchas de las bases construidas tienen una capacidad de desagüe anual inferior a la lluvia infiltrada que reciben en un año, por lo que puede afirmarse que están una gran parte del tiempo en condiciones de exceso de agua, independientemente de que estén situadas en desmonte o terraplén.

2. EL DETERIORO DE LA ESTRUCTURA DE LA CARRETERA POR EFECTO DEL AGUA

2.1. Panorama histórico

Los romanos conocían el efecto destructivo del agua y preservaban el firme de losas de piedra del contacto con la subbase mediante la interposición de una capa de arena.

Durante los veinte siglos posteriores hasta el XIX, se hicieron pocos progresos. En este siglo destacaron las ideas de Tresaguet, Metcalf, Telford y MacAdam, sobre todo, éste último, que destacó la importancia de mantener seco el firme atribuyendo al mal drenaje el estado defectuoso de las carreteras de Gran Bretaña.

En 1910, H. Host decía en su libro «The art of Roadmaking»: «Una carretera sobre un fondo húmedo será siempre defectuosa y cara de mantener, y es económico gastar dinero en hacer un drenaje del subsuelo tan perfecto como se pueda».

Desde 1910 a 1940 se dió gran importancia al drenaje, pero con la llegada de los métodos de cálculo racionales que tenían en cuenta la capacidad portante de bases y subbases saturadas mediante ensayos en Laboratorio, se fue

dando más importancia a la estabilidad y a la densidad que a la drenabilidad.

Cuando se han utilizado ensayos de capacidad portante sobre suelos saturados se han olvidado frecuentemente otros fenómenos, como: capilaridad, evaporación, hielo y efectos hidrodinámicos.

Los modernos proyectos de pavimentos basados en el ensayo CBR o similares, aseguran un espesor suficiente para evitar tensiones excesivas en las subbases, sin embargo, los daños más importantes en los firmes, causados por el agua, son independientes del espesor y la resistencia de la base utilizada.

Aunque muchos investigadores relativamente recientes no han dado importancia al agua de filtración superficial. Finn (1962) opina que debe introducirse en el cálculo un factor que tenga en cuenta los períodos críticos del pavimento, asociados a las lluvias. Igualmente se pronuncia el HRB en 1968, y por último, Finney en 1973 dice que se debe tener en cuenta de algún modo de susceptibilidad de la subbase a los cambios de volumen, hielo, humedad, etc. y su influencia en la capacidad portante.

Muchos de los pavimentos construidos recientemente son firmes multicapa, tales como, las losas de hormigón sobre bases estabilizadas o no; y aglomerados asfálticos sobre bases con o sin estabilización, o sobre grava-cemento. Estos firmes, que generalmente no están proyectados para un sistema adecuado de eliminación de agua, tienen dentro de sí la causa de su propia destrucción.

Hoy día se conoce con bastante exactitud el proceso de deterioro de los firmes y capas de explanada por efecto de la saturación, gracias al empleo de modernas máquinas de ensayo de ciclos repetidos programables y de efecto dinámico, por lo que se está en condiciones de proyectar firmes que equilibren las dos cualidades básicas de resistencia a las cargas y drenabilidad.

2.2. El mecanismo del deterioro de la estructura de la carretera

La causa general del deterioro de los pavimentos es muy compleja e intervienen multitud de factores como la oxidación del asfalto, la fatiga

de pavimentos flexibles y rígidos, hielo y deshielo, tensiones, deformaciones, etc., pero todas ellas o por lo menos una gran mayoría, resultan incrementadas por la acción del agua.

Algunas de las acciones más dañinas para los firmes se desarrollan en el interior de su sección estructural, y están relacionadas con el comportamiento de su infraestructura, sobre todo, de las bases y subbases.

Cuando se incrementa el contenido de agua de bases y subbases hay una reducción en la capacidad portante y un aumento del grado de deteriorabilidad del firme.

Cuando el agua libre rellena completamente los huecos de las capas o el espacio entre ellas, las cargas de tráfico aplicadas sobre el firme producen impactos sobre el agua comparables al efecto de una prensa hidráulica. Las presiones pulsátiles del agua, no sólo causan erosión y expulsión de material fuera de los pavimentos, sino que separan las capas de asfalto de las de grava-cemento o bases estabilizadas. La acción del agua puede desintegrar las capas estabilizadas con cemento, debilitar las bases granulares por readaptación de los finos, sobrecargar subbases de espesor inadecuado y causar diversos tipos de deterioros.

Cuando el agua libre rellena completamente los huecos, la «flotabilidad» de las capas sobresaturadas convierte el peso real en peso sumergido, reduciendo por consiguiente el coeficiente de rozamiento.

El agua libre es el medio erosionador del material entre los pavimentos y las bases tanto estabilizadas como naturales, y al favorecer la expulsión del material por «bombeo» a través de juntas y grietas, conduce gradualmente a agrietamiento y posterior fallo del pavimento de hormigón o de aglomerado asfáltico.

El agua libre en los firmes de aglomerado contribuye al agrietamiento por retracción, a la oxidación y a la pérdida de flexibilidad, fase inicial del fallo del pavimento.

El agua libre sirve de vehículo a los finos arcillosos que al introducirse en las grietas de los firmes de aglomerado impiden al autocierre de las mismas.

La presencia de agua libre permite la acción

del hielo, con la consiguiente aparición de roturas en firmes de hormigón.

En pavimento de hormigón son muy frecuentes las grietas y roturas de esquina. Este proceso de rotura se atribuye, entre otras causas, a las tensiones originadas por el hielo en las bases granulares sobresaturadas. La humedad puede llegar a ellas, en principio, por las juntas. El único remedio es un buen drenaje de la base.

Algunos deterioros de firmes se deben a la velocidad de circulación del agua a través de la estructura del pavimento, por lo que, se puede estimar el grado de daño que pueden producir estas aguas, aplicándoles las leyes hidráulicas para conducciones cerradas, que dicen que la velocidad varía con la raíz cuadrada de la sección. Por ello, en pavimentos nuevos los conductos por los que circula el agua libre son relativamente pequeños y la velocidad erosiva del agua pequeña, pero a medida que se agrandan, los deterioros crecen con el tiempo según la raíz cuadrada de la sección teórica. Parece ser que ésta puede ser la causa entre otras de que algunos pavimentos funcionen relativamente bien hasta los 7 u 8 años, y se destruyan casi por completo a los 15 ó 16 años.

La erosión y los daños por presiones intersticiales no pueden tener lugar en ausencia de agua libre, por ello, hay razón para creer que los firmes bien proyectados y bien drenados pueden soportar las cargas de tráfico casi indefinidamente con una conservación normal, mientras que los firmes no drenados requieren grandes inversiones para reparación antes de que hayan alcanzado el término de vida previsto.

Se han efectuado diversos experimentos para evaluar la influencia de las cargas con exceso de agua, y se ha visto que durante los periodos en que esto ocurría, el grado de deterioro de la carretera variaba de 10 a 20 veces, hasta 1.000 veces más que cuando no existía agua libre o se encontraba en pequeña cantidad.

Como resumen de todo lo anterior puede decirse que las acciones dinámicas provocadas por las cargas de tráfico producen en las capas saturadas una decohesión brusca, si no hay movimiento del agua entre los poros y una erosión con arrastre de finos cuando hay posibilidad de movimiento intersticial del agua. En los casos

intermedios se producen arrastres y decohesiones, en grados variables; de ahí la importancia de eliminar el agua por drenaje en el menor tiempo posible.

2.3. El exceso de agua en las capas estructurales de la carretera y la disminución de la vida útil

Es conocido de todos que el grado de deterioro de una carretera aumenta considerablemente en los periodos lluviosos y en las zonas húmedas del trazado.

Por otra parte, es una utopía considerar a los pavimentos como impermeables, pues aunque aparentemente lo sean en su primer periodo de uso, se producen enseguida pequeñas fisuras, grietas, apertura de juntas, hay zonas más porosas superficialmente y sobre todo el agua puede acceder lateralmente por arcenes y medianas.

En carreteras de hormigón con exceso de agua suelen verse los arcenes manchados o húmedos como si saliese humedad desde la junta de calzada y arcén.

En pavimentos de aglomerado asfáltico, si éste es poroso, suelen verse finos arcillosos en la superficie que han subido por bombeo desde la subbase, o bien manchas blancas procedentes de los finos de la grava-cemento.

En firmes de hormigón sobre bases muy saturadas pueden verse verdaderos chorros de agua que salen hacia arriba cuando pasan las cargas.

El mejor momento para observar los posibles excesos de agua libre en el pavimento es inmediatamente después de la lluvia, cuando el pavimento superficial empieza a secarse. En este momento puede verse la proyección de agua por las cargas, la salida por los bordes o las zonas donde la humedad permanece más tiempo debido a la existencia de agua en el interior.

Si se hiciera una correlación entre los métodos de valoración del estado estructural de la carretera (perfilómetro, deflectógrafo, aspecto superficial, deterioros, etc.) y el tipo de drenaje que hay en cada tramo de la carretera se cuantificaría el factor de intensidad de deterioro de la estructura de la carretera, o sea, el grado o velocidad de pérdida de resistencia y nivel de

servicio respecto a una situación normal en la que no hubiera saturación en ninguna de las capas.

Además de este factor de intensidad de daños que caracteriza una determinada carretera, es necesario saber cuánto tiempo se encuentra ésta con agua en exceso, o sin él, mediante piezómetros u observación superficial continua. En función del porcentaje de tiempo que una sección se encuentra con exceso de agua libre y sabiendo su factor de intensidad de daños, puede estimarse la vida útil de la misma comparada con la que tendría si tuviera un buen drenaje. Igualmente, la distribución anual de pérdida de servicio puede distribuirse en los meses del año con arreglo al factor de intensidad y su tiempo de actuación.

Los ensayos realizados en Estados Unidos para valorar este «factor de intensidad de deterioro» han demostrado que los daños eran del orden de 20 a 40 veces mayores en carreteras con capas saturadas que en carreteras o tramos de ensayo bien drenados. En algunos casos como el WASHO Road Test se obtuvieron valores de 70.000 como factor de daños y no eran infrecuentes valores de 60.

Representando en un gráfico como abscisas el número de años y en ordenadas el nivel de servicio, se obtiene una curva parabólica aproxima-

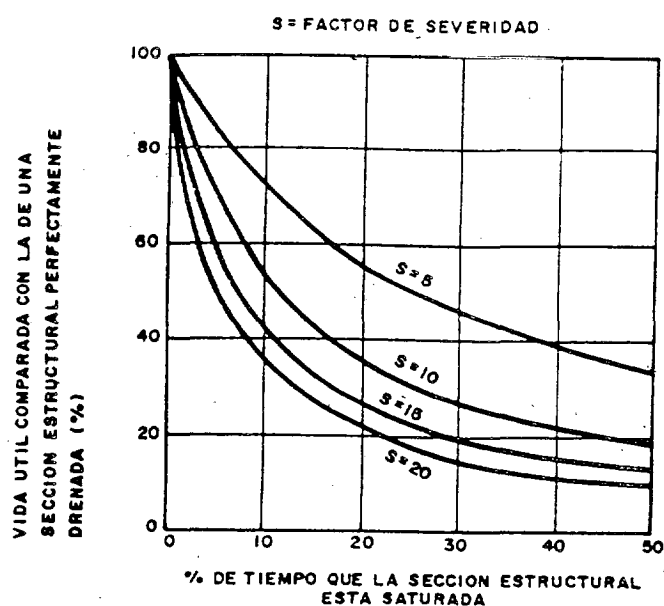


Figura 1.—Efecto del exceso de agua sobre la vida de los pavimentos.

damente que parte de la ordenada 100 por 100 con tangente horizontal y acaba con ordenada 0 por 100 al cabo del número de años de vida útil prevista en el proyecto. Si en los períodos húmedos se intercalan tramos parabólicos de mayor convexidad por estimar un factor de daños 5, 10, o más, la curva resultante corta al eje de abscisas en un número de años de vida útil considerablemente menor, todo ello suponiendo que el factor de deterioro es constante con el tiempo cuando se sabe que en la práctica aumenta con el tiempo, lo cual acortaría aún más la vida útil de la carretera (Fig. 1 a 7).

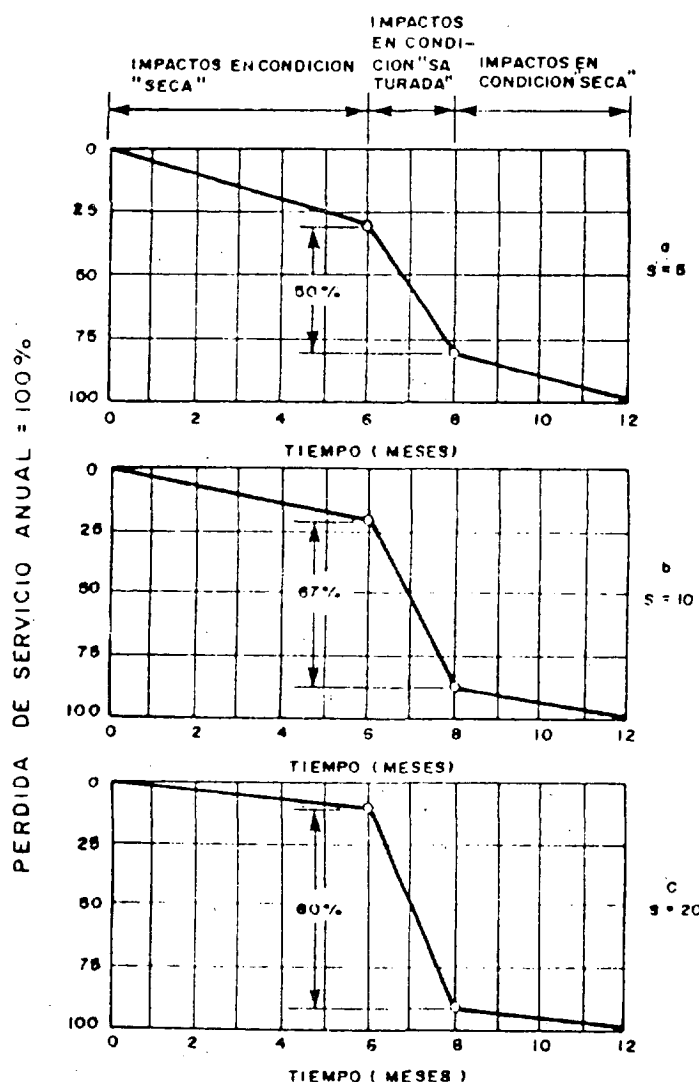


Figura 2.—Pérdida de servicio en los períodos en que la sección estructural está «saturada» y «seca» para S = 5, 10 y 20 (Factor de Severidad o deterioro).

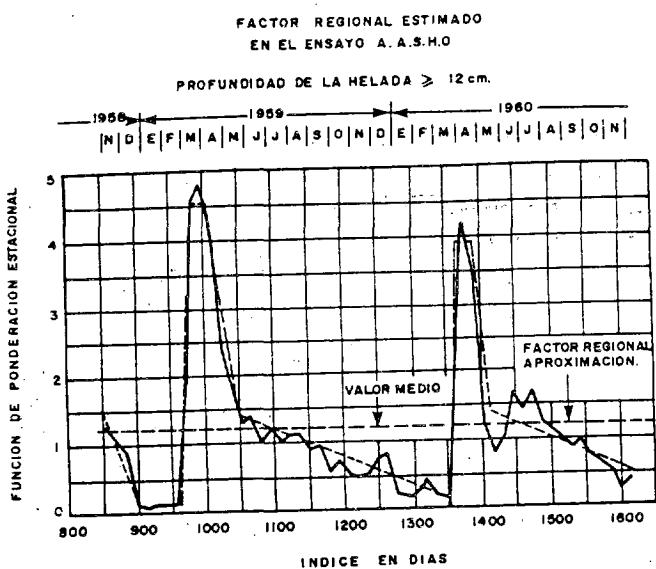


Figura 3.—Variaciones estacionales en la pérdida de servicio de pavimentos en el ensayo A.A.S.H.O. en función de un factor regional variable.

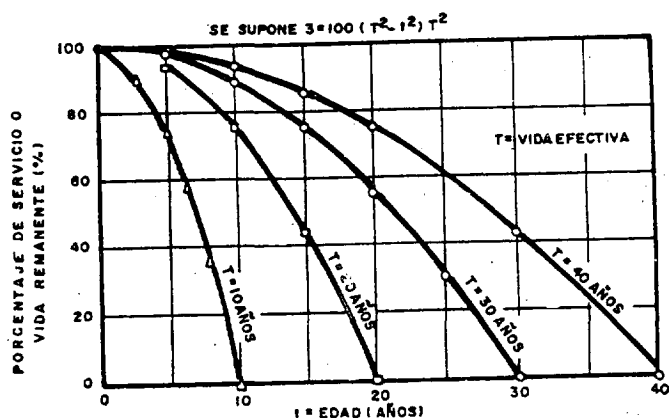


Figura 4.—Velocidad hipotética de pérdida de servicio de pavimentos para diferentes valores de la vida efectiva (supuesto que la velocidad de deterioro aumenta con el cuadrado del tiempo).

3. EL DISEÑO Y EL CALCULO DEL DRENAJE SUBTERRANEO

3.1. Consideraciones generales

Los efectos perjudiciales del agua en los pavimentos y en la infraestructura de la carretera pueden evitarse combinando la mayor impermeabilidad posible de la superficie con un adecuado sistema de drenaje subterráneo, pero nunca confiando exclusivamente en la impermeabilidad, ya que ésta es imposible de mantener con el tiempo.

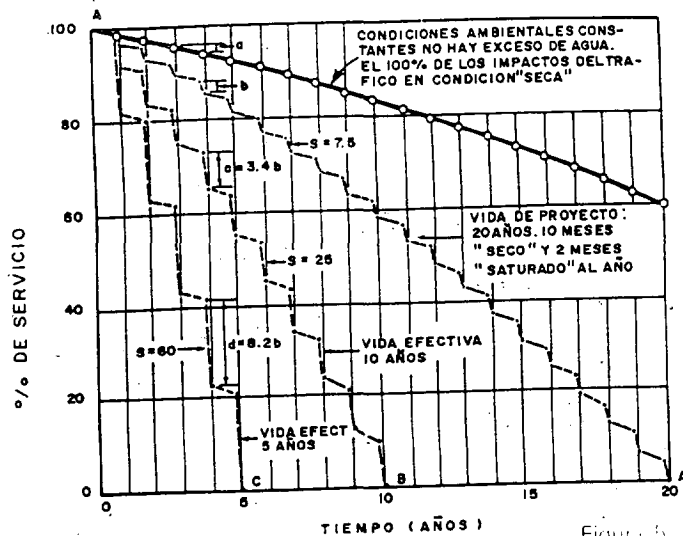


Figura 5

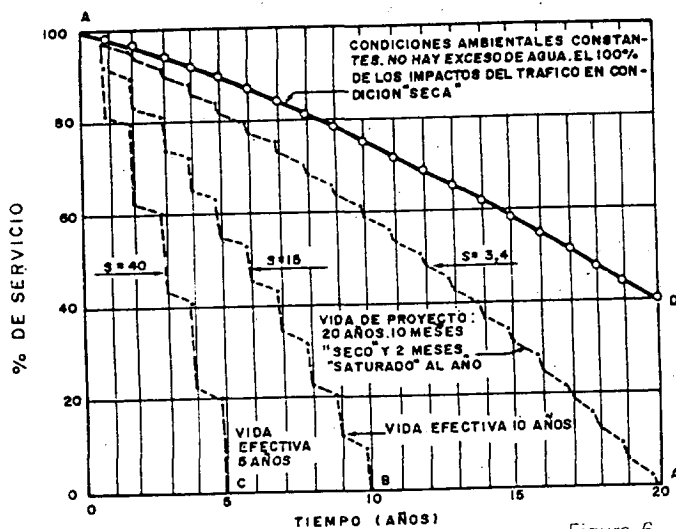


Figura 6.

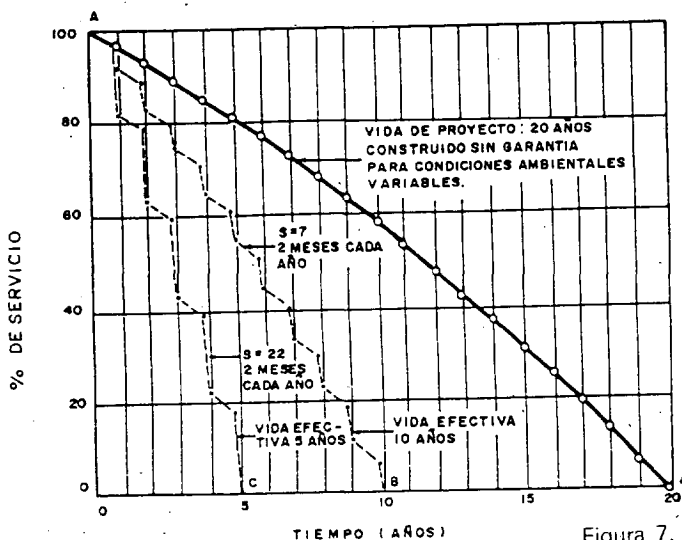


Figura 7.

En el campo de las presas de materiales sueltos, se considera esencial el control de las presiones intersticiales y el funcionamiento de las capas drenantes. Los cálculos de estabilidad, resistencia e impermeabilidad requieren cálculos muy precisos de redes de filtración, superficies equipotenciales, presiones intersticiales en cada punto y su variación con el tiempo y ensayos para determinar la permeabilidad, resistencia confinada, asentamientos, cohesión, ángulo de rozamiento, etc., todo ello encaminado al control del agua en el cuerpo de la presa. Estas obras de ingeniería, cuya misión es ser barreras de retención del agua, parten del hecho que no hay zona impermeable de forma absoluta, ni siquiera los núcleos arcillosos y por ello, se disponen drenes eficaces para controlar las posibles filtraciones. Con mucho más motivo hay que disponer drenes que funcionen en las carreteras, pues su misión principal no es la impermeabilidad, sino la resistencia a las cargas de tráfico.

Puesto que el agua no puede eliminarse de los pavimentos y es muy difícil evitar la filtración superficial y además está demostrado que el agua libre acorta la vida de los firmes, es esencial disponer un buen drenaje que elimine este agua. En el proyecto del drenaje deben usarse métodos racionales que estimen los caudales de filtración y de salida. Pero, aunque estas estimaciones no sean del todo correctas y solamente aproximadas, la adopción de un sistema de drenaje mejorará dos o tres veces más la carretera que si se hubiera hecho sin él, por lo que, la duración del pavimento será siempre mucho mayor.

La anchura de las modernas carreteras y sus dimensiones superficiales extensas constituyen un inconveniente para el drenaje.

A causa de sus dimensiones, los pavimentos son vulnerables a caudales de filtración de diversos tipos:

- a) Filtración hacia abajo a través de superficies porosas, grietas, etc.
- b) Filtración lateral a través de arcnos, cunetas, desmontes.
- c) Aumento de humedad por elevación de la capa freática.
- d) Acumulación de agua por capilaridad a partir de las capas inferiores.

e) Condensación de agua en determinadas condiciones atmosféricas.

Las filtraciones y acumulación de agua se ven favorecidas por estos fenómenos en los que el gradiente hidráulico es alto.

Por el contrario, a causa de las dimensiones de las capas drenantes y su poco espesor, los gradientes hidráulicos que actúan durante el drenaje son más bien pequeños, inferiores normalmente a 0,01 ó 0,02.

Cuando hay una diferencia apreciable entre los gradientes hidráulicos de salida y entrada, se produce una acumulación de agua y el pavimento funciona sumergido y con las capas saturadas.

Cuando se intenta estimar las permeabilidades de los materiales de drenaje, los proyectistas pueden equivocarse frecuentemente si dimensionan «a ojo», por experiencia de tipo general, por intuición o por empleo de prácticas anteriores.

En el proyecto de drenaje es necesario emplear cálculos racionales y procedimientos analíticos para calcular su funcionamiento.

La estimación de la permeabilidad debe proscribirse y determinarse por ensayos, ya que es una variable extremadamente amplia (desde 30 cm/seg para algunos macadams a 10^{-9} cm/seg para algunas arcillas).

Cuando además se incluye en los cálculos la otra variable, que es el gradiente hidráulico, las velocidades de filtración se mueven en un campo de 1 a 100 billones, o 1 trillón. Es pues impensable aplicar la intuición a variables tan amplias.

Además los diferentes tipos de materiales empleados en las carreteras varían notablemente la permeabilidad con el grado de compactación, lo que complica aún más la situación si no se hacen ensayos. En la gran mayoría de los casos de capas drenantes proyectadas sin ensayos ni cálculos racionales se han subestimado los caudales de infiltración y se han sobreestimado las capacidades drenantes de bases y subbases (Figs. 8, 9 y 10).

Por otra parte, la dirección de las líneas de corriente en las capas drenantes, es uno de los factores más importantes a considerar y uno de

INFLUENCIA DEL DRENAJE SUBTERRANEO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CARRETERAS

Coeficiente de Permeabilidad K en cm/sg (escala logarítmica) (según Casagrande y R.E. Fadum)

	10 ²	10 ¹	1,0	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje			Bueno				Malo		Prácticamente impermeable			
Tipo de suelo	Grava limpia		Arenas limpias, mezclas arenoso-gravosas limpias		Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena limosa y arcillas, depósitos glaciares, arcillas estratigráficas, etc.			Suelos: impermeables como arcillas homogéneas				
Suelos impermeables por efecto de la vegetación y la intemperie												
Determinación directa de K	Realizar test de permeabilidad, directamente en el emplazamiento a estudiar. Para obtener resultados fidélgicos se requiere mucha experiencia.											
	Obtener K mediante el permeámetro de carga constante. Se requiere poca experiencia.											
Determinación indirecta de K			Usar permeámetro de cargavaria-ble requiere poca experiencia		Con el permeámetro de carga de-creciente, se requiere mucha ex-periencia.			Con el permeámetro de carga decreciente se requiere bastante experiencia por lo que es medianamente fiable.				
		Obtener K a partir de la curva granulométrica. Sólo sirve para arenas y gravas poco cohesivas y limpias .						Obtener K a partir de ensayos de consolidación. Se requiere bastante experiencia.				

Figura 8.

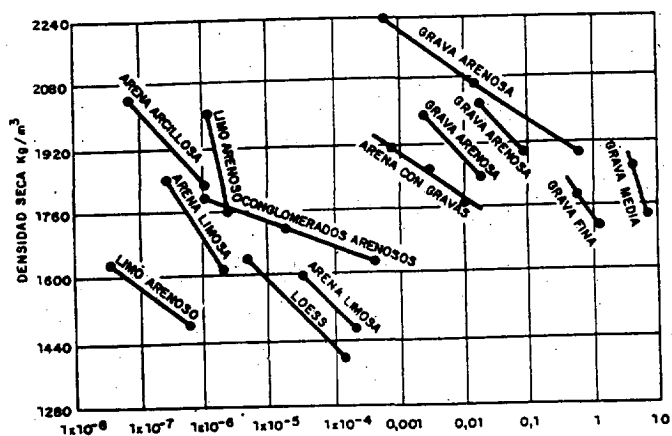


Figura 9.—Relación entre el coeficiente de permeabilidad, el tipo de suelo y la densidad (escala logarítmica).

los que más facilitan la salida del agua de los pavimentos.

Quando se construyen pavimentos con sub-bases de baja permeabilidad y drenes laterales, el agua que entra a la sección estructural tiene que recorrer una línea casi horizontal, con lo que la eficacia de los drenes es relativamente baja, a menos que los materiales tengan una gran permeabilidad, según se demuestra por la Ley de Darcy. La capacidad de drenaje es proporcional al gradiente hidráulico i y al espesor de la capa drenante A (sección unitaria), ambos muy pequeños en general; si además se

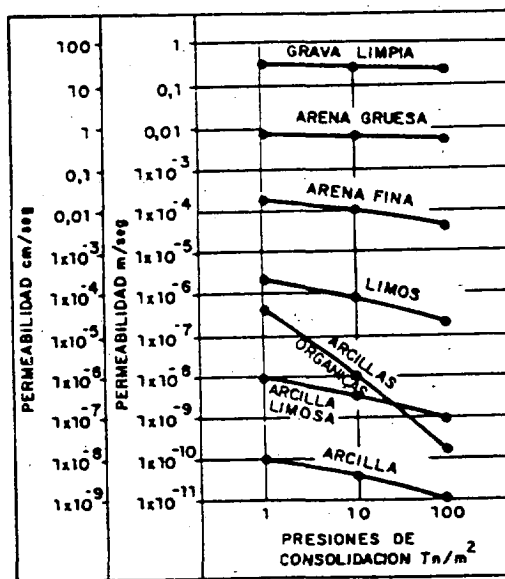


Figura 10.—Permeabilidades de los suelos bajo diferentes presiones de consolidación.

usan bases o subbases de baja permeabilidad, la restricción de caudal es muy grande.

3.2. Cálculo del drenaje subterráneo por métodos racionales

Aunque la Ley de Darcy para el movimiento laminar del agua en medios permeables se ha usado frecuentemente en presas, cimentacio-

nes, mecánica de suelos y agricultura, se ha usado muy raras veces en el cálculo de redes de drenaje para pavimentos.

La Ley de Darcy se aplica para movimientos no turbulentos. Cuando se dan condiciones de semiturbulencia o turbulencia, las pérdidas de carga no son proporcionales a la carga y las cantidades que expresan el caudal o la velocidad de flujo son menores que las que se obtienen por la fórmula de Darcy.

Las formas más comunes de la Ley de Darcy son:

$$Q = K \cdot i \cdot A$$

$$Q = V_d \cdot A$$

En las que:

K es la permeabilidad del medio poroso.

i el gradiente hidráulico.

A el área de la sección de drenaje.

V_d la velocidad de descarga.

Las leyes del flujo bidimensional obedecen a la ecuación de Laplace, siempre que se cumplan ciertas hipótesis como: el suelo es homogéneo, hay saturación, el suelo es incompresible, el flujo es laminar, la permeabilidad permanece constante, etc.

En los casos prácticos, pueden emplearse procedimientos matemáticos o analíticos pero es preferible simplificar y acudir a procedimientos gráficos o sencillos, ya que hay que tener en cuenta que la exactitud de la solución depende mucho de la exactitud de los datos empleados, entre ellos, la permeabilidad, cuya medida es muy problemática.

El objetivo que se busca con el drenaje es que las capas de carretera estén libres de saturación, por lo que se ha de cumplir que los caudales teóricos de salida sean mayores o iguales que los de entrada de agua o infiltraciones. O sea:

$$\Sigma Q_{\text{salida}} \geq \Sigma Q_{\text{entrada}}$$

$$Q_E + Q_L + Q_A + Q_G + Q_D \geq Q_S + Q_C + Q_T + Q_H$$

Siendo:

Q_E = Caudal de evaporación.

Q_L = Caudal de salidas laterales.

Q_A = Caudal de salida por filtración hacia abajo.

Q_G = Caudal de salida por grietas y juntas.

Q_D = Caudal eliminado por drenaje.

Q_S = Caudal de entrada por filtración superficial.

Q_C = Caudal aportado por la capilaridad.

Q_T = Caudal transferido por las zonas laterales o profundas.

Q_H = Caudal aportado por hidrogénesis (despreciable).

En la práctica la ecuación general queda transformada en:

$$Q_A + Q_D \geq Q_S + Q_T$$

O si las capas de terraplén no son muy permeables y no hay filtraciones laterales grandes queda:

$$Q_D \geq Q_S$$

Ya que los factores más importantes son la filtración superficial para el agua de entrada y la eliminación por drenaje para el agua de salida.

Es conveniente introducir un coeficiente de seguridad C para evitar las incertidumbres en la determinación de los parámetros de cálculo, sobre todo, la permeabilidad, por lo que la ecuación definitiva quedaría:

$$Q_D \geq C Q_S$$

Cumpliendo la ecuación anteriormente citada de manera que los caudales de entrada sean siempre inferiores a los de salida, también es necesario que haya una continuidad en la graduación de estos caudales para evitar puntos de acumulación en las líneas de corrientes de filtración.

Por ejemplo, si el camino de las aguas de filtración es:

A) Superficie de la carretera.

B) Base drenante.

C) Recorrido base a tubo drenante.

D) Tubo drenante hasta arqueta, y

E) Arqueta a tubo de desagüe.

Se deberá cumplir:

$$Q_{AB} \leq Q_{BC} \leq Q_{CD} \leq Q_{DE}$$

para que el sistema de drenaje funcione correctamente.

Además de proyectar unas capas y un sistema de drenaje capaz de evacuar todas las aguas de filtración, se necesita limitar el tiempo que el agua permanece en el pavimento, sobre todo, en regiones frías con riesgo de heladas, y muchas veces habrá que dimensionar el drena-

je para obtener una velocidad de descarga adecuada que un caudal dado.

Los tiempos que se estiman como razonables en carreteras son:

- ½ hora en zonas con riesgo de heladas.
- 1 hora en zonas sin riesgo de heladas.
- 1 ½ horas en zonas muy anchas (plazas, glorietas, etc.)
- 2 horas en grandes superficies de aparcamiento.

3.3. Estimación de caudales de filtración y de drenaje

Lo normal en la mayoría de los casos es efectuar la estimación de caudales de filtración superficial y en zonas localizadas, la aportación de agua por los laterales de la explanación.

La cantidad de filtración que puede entrar en una sección estructural viene determinada por el menor de estos dos factores:

- a) La máxima filtración compatible con la permeabilidad efectiva de la capa superficial.
- b) La máxima aportación posible por lluvia o causa análoga.

La permeabilidad efectiva es la del conjunto de la superficie del pavimento, con junta, grietas, zonas de diferente capa de rodadura, etc., y es difícil determinar, salvo si en pavimentos experimentales se recogen los caudales de filtración a través del pavimento y basa de macadam, con lo cual se puede obtener la permeabilidad global que incluye también la correspondiente a la base permeable.

Otro método para estimar la permeabilidad global consiste en hacer ensayos de filtración en áreas localizadas.

En ensayos realizados sobre zonas acotadas de pavimentos de hormigón y de aglomerado asfáltico se ha medido el caudal y el tiempo de infiltración por grietas, juntas y defectos, llegándose a caudales equivalentes al que aporta una lluvia de 15 a 25 mm/hora.

Las permeabilidades globales en el conjunto de una carretera pueden variar mucho con las zonas y con el sistema de mantenimiento de los firmes, sin embargo, puede adoptarse como caudal de cálculo de infiltración superficial, con

un margen de seguridad razonable, el equivalente a:

«Máxima precipitación horaria del año»

Como toda la lluvia que cae sobre un pavimento no penetra en el mismo hay que multiplicar el dato de mm/hora por un coeficiente:

- a) Carreteras de pavimento de hormigón:
 - 0,50 Zonas secas, carreteras principales con buena ejecución y mantenimiento adecuado.
 - 0,60 Zonas de pluviometría normal, carreteras de mediana importancia y con ejecución normal y mantenimiento escaso.
 - 0,70 Zonas lluviosas, carreteras locales con ejecución normal y mantenimiento muy escaso o nulo.
- b) Carreteras con pavimento asfáltico:
 - 0,30 Zonas secas, carreteras principales con aglomerado asfáltico de gran espesor, buena ejecución y mantenimiento adecuado.
 - 0,40 Zonas de pluviometría normal, carreteras de mediana importancia con aglomerado asfáltico de poco espesor, ejecución normal y mantenimiento escaso.
 - 0,50 Zonas lluviosas, carreteras locales de firmes con tratamientos superficiales o una capa de pocos cm., de aglomerado asfáltico, ejecución normal y mantenimiento muy escaso o nulo.

En cuanto a las filtraciones laterales o profundas las hay de diversos tipos y cada una requiere una solución específica.

Una filtración lateral normal podrá controlarse con un dren del lado de la filtración.

Una carretera bajo nivel freático de poca importancia podrá drenarse con dos drenes longitudinales laterales.

Si la carretera anterior es doble o muy ancha será necesarios 3 drenes longitudinales.

Cuando una carretera se desarrolla por terreno montañoso y puede haber filtraciones por acumulación de agua en la base drenante, pueden disponerse tubos drenantes transversales en la explanada.

Estos drenes transversales son útiles también en la base drenante en el punto de transición de desmonte a terraplén.

Cuando el cuerpo del terraplén pasa sobre un manantial o bien obstruye la salida de éste, es sumamente importante hacer una captación, un drenaje de la zona húmeda y una conducción.

Al atravesar zonas húmedas extensas se deben disponer capas filtro que sirvan de mantos drenantes.

Cuando la carretera se desarrolla en terraplén sobre laderas inestables húmedas o blandas, es necesario sanear el terreno mediante trincheras profundas de estabilización con sus correspondientes tubos drenantes.

La estimación de caudales subterráneos de filtración debe hacerse con ayuda de sondeos, aflors de manantiales, etc., sobre todo, durante la estación húmeda para que no sean subestimados. Los caudales que se obtengan deben sumarse a los correspondientes a la filtración superficial.

Las filtraciones hacia arriba procedentes de la capa freática por efecto de presión artesiana son relativamente frecuentes y su importancia depende mucho de la permeabilidad de la explanada.

Los caudales de agua drenados a través de bases y subbases pueden ser de dos tipos, los que se desarrollan a través de capas de pequeño espesor y gran anchura drenando lateralmente o bien los caudales que se drenan hacia abajo a un terraplén más permeable que las capas de base o subbase.

Cuando los pavimentos se proyectan con tubos drenantes longitudinales, el agua de drenaje tiene que recorrer la capa drenante, normalmente de pequeño espesor, con un gradiente hidráulico bajo, por ello los caudales drenados son muy escasos.

La construcción de redes de corrientes en las estrechas capas drenantes es bastante difícil, por lo que hay que adoptar procedimientos simplificados, suponer i constante y la capa llena de agua.

El drenaje hacia abajo es mucho más efectivo al aumentar considerablemente el gradiente hidráulico.

Este tipo de drenaje puede ser importante si el terraplén es permeable y está constituido por

arenas y gravas, o bien puede ser muy poco importante en el caso terraplenes arcillosos.

Otras variables que influyen bastante son la profundidad de la capa freática, la altura del terraplén respecto a su pie y la altura del terraplén permeable respecto a la capa impermeable más próxima.

3.4. Datos y criterios para el proyecto de capas drenantes

La disposición normal de un sistema de drenaje es la de una capa drenante bajo el pavimento que desagua lateralmente a unas zanjas drenantes longitudinales que recogen el agua y la conducen por medio de tubos perforados a unas arquetas que conectan con el sistema de desagüe general o específico del drenaje.

Los posibles sitios en los que podría no ser necesaria la implantación de drenes son los siguientes:

a) Zonas en las que no hay agua subterránea, problemas de hielo y en los que la lluvia superficial anual es menor de 200 a 250 mm.

b) Zonas cuyo terraplén es muy permeable, el agua freática es muy profunda y no hay problemas de hielo y nieve.

c) En carreteras de muy escaso tráfico, del orden de 150 a 200 ejes equivalentes de 13 Ton., por día.

Para proteger adecuadamente un pavimento de autopista o aeropuerto, es necesario una capa drenante de alta permeabilidad, del orden de 1 cms/seg o más.

Para asegurar un necesario nivel de permeabilidad, la cantidad de finos debe ser muy pequeña, los áridos limpios y angulosos y las granulometrías deben estar comprendidas entre estos tamaños:

3/8" - Tamiz n.º 4

3/4" - Tamiz n.º 4

3/4" - 1/2".

1" - 1/2".

1" - Tamiz n.º 4

Para que la curva granulométrica sea lo más uniforme posible, se utiliza la siguiente condición:

$$D_{85} < 4D_{15}$$

o sea, tamiz por el que pasa el 85 por 100 del

material, de abertura menor que cuatro veces la del tamiz por el que pasa el 15 por 100.

Para asegurar un alto grado de limpieza no se admite más de un 2 por 100 de finos inferiores a 2,5 mm.

$$D_2 \geq 2,5 \text{ mm.}$$

En todos los materiales usados como capas drenantes debe comprobarse su coeficiente de permeabilidad que depende del tamaño, forma, densidad y compactación de los granos. Sin embargo, para hacer la elección de un tipo de material puede ser útil la siguiente tabla orientativa.

D_{15}	Arido redondeado	Arido machacado
2,5 mm	1,1 cm/seg.	0,9 cm/seg.
3,7 mm	2,4 cm/seg.	1,7 cm/seg.
5,0 mm	3,5 cm/seg.	2,8 cm/seg.
7,5 mm	7,0 cm/seg.	5,2 cm/seg.
10,0 mm	10,5 cm/seg.	7,7 cm/seg.
15,0 mm	20,0 cm/seg.	14,0 cm/seg.
20,0 mm	31,5 cm/seg.	21,0 cm/seg.
25,0 mm	42,0 cm/seg.	28,0 cm/seg.
30,0 mm	62,5 cm/seg.	35,0 cm/seg.

Debe cumplirse, además, $D_{85} < 4 D_{15}$ y no tener finos $D_2 \geq 2,5 \text{ mm}$.

Además de una capa drenante, que constituye el núcleo del sistema, deben adoptarse en el proyecto otras medidas:

1) Dimensiones y pendientes adecuadas en firme, arcenes y terraplén para facilitar la labor del drenaje y no obstruirla.

2) Proyectar un sistema de drenaje que sea fácilmente construible y que mantenga su calidad durante el proceso de construcción.

3) Prever un buen sistema de mantenimiento de tubos y arquetas.

Para que la capa drenante mantenga su poder drenante es indispensable protegerla de la contaminación de finos procedentes del terraplén mediante filtros y membranas porosas o geotextiles, que hoy día son los más utilizados.

Otro principio básico es que la capacidad de descarga vaya aumentando en el sentido de la corriente de drenaje para que no se produzcan

retenciones ni obstrucciones, de acuerdo con los principios de continuidad expuestos en el capítulo tercero.

La cantidad de agua que pueden drenar las capas permeables se calcula por la ley de Darcy.

$$Q = K \cdot i \cdot A$$

K = permeabilidad.

i = gradiente hidráulico.

A = área de desagüe = t.l. (t = espesor) por unidad de longitud.

osea, que el caudal drenado es $Q = K \cdot i \cdot t$ por unidad de longitud.

Podemos adoptar la variable de transmisibilidad.

$$K \cdot t = Q/i$$

que facilita el cálculo para espesores dados de capas drenantes de permeabilidad conocida.

Un factor muy importante en el proyecto de redes de drenaje es el tiempo que el agua puede permanecer en la sección estructural antes de alcanzar los desagües, sobre todo en regiones con problemas de hielo y alternancias de hielo y deshielo en el día y la noche.

El tiempo de permanencia del agua puede calcularse por la ley de Darcy:

$$t = \frac{S}{V_s}$$

$$V_s = K \cdot i / n_e$$

siendo S la longitud máxima de la filtración, y n_e la porosidad efectiva.

En superficies amplias con bajo gradiente hidráulico, la única manera de reducir el tiempo de saturación es aumentar la permeabilidad.

Cuando se usan bases del tipo macádam los tiempos de saturación son despreciables; sin embargo, si se usan otros tipos de bases menos permeables, la saturación puede mantenerse largo tiempo y es preciso calcular éste.

Para saber el número de horas al año que la sección de la carretera puede contener agua libre es necesario:

1) Estimar el número de horas al año de lluvia y las filtraciones adicionales expresadas en lluvia equivalente.

INFLUENCIA DEL DRENAJE SUBTERRANEO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CARRETERAS

2) El tiempo de retraso desde que se produce el cese de filtración hasta que se elimina la saturación.

Una fórmula experimental obtenida por la U.S. Army Corps of Engineers es la siguiente:

$$t = \frac{n_e D^2}{2KH_0}$$

W = ANCHO DE LA CAPA DRENANTE (m.)
I = INFILTRACION UNITARIA DE PROYECTO (mm/h)
C = $K_b \cdot t$
 K_b = PERMEABILIDAD DE LA CAPA DRENANTE (cm/seg)
 t_b = ESPESOR DE LA CAPA DRENANTE (cm)
S = PENDIENTE TRANSVERSAL DE LA CAPA DRENANTE (TANTO POR UNO)

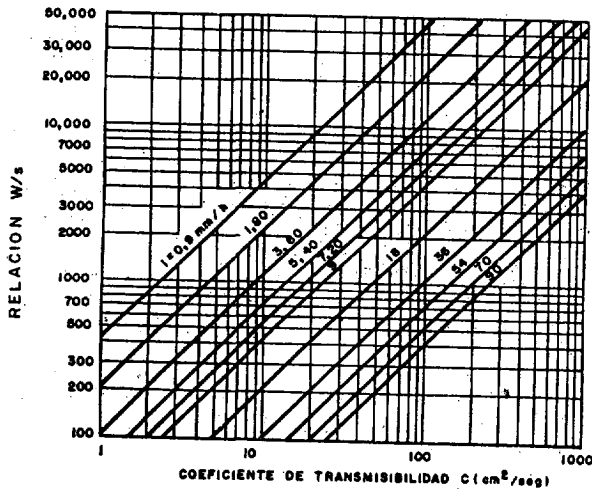


Figura 11.—Coeficiente de transmisibilidad respecto a la relación W/S.

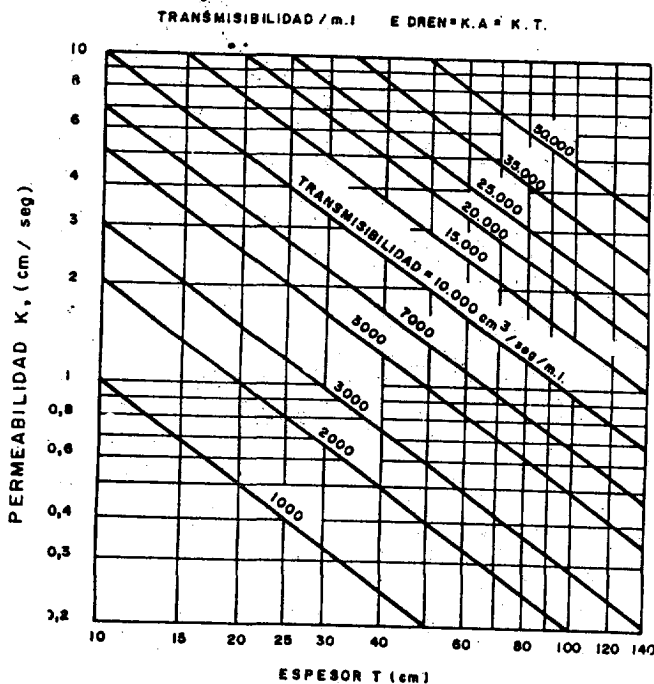


Figura 12.—Transmisibilidad en capas drenantes cm³/seg/m.l.

t = tiempo para drenar el 50 por 100 del agua.

n_e = Porosidad efectiva.

D = Ancho de la carretera en cms.

K = Coeficiente de permeabilidad en cm/seg.

$H_0 = H + SD$

H = espesor de la base en cms.

S = pendiente transversal. (Fig. 11 a 19).

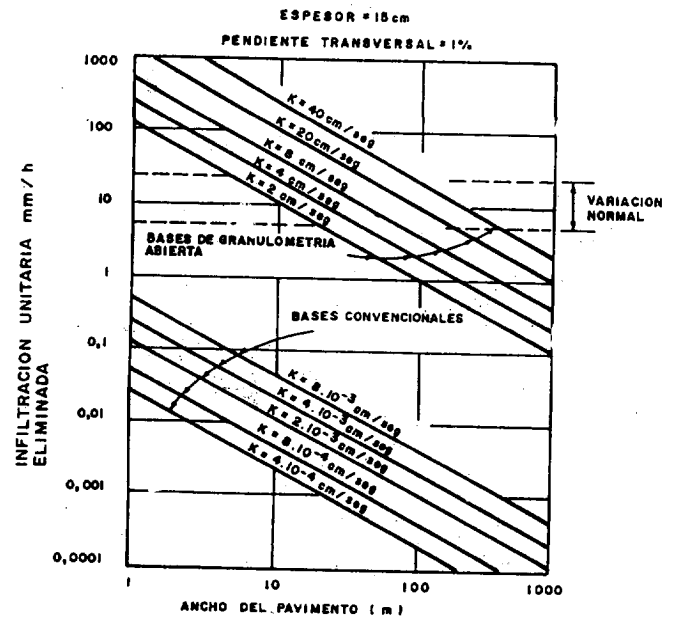


Figura 13.—Capacidad drenante de bases conectadas a zanjas longitudinales, las líneas inferiores corresponden a bases convencionales, las líneas superiores a bases de granulometría abierta.

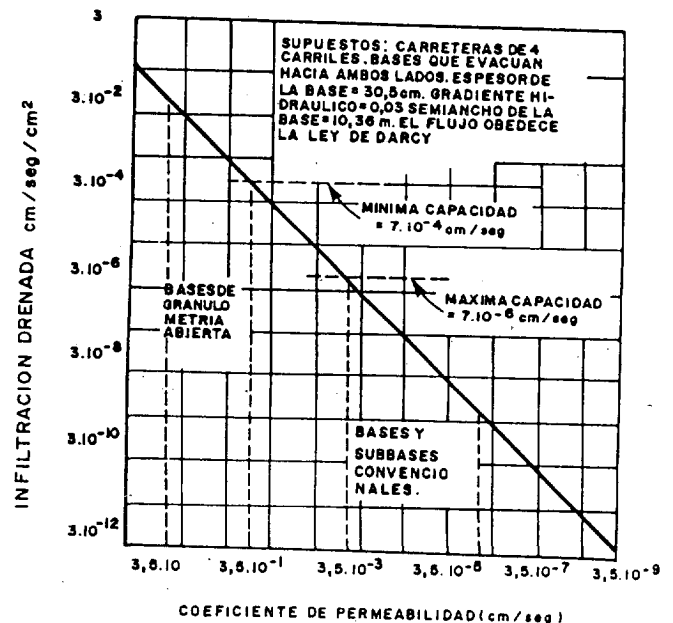


Figura 14.—Capacidad de drenaje de infiltraciones de algunas bases y subbases convencionales comparadas con bases de granulometría abierta.

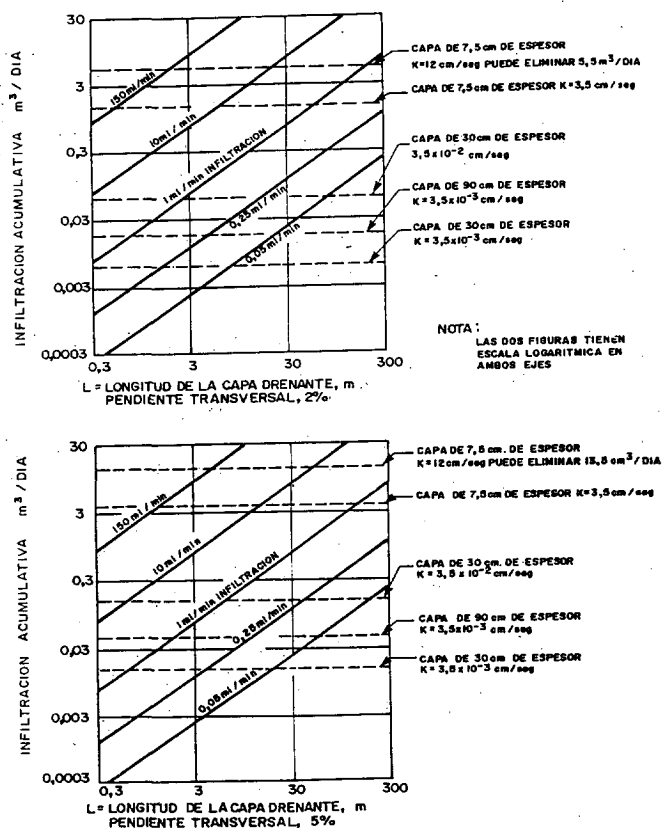


Figura 15.—Capacidad de descarga de capas drenantes.

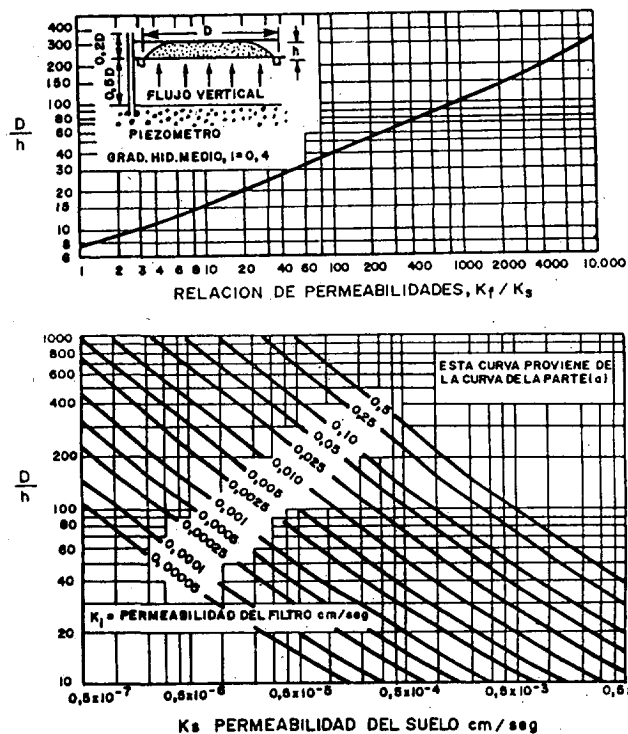


Figura 17.—Gráficas de diseño de capas permeables horizontales.

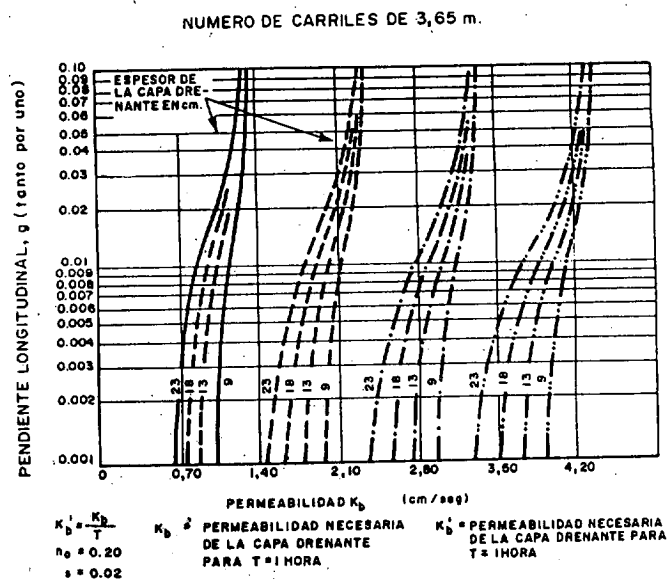


Figura 16.—Permeabilidad necesaria de la capa drenante para que su tiempo de drenaje «T» sea igual o menor a 1 hora.

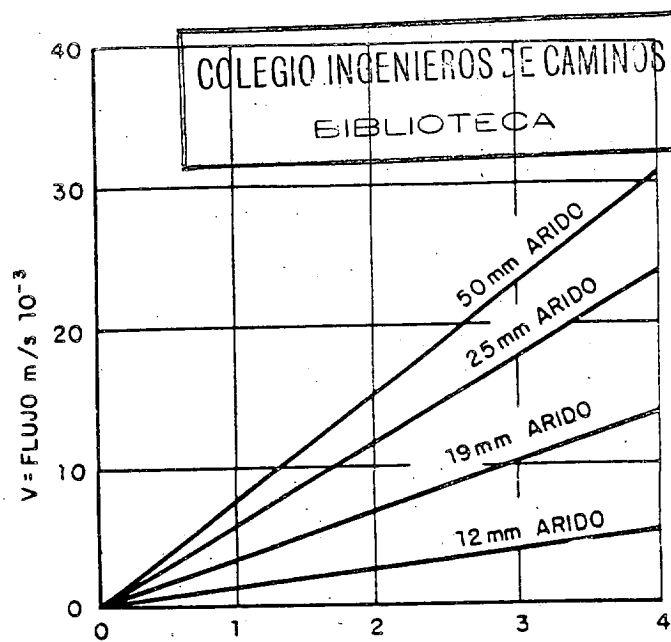


Figura 18.—Flujo (m/seg.) de un dren a partir de la pendiente y el tamaño de los áridos usados.

3.5. Protección de los sistemas de drenaje frente a la colmatación

Cuando se usan bases de alta permeabilidad y por tanto con granulometrías abiertas, existe el peligro de colmatación por los materiales finos del suelo arrastrados hacia el dren por el agua. En la construcción de presas de tierras se

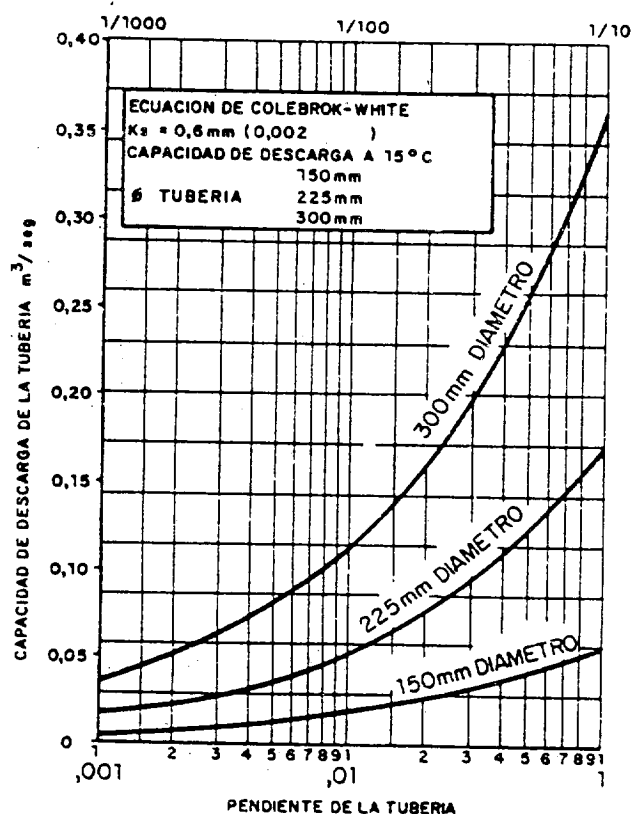


Figura 19.—Tamaño de la tubería drenante, a partir de la pendiente y la capacidad de descarga necesaria.

ha desarrollado ampliamente la técnica de los filtros o capas graduadas que deben interponerse entre el suelo y el sistema de drenaje, llegando a unas condiciones que han dado buenos resultados frente a la colmatación.

Algunas de las condiciones que deben cumplir los filtros respecto al suelo son las siguientes:

$$\frac{D_{15} \text{ (del filtro)}}{5} \leq D_{85} \text{ (del suelo)}$$

Da = es el tamaño de la abertura del tamiz que deja pasar un a por 100 de material.

Simultáneamente ha de cumplirse:

$$\frac{D_{50} \text{ (del filtro)}}{25} \leq D_{50} \text{ (del suelo)}$$

Con el uso de estos filtros es prácticamente imposible la colmatación de las bases drenantes; en caso de no disponerse de estos materiales habría que interponer membranas plásticas.

En las figuras 20 a 24 se indican las granulometrías de bases abiertas, filtros y suelos compatibles con las fórmulas anteriores.

Cuando los sistemas de drenaje están dotados de tubos con ranuras o perforaciones, se necesita que éstas no obstruyan o colmaten, ni sean excesivamente grandes.

Las condiciones que deben de cumplir son las siguientes:

$$\frac{D_{85} \text{ (del filtro)}}{\text{ancho de ranura}} > 1,2$$

$$\frac{D_{85} \text{ (del filtro)}}{\text{Diámetro agujero}} > 1$$

Estos criterios proceden del U.S. Army Corps of Engineers.

Otros organismos como el U.S. Bureau of Reclamation, exigen:

$$\frac{D_{15} \text{ (del filtro)}}{\text{Dimensión mín. del agujero del tubo}} > 2$$

Hoy día, la utilización de los geotextiles o láminas drenantes está desplazando de una manera continua y progresiva a la utilización de filtros granulares por la gran comodidad de colocación, que a su vez se traduce en ventajas económicas. Los filtros granulares requieren una cuidadosa fabricación y clasificación, además de una esmerada colocación en obra, con utilización de abundante mano de obra cualificada. Su empleo se va reduciendo cada vez más al uso en grandes superficies y espesores, como las presas de tierra o aeropuertos.

Las láminas drenantes tienen la gran ventaja de su facilidad de colocación, de su rapidez y de no requerir maquinaria. Además, su precio, inicialmente elevado, se va reduciendo año por año y se ve compensado con la utilización de materiales drenantes de menor valor económico, al haberse dissociado las funciones de drenaje y anticólmatación.

En efecto, antes una zanja drenante requería un material granular que además de evacuar el agua hacia el tubo poroso situado en su fondo, captase el agua lateral sin contaminarse de los materiales finos de terraplén, con el cual estaba en contacto, todo esto, requería una selección cuidada de gravillas y arenas y en algunos

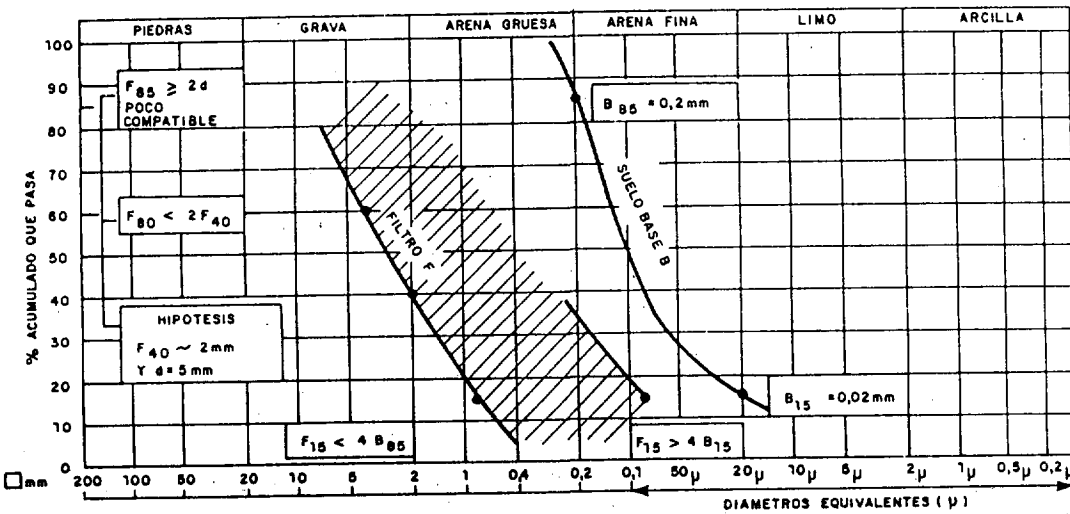


Figura 20.—Aplicación de los criterios de Terzaghi 4 $B_{15} < F_{15} < 4 B_{85}$. Resaltar que la condición $F_{85} \geq 2d \sim 10 \text{ mm}$. no es compatible con las otras condiciones del filtro. Si el diámetro de los orificios captadores es de 1 mm, p. ej., todas las condiciones del filtro son compatibles.

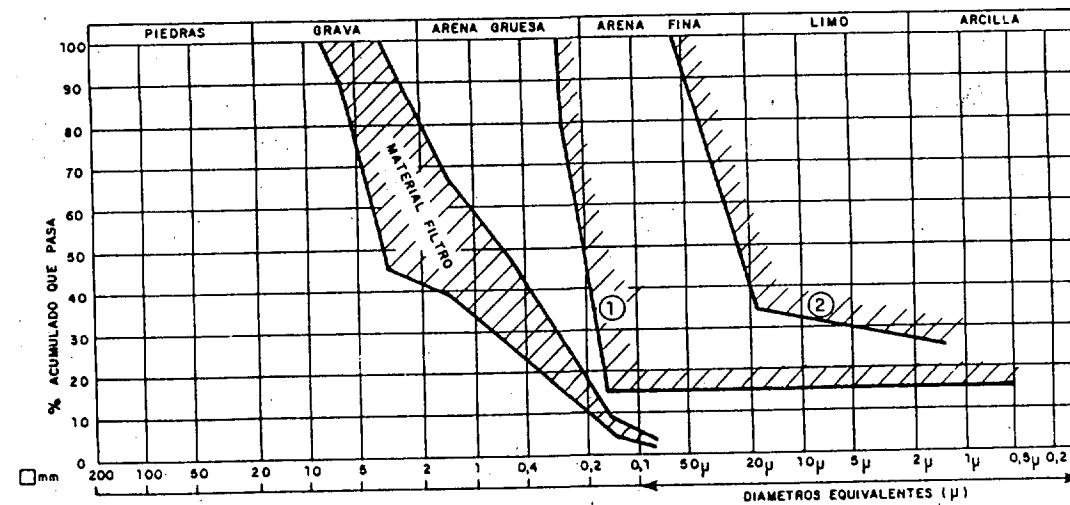


Figura 21.—Criterios del C.R.R. de Bruselas para un filtro de arenas de machaqueo. A partir del filtro requerido, se pueden definir los suelos estables e inestables respecto a el mismo.

- 1.— Suelos inestables si $B_{85}/B_{15} < 2$.
- 2.— Suelos inestables si $B_{85}/B_{15} \geq 2$.

Para aberturas de $e \leq 3 \text{ mm}$, la estabilidad de filtro se obtiene para $F_{85} \geq 0,7 e$.

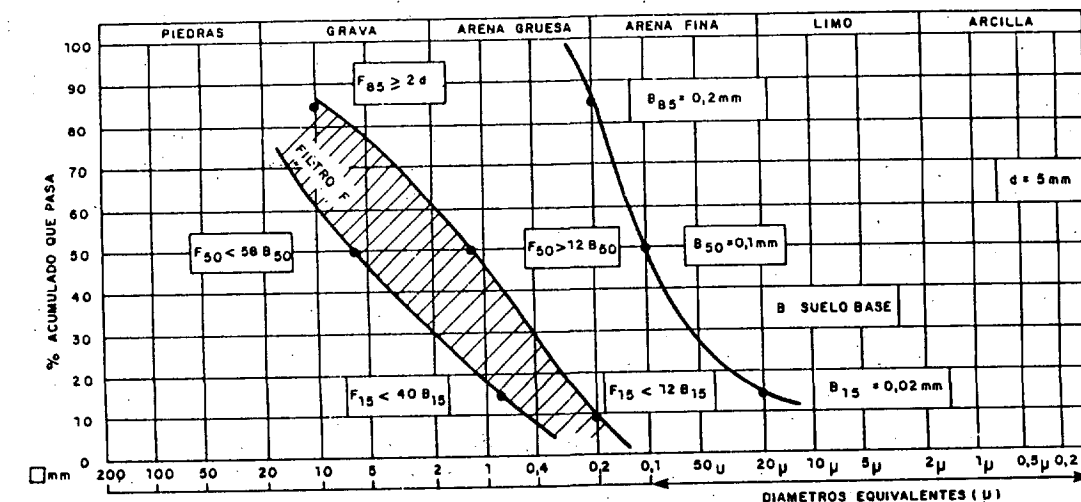


Figura 22.—Aplicación de los criterios b (2) de I.U.S.B.R. con $F_{10} > 0,2 \text{ mm}$ y $F_{60} \leq 20 F_{10}$.

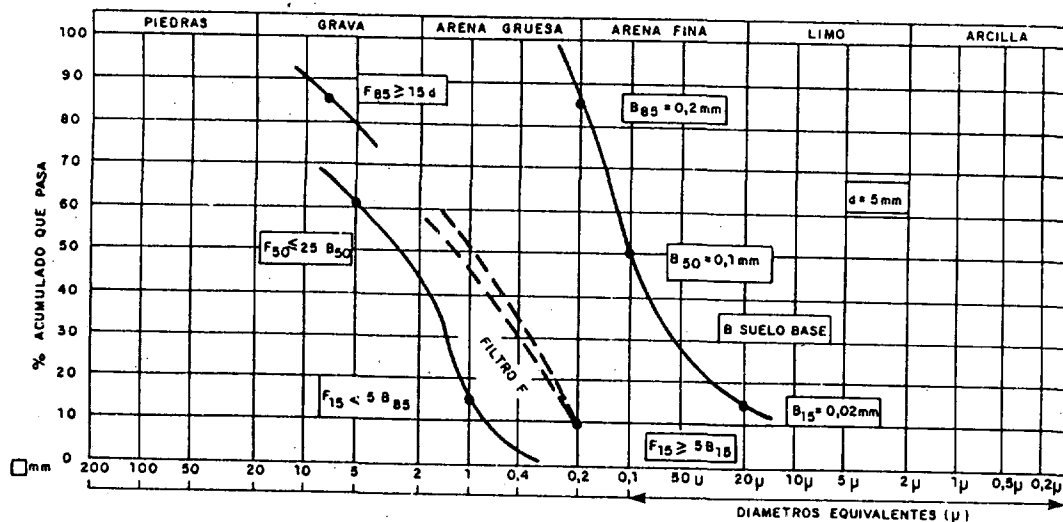


Figura 23.—Aplicación de los criterios c (3) de U.S.C.E. con $F_{10} > 0,2$ mm y $F_{80} \leq 20 F_{10}$

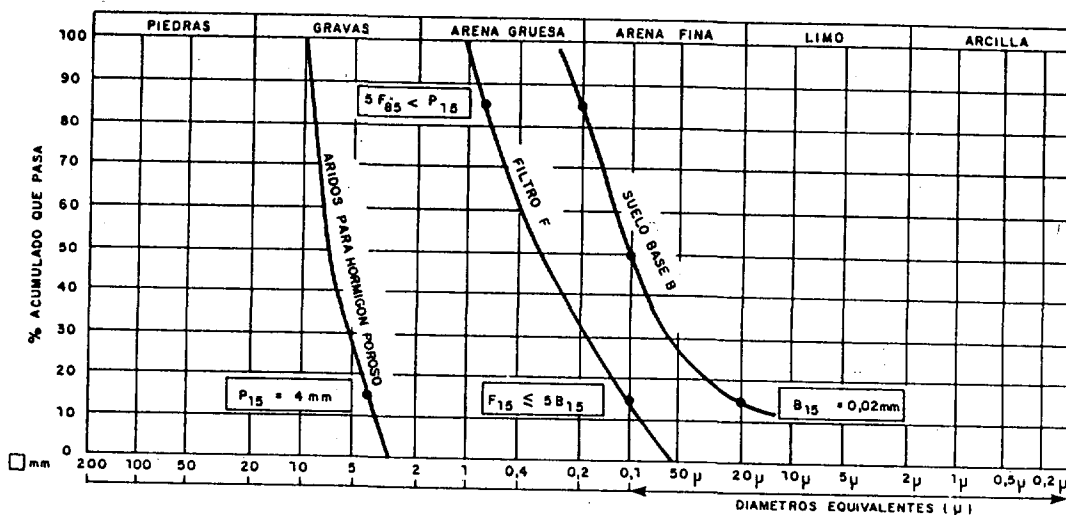


Fig. 24.—Aplicación de los criterios d (3) para un tubo drenante en hormigón poroso. Existe el riesgo de que el filtro sea insuficientemente permeable según los caudales. Los finos del filtro puede reducir la eficacia de los poros.

casos obligaba a emplear varias capas granulares del exterior hacia el interior del dren. Con la utilización de las láminas drenantes, las gravas pueden ser de cualquier tipo con tal que evacúen el agua, usándose muchas veces las más gruesas que se rechazan en hormigones y gravace-miento, ya que la anticontaminación de estas gravas se produce por el uso de la lámina geo-textil que las recubre.

Las características de las láminas drenantes han sido objeto de numerosos ensayos, conferencias y congresos para establecer su resistencia a roturas, desgarramiento, permeabilidad, durabilidad, diversidad de usos según las circunstancias, etc., y de los cuales indicamos los más importantes en el capítulo de ensayos.

En cuanto a las condiciones de protección

frente a la colmatación son bastante más sencillas que las de los filtros granulares.

Si denominamos 0_{95} el diámetro del poro medio de las láminas se debe cumplir.

$$0_{95} < d_{90} \text{ del suelo.}$$

$$0_{95} \leq 10 d_{10} \text{ del suelo.}$$

o bien.

$$\frac{0_{95}}{d_{50}} \leq \left(\frac{d_{60}}{d_{10}} \right)^{0,9}$$

La manera de definir 0_{95} es la siguiente:

a) En láminas tejidas es el diámetro de los granos de un suelo uniforme que pasa a través de la malla en un 95 por 100 de su peso.

b) en láminas no tejidas viene dado por la fórmula

$$O_{95} = \rho \left(\frac{\sqrt{2\pi(1+e)}}{4} - 1 \right)$$

siendo ρ el diámetro de las fibras y «e» el índice de huecos (Fig. 25 a 32).

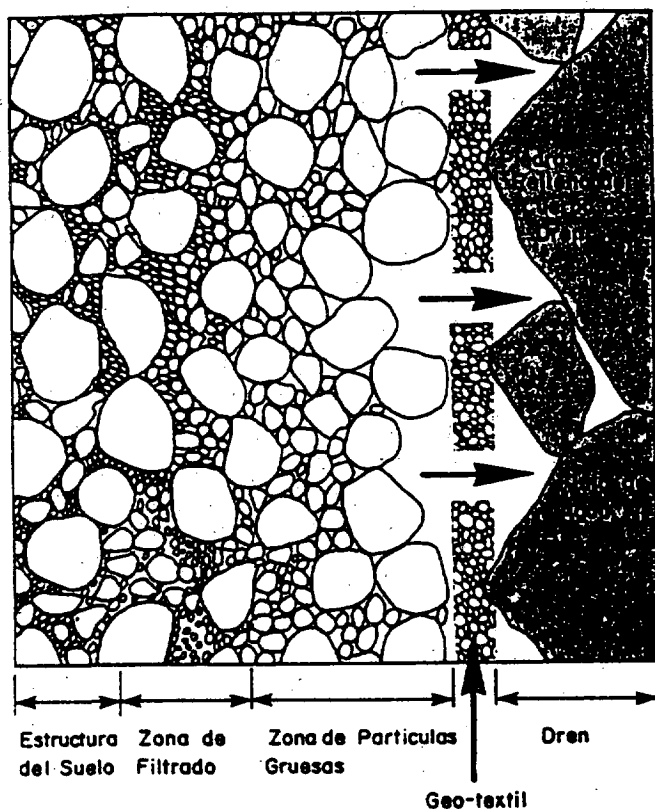
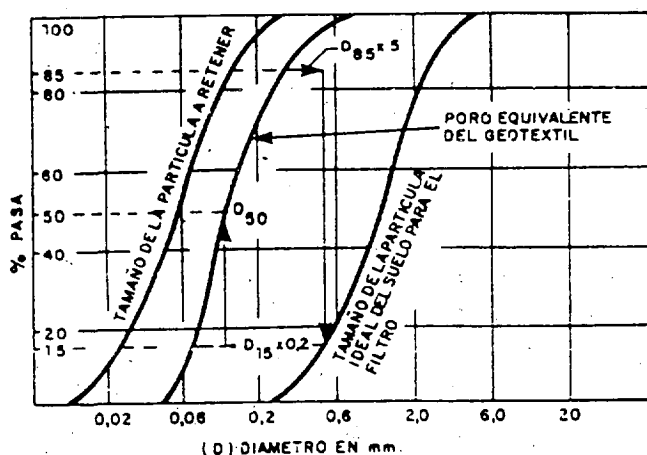


Figura 25.—Sección de un dren realizado con Geo-Textiles



TIPOS DE GEOTEXTILES

Figura 26.—Elección del geotextil.

Clasificación LPC	Constitución	Peso/m ² (gr) (aproximado)
A	Hilos continuos ligados de poliéster	200
B	Hilos continuos ligados de poliéster	300
C	Hilos continuos ligados de poliéster	400
D	Hilos continuos ligados de poliéster	600
E	Hilos continuos de polipropileno ligados sobre una cadena de poliéster, prensados y fundidos superficialmente.	160
F	Fibras cortas de poliamida con ligante químico (látex)	100
G	Fibras cortadas de poliamida con ligante químico (látex)	275
H	Fibras cortadas de poliamida con ligante químico (látex)	300
J	Fibras cortas de poliéster ligadas con ligante químico (resina metacrílica)	500
K	Hilos continuos ligados de poliéster	400
L	Hilos continuos de nylon y polipropileno, prensados y fundidos superficialmente	140

Figura 27.—Constitución y peso por metro cuadrado de algunos geotextiles no tejidos.

Clasificación LCPC	h _e (mm)	Porosidad n			Indice de huecos e		
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
A	0,14	0,93	0,83	0,92	13,00	5,00	11,50
B	0,21	0,93	0,83	0,91	13,00	5,00	10,00
C	0,28	0,91	0,80	0,90	10,00	4,00	9,00
D	0,43	0,91	0,81	0,90	10,00	4,25	9,00
E	0,17	0,81	0,69	0,69	4,25	2,25	2,25
F	0,09	0,88	0,75	0,87	7,50	3,00	7,00
J	0,36	0,84	0,75	0,81	5,50	3,00	4,25
K	0,44	0,86	0,58	0,81	6,50	1,40	4,25
L	0,12	0,83	0,75	0,80	4,75	3,00	4,00

- (1) Presión sobre el geotextil 20 g/cm². 1.^a carga
- (1) Presión sobre el geotextil 2 g/cm². 1.^a carga
- (1) Presión sobre el geotextil 20 g/cm². 1.^a carga

Figura 28.—Porosidad e índice de huecos geotextiles no tejidos.

Clasificación LPC	Constitución	Peso/m ² (gr) (aproximado)
M	Tela de cintas de polipropileno	120
N	Tela de cintas de polipropileno	220
P	Tela de cintas de polipropileno	130
Q	Tela de cintas de polipropileno	100
R	Tela de hilos de polietileno tejidos	100
S	Tela de hilos de poliamida	35
T	Tela de hilos y filamentos de polipropileno tejidos	240

Figura 29.—Constitución y peso/m² de geotextiles tejidos.

Carga (kg/cm ²)	Permeabilidad
0,32	$11 \cdot 10^{-2}$
0,64	$11 \cdot 11^{-2}$
1,30	$8 \cdot 10^{-2}$
1,90	$7 \cdot 10^{-2}$
2,50	$6 \cdot 10^{-2}$

Figura 30a.—Permeabilidad normal de un geotextil no tejido bajo diferentes compresiones.

Clasificación LCPC	Permeabilidad K_N (cm/s $\times 10^2$)	Permeabilidad K_N (cm/s)
B	29,0	$2,9 \times 10^{-1}$
E	3,6	$3,6 \times 10^{-2}$
F	2,9	$2,9 \times 10^{-2}$
I	4,6	$4,6 \times 10^{-2}$
K	13,0	$1,3 \times 10^{-1}$
L	6,5	$6,5 \times 10^{-2}$
M	0,3	$3,0 \times 10^{-3}$

Figura 30b.—Permeabilidad normal de algunos geotextiles sin comprimir.

4. DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

4.1. Elementos drenantes.

Hay que tener presente en todo momento la condición de continuidad expresada en 3.2. y por ello es importante que a lo largo de las líneas de drenaje la permeabilidad total vaya aumentando, especialmente, en los rellenos de

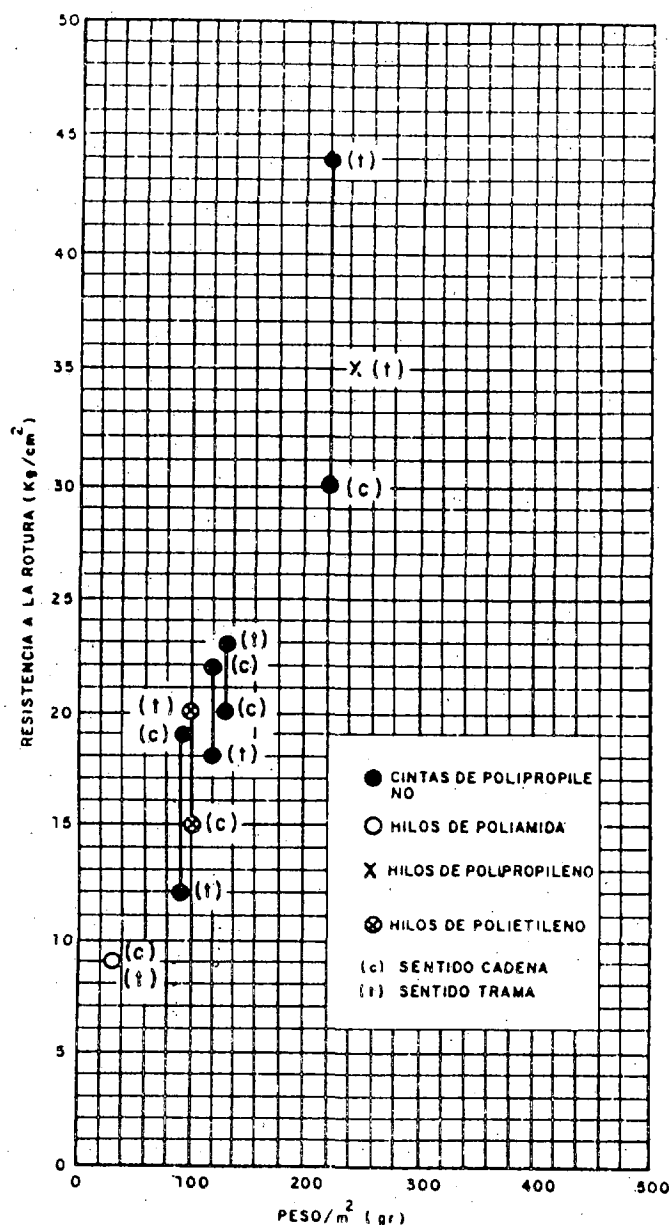


Figura 31.—Geotextiles tejidos. Resistencia a la rotura en función del peso/m².

material filtrante alrededor de los drenes, para que la capacidad drenante de éstos se vea aumentada y no restringida.

Cuando los tubos de drenaje se colocan en zanjas poco profundas en forma de V amplia y las bases drenantes son abiertas, el sistema suele funcionar bastante bien. Si el material de relleno de la zanja es demasiado grueso para colocarlo en contacto con suelos erosionables debe protegerse en los fondos y lados de la zanja con láminas filtrantes.

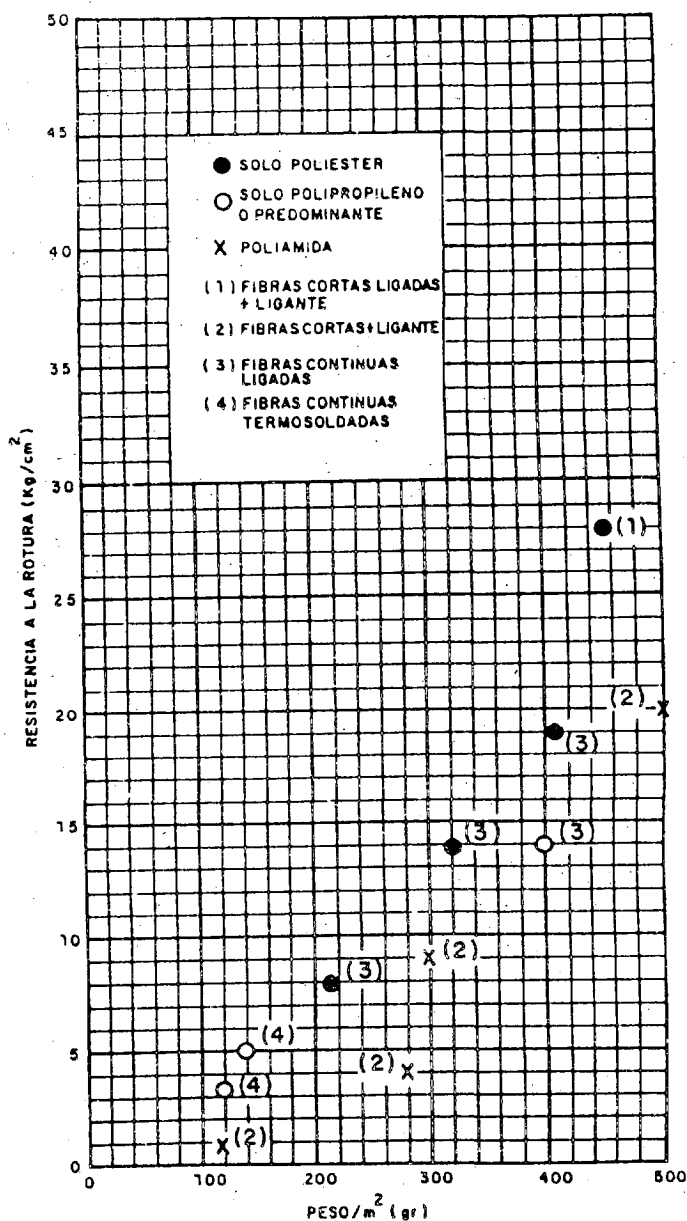


Figura 32. — Geotextiles no tejidos. Resistencia a la rotura en función del peso/m²

Cuando los tubos drenantes y el material se colocan en zanjas profundas, debe aplicarse la Ley de Darcy a la comprobación de la permeabilidad de la zanja, siendo el área A , la anchura de la zanja por unidad de longitud y el gradiente i prácticamente igual a la unidad.

Las distancias entre arquetas de recogida de agua drenada, o lo que es lo mismo, la longitud de tubos y zanjas drenantes, está limitada por los cálculos hidráulicos y por el principio de

continuidad, para que los tramos de drenaje y arquetas de desagüe no tengan distancias que obstaculicen el crecimiento de la capacidad de drenaje.

En el proyecto de redes de drenaje es muy conveniente realizar perspectivas de los tubos, especialmente en zonas conflictivas como cambios de rasante, curvas, acuerdos verticales cóncavos, evitando puntos de acumulación de agua sin desagüe, zonas largas sin desagüe lateral, etc.

Un criterio prudente es que las mayores distancias totales de drenaje no excedan de 45 a 60 m.

En curvas con peraltes es posible que para cumplir el criterio anterior haya que disponer drenes transversales, debido a las grandes distancias de drenaje que pueden originarse de determinadas combinaciones de pendientes longitudinal y transversal.

Los tubos de salida de los desagües deben estar colocados en zonas donde se asegure el funcionamiento de salida de agua por gravedad y no se produzcan obstrucciones o lo que sería peor, entrada de agua freática por estos tubos de desagüe; en este caso, deben dotarse de válvulas especiales si existe este riesgo.

El tipo de material utilizado en los tubos debe de ser compatible con las condiciones locales, o sea, no ser corrosible, desintegrable, desgastable o atacable por las sustancias químicas contenidas en los suelos.

En las regiones frías con problemas de hielo los tubos deben colocarse, si es posible, por debajo de la máxima profundidad posible de suelo helado y dotarles de protecciones adicionales, como arquetas grandes más numerosas, válvulas que eviten la entrada de aire frío, aislamientos, etc., o lo que es más frecuente, evitar los codos y dimensionar el diámetro con un poco de exceso para evitar las pérdidas de sección por acumulación de hielo.

Los tubos de desagüe deben estar claramente señalizados con postes para facilitar su mantenimiento.

En las excavaciones a media ladera con agua freática colgada sobre la explanación, los taludes en desmonte suelen ser sumamente ines-

tables a causa de su red de filtración, a menos que se adopten medidas de drenaje adecuadas.

En los casos de red de filtración sobre desmontes, los taludes de los mismos mejoran notablemente su estabilidad mediante la hincado de drenes subhorizontales que rebajan la línea de saturación contribuyendo así a la estabilidad del talud.

Para este tipo de drenaje y otros muchos se emplean tubos ranurados de CPV con ranuras de 0,25 mm. de abertura, y diversos diámetros.

En zonas muy amplias, de grandes superficies, como los aparcamientos de aeropuertos los tubos de drenaje no pueden desembocar al aire libre en los bordes del terraplén y deben hacerlo a las arquetas de los colectores de recogida de agua de lluvia.

En los casos en que la carretera tenga su rasante por debajo de la cota de nivel freático y

no sea posible el desagüe de esta zona por gravedad, se hace necesario la instalación de un sistema de drenaje acabado en pozos de recogida de los cuales se bombea mediante grupos de bombas accionadas por flotadores.

En carreteras o pistas de aeropuertos, con arcenes, la disposición del drenaje lateral y su posición longitudinal depende del uso del arcén, cantidad de tráfico, tipo de materiales, penetración de hielo, altura de la capa freática, etc. En general, cuanto más peligro de deterioro haya del arcén, por rodaje de vehículos sobre él (carreteras con curvas) más hacia el exterior debe situarse el tubo o la zanja.

Cuando es necesario realizar drenajes laterales profundos se adoptan zanjas con relleno de materiales altamente permeables, normalmente gravillas machacadas y con protección de láminas drenantes en el fondo y laterales de la zanja, sobre todo, cuando los terraplenes son erosionables. (Fig. 33 a 43).

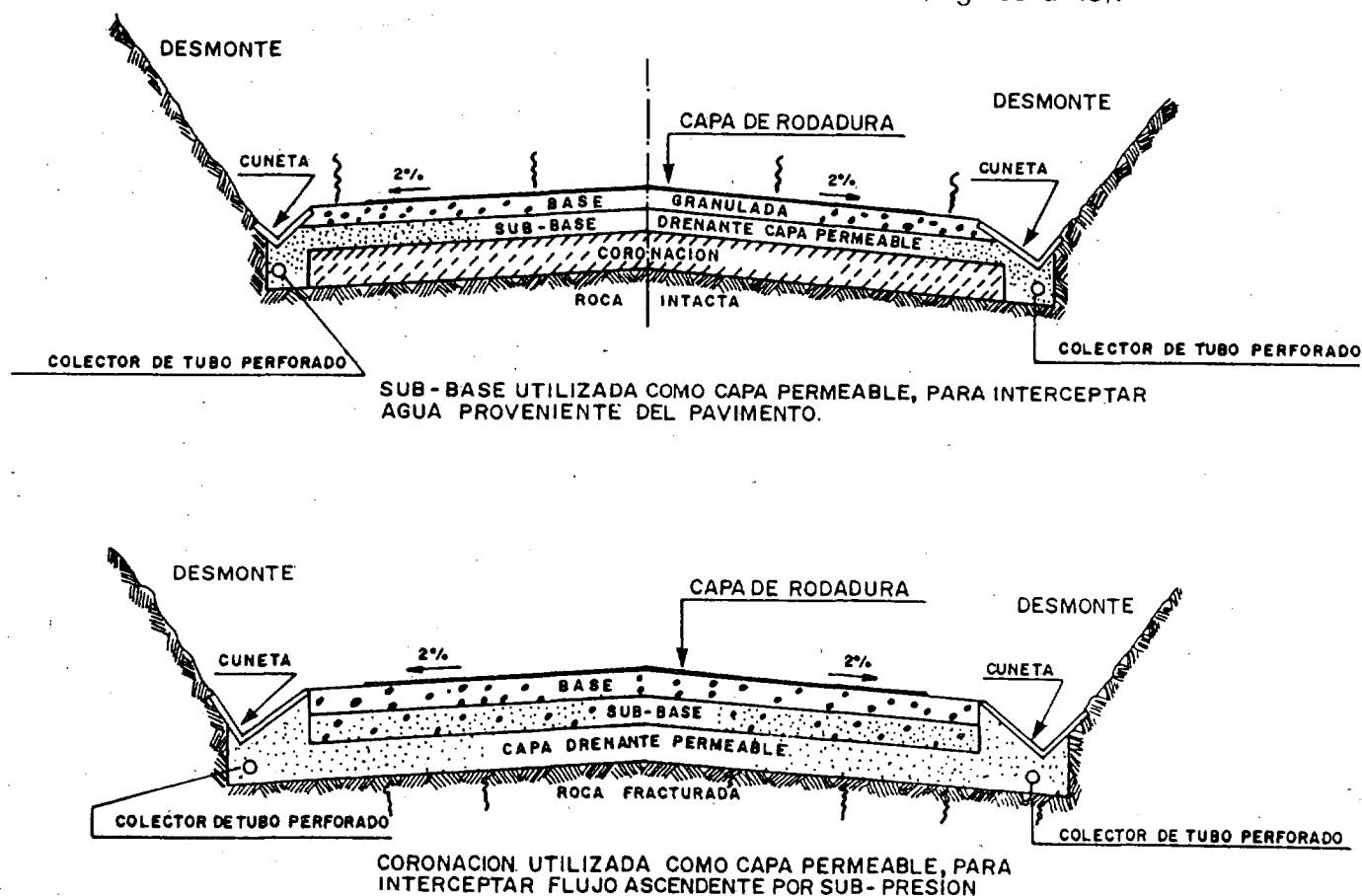


Figura 33.— Coronación utilizada como capa permeable, para interceptar flujo ascendente por sub-presión. Subbase drenante para eliminar la filtración superficial.

INFLUENCIA DEL DRENAJE SUBTERRANEO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CARRETERAS

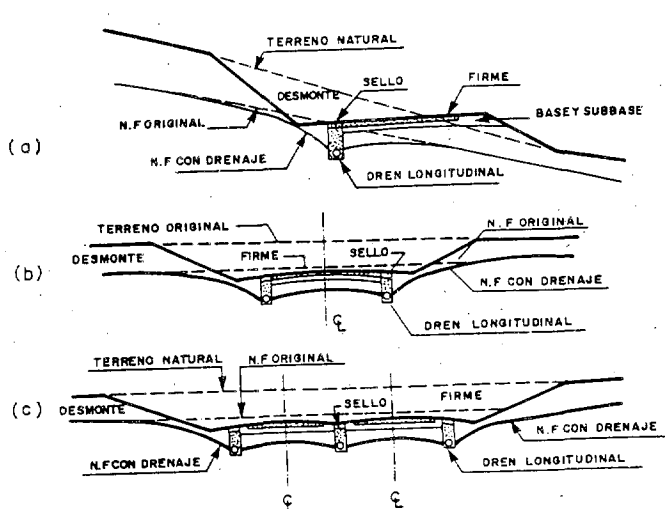


Figura 34. — Ejemplos de uso de drenes longitudinales para rebajar el N.F.

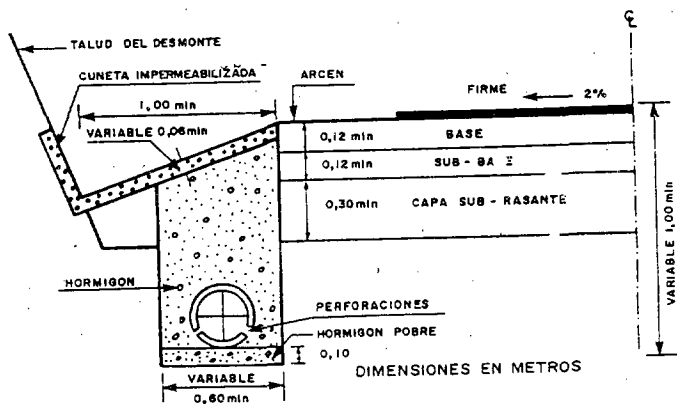


Figura 35. — Sección transversal de un dren longitudinal de zanja.

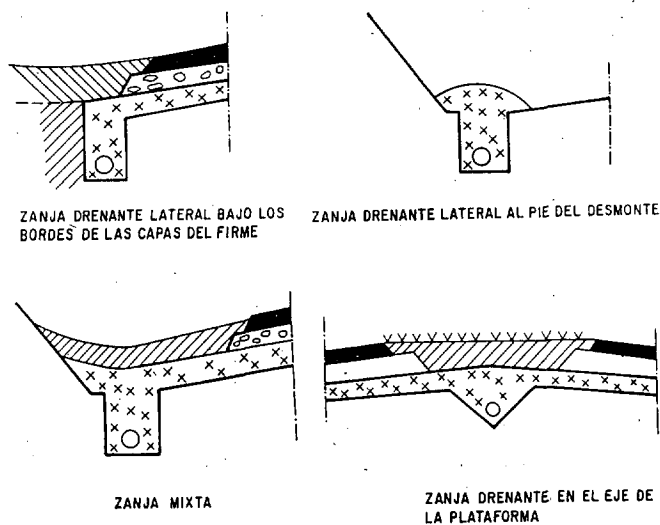


Figura 36.

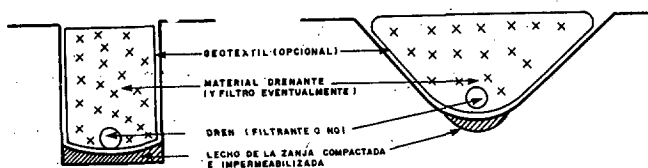


Figura 37. — Lecho de zanja compactado e impermeable. (Sección tipo de zanjas drenantes).

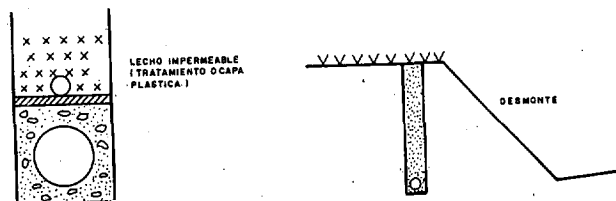
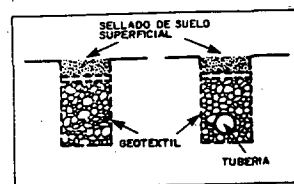
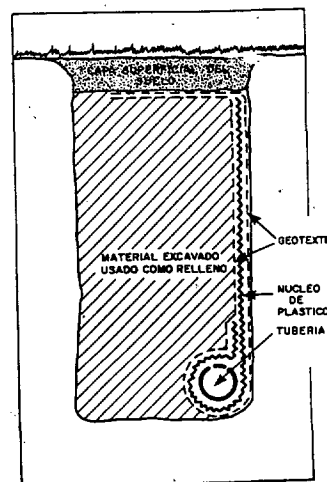


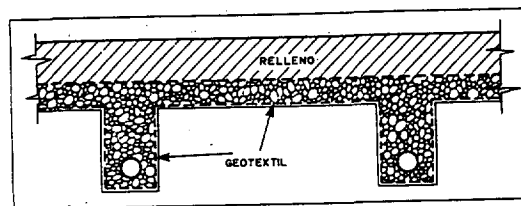
Figura 38. — Zanja drenante asociada a un colector y zanja drenante en la coronación de un desmonte.



DRENES LINEALES



DREN "DE ALETA"



CAPA DRENANTE

Figura 39. — Diferentes aplicaciones de geotextil en drenaje.

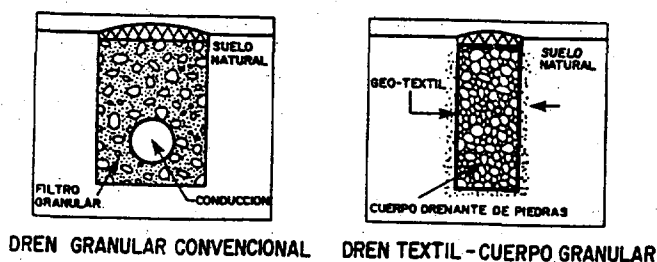


Figura 40.—Drenes longitudinales.

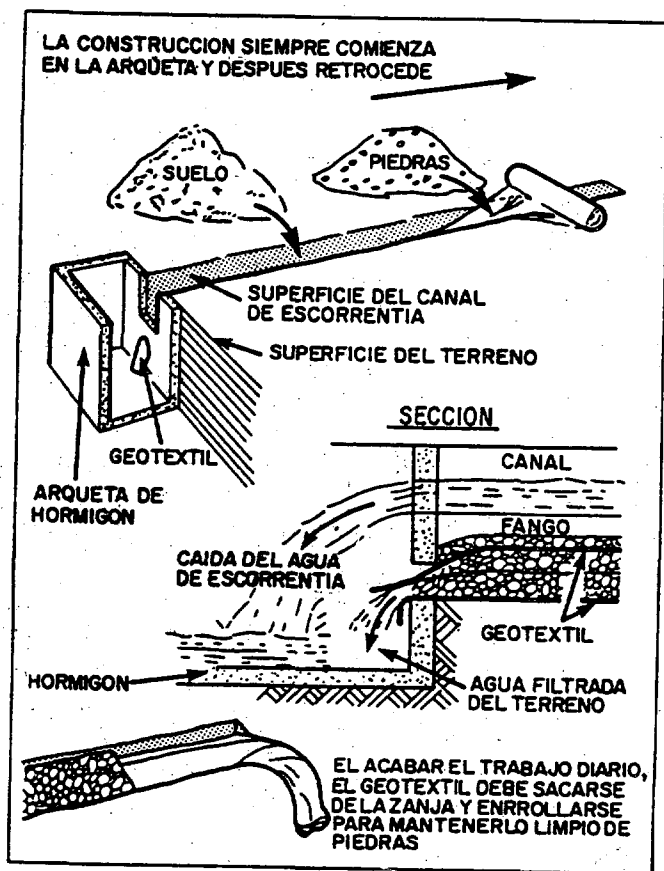
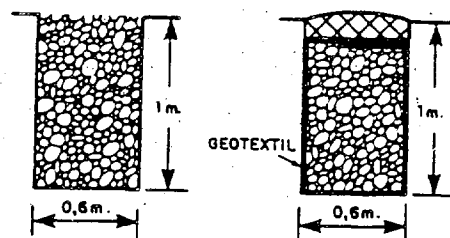


Figura 41.—Colocación de geotextiles.

4.2. Precauciones durante la construcción

Aunque un sistema de drenaje bien proyectado debe de tener una gran duración es necesario adoptar algunas precauciones especiales que faciliten la conservación.

Los terraplenes deben estar compactados de una forma correcta en todo su volumen, no sólo alcanzando una densidad mínima establecida como un porcentaje de la óptima Proctor, sino



TAMAÑO PIEDRAS	PERMEABILIDAD	CAPACIDAD(Q)
mm	m / sec	m ³ / sec
19 - 25	0,8	0,002
9 - 12	0,2	0,0006
6 - 9	0,04	0,0001

Figura 42.—Capacidades de descarga de drenes rellenos de material granular de 1 m x 0,6 m con pendientes de 1:100. La capacidad es proporcional a la sección y al gradiente. Un área dos veces mayor supone una capacidad del doble. Igualmente un gradiente tres veces mayor supone el triple de capacidad.

GRADIENTE	DIAMETRO INTERNO (d)				
	0,1 m.	0,15 m.	0,2 m.	0,25 m.	0,3 m.
Q	m ³ /sec	m ³ /sec	m ³ /sec	m ³ /sec	m ³ /sec
1:600	0,002	0,005	0,01	0,02	0,04
1:200	0,003	0,01	0,02	0,04	0,07
1:100	0,005	0,013	0,03	0,06	0,1
1:50	0,006	0,02	0,04	0,08	0,14
1:20	0,01	0,03	0,07	0,13	0,21

Para pequeños cantiles, el caudal es similar al de las tuberías. Diámetro equivalente

$$d = \left(\frac{2 \sqrt{h \cdot w}}{3,142} \right) \text{ metros}$$

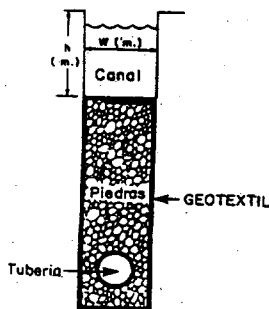


Figura 43.—Capacidades de descarga para canales abiertos y tuberías circulares.

también con una humedad próxima a la óptima Proctor.

Los fallos por compactación defectuosa, tanto por exceso como por falta de agua, producen unos gastos de reparación muy elevados.

Deben preverse los fenómenos de asiento y consolidación, de manera que no puedan afectar a los drenajes y firmes y que no produzcan puntos de retención.

Una pendiente transversal del 2 por 100 elimina rápidamente el agua de lluvia que pueda producirse durante la construcción. En caso de que no sea posible adoptar esta pendiente, se adoptará un 1 por 100 como mínimo.

En la construcción de capas drenantes, en general, debe evitarse por todos los medios la contaminación de las mismas, impidiendo la circulación por ellas, ya que, además de contaminarse pueden destruir su estructura.

La suciedad y el barro de los camiones es una causa frecuente de contaminación de las bases drenantes. En el caso de que estén sucias no deben lavarse «in situ» ya que no se eliminan bien los finos.

Cuando se prevean lluvias durante la construcción, deberá procurarse una buena evacuación del agua manteniendo los bordes libres y disponiendo pendientes transversales altas.

Los posibles barros o lodos que se acumulen en zonas bajas después de una lluvia, deben eliminarse antes de proseguir la construcción.

Para evitar segregaciones y contaminación de filtros, éstos deben manipularse lo menos posible, por lo que se les debe humedecer poco antes de su colocación.

Después de la construcción de una base drenante, debe reducirse cualquier tráfico que pueda dañarla. En la aplicación de capas asfálticas de imprimación o adherencia se debe tener en cuenta que las dosificaciones excesivas penetran en la fase drenante reduciendo su eficacia.

Cuando se construyen pavimentos de hormigón sobre bases drenantes deben tomarse precauciones para que el mortero o la lechada de cemento no penetre en la base. Normalmente, el problema es poco importante si el asentamiento del hormigón medido en el cono de Abrahams es menor de 7-9 cms.

Si se tienen dudas sobre la posible contaminación de la base por la pasta de cemento debe usarse una capa intermedia de gravilla, cuyo tamaño sea aproximadamente:

$$1/4 D_{15} \text{ de la base}$$

y efectuar una compactación con apisonadoras metálicas de llantas lisas. Otro procedimiento puede ser el hacer un pequeño tramo de prueba.

La ejecución del sistema de drenaje estará presidida por las dos ideas fundamentales de que sus materiales tengan una capacidad portante similar a la de los elementos adyacentes y que durante la construcción no se contaminen los materiales manteniendo la capacidad de drenaje prevista.

El acopio y la manipulación de materiales drenantes debe evitar toda suciedad y contaminación de los mismos, para lo cual, el mejor método es colocarlos directamente en el tajo desde los medios de transporte sin acopios intermedios en el suelo. En este último caso los materiales granulares de la última capa en contacto con el suelo se desecharán.

Los rellenos granulares es conveniente realizarlos a temperaturas superiores a 0° C o bien tomar precauciones especiales.

Las obras de drenaje se protegerán eficazmente durante la construcción contra la suciedad producida por la circulación de vehículos de obra o por las tierras arrastradas por el agua superficial. Los puntos más delicados pueden protegerse con plásticos o arpilleras.

Las capas drenantes deben utilizar preferentemente, áridos procedentes de plantas de machaqueo y clasificación. En caso de requerirse una calidad más alta para este tipo de capas, se deben utilizar mezclas asfálticas abiertas, con un contenido de betún del orden del 1,5 por 100 al 2,5 por 100 o bien hormigones hidráulicos porosos, sin arena, para ambos casos se requieren ensayos especiales de resistencia y permeabilidad.

En los sistemas que utilicen zanjas drenantes, no se excavarán éstas antes de refinar la coronación del terraplén, para no contaminar las zanjas y los filtros con los productos sobrantes. En los casos en que la subbase sea de menor drenabilidad que los filtros, se pospondrá la ejecución de las zanjas hasta después de refinada la subbase.

Una zanja drenante no debe permanecer abierta mucho tiempo, por lo que la excavación, colocación de la tubería y relleno de la misma se realizarán de forma continua.

Los productos de excavación de zanjas se eliminarán lo más rápidamente posible, con el fin de evitar su caída a la zanja durante la ejecu-

ción del resto del drenaje y para contribuir a la limpieza de la misma.

El fondo de la zanja debe ser impermeable, para lo cual puede ser necesario colocar una solera de hormigón pobre o arcilla. La permeabilidad de las paredes debería ser, como mínimo, 1000 veces inferior a la del material filtrante para un mejor funcionamiento de éste.

Antes de colocar un tubo drenante sobre la solera debe limpiarse ésta de todos los productos que puedan contaminar filtros o tubos, especialmente, plásticos y papeles; y comprobar que los tubos no presentan roturas, abolladuras y obstrucciones.

Una vez colocado el tubo se comprobará que su pendiente es la adecuada y permite el libre flujo de agua a su través, procediendo a su limpieza y desobstrucción si fuese necesario. Sólo después de esta comprobación se colocará el material filtrante.

Cuando se utilicen láminas drenantes, se comprobará que no existen pliegues, desgarramientos o zonas de escaso solape que den lugar a discontinuidades que anulen la propia función de la lámina.

No se compactará el material filtrante colocado sobre el tubo hasta que haya un espesor sobre el mismo de 25 a 30 cm o mayor de 2 diámetros, realizándose la compactación por placas o rodillos vibratorios ligeros que eviten la rotura del tubo.

Se cuidará especialmente la terminación superficial de la zanja drenante, protegiéndola lo más rápidamente posible, bien con la subbase drenante, si se trata de una zanja bajo el firme o bien con una protección superficial en los demás casos.

En las zanjas colectoras drenantes que tengan una disposición transversal y oblicua al eje de la carretera, debe cuidarse, especialmente, la ejecución en cuanto a capacidad portante que ha de ser similar a las de las zonas adyacentes para evitar asientos diferenciales del firme que destruyan éste o produzcan irregularidades en la superficie.

Cuando el drenaje se realice por medio de drenes subhorizontales, se comprobará frecuentemente la alineación y la pendiente, tanto si se hincan como si se colocan en perforaciones pre-

vias, que en terrenos sueltos deben permanecer entubadas hasta la colocación del dren para evitar desmoronamientos.

En terrenos donde sea de tener colmatación del tubo por no cumplirse las condiciones filtro se deberá colocar alrededor del tubo una lámina drenante para proteger al dren subhorizontal.

La separación entre filas y drenes subhorizontales de una fila debe determinarse por cálculo pero en la mayoría de los casos, se colocan a distancias de 5 a 8 m. entre drenes y de 2 a 4 m. entre filas de drenes.

La impermeabilización del terreno en la zona final de un dren subhorizontal puede conseguirse con inyecciones impermeabilizantes, con material arcilloso, con encachados de piedra u otros métodos que sujeten, al menos, una profundidad de 7 a 10 diámetros.

En la ejecución de espaldones drenantes deberán tenerse en cuenta la estabilidad del talud del terreno, ya que al ser su pendiente mayor que la definitiva y cercana a la crítica, antes de colocar el relleno podrían producirse deslizamientos. En cualquier caso, el material filtrante deberá colocarse lo más rápidamente posible.

La ejecución de los rellenos de material filtrante en el trasdós de muros requieren las mismas precauciones que los rellenos en zanjas, tanto en lo que se refiere a los tubos como al filtro o telas drenantes. En especial, hay que tomar precauciones para no desestabilizar el muro empujando tongadas máximas de 15 cms. que pueden compactarse con placas vibrantes o rodillos ligeros, a ser posible de menos de 500 kg. de peso estático.

Los tubos de drenaje acceden a arquetas de conexión con otros tubos de drenaje y a arquetas de desagüe, donde parte el tubo de evacuación del agua de drenaje fuera de la explanación. El tubo de desagüe tiene que tener una cota más baja que los tubos de drenaje que acceden a la arqueta. Este aspecto es extraordinariamente importante cuando a las arquetas acceden también tubos de recogida de aguas pluviales. Lo ideal sería que la cuna del tubo de drenaje más bajo estuviera 25 cms. más alta que la corona del tubo de desagüe y que la cuna de éste estuviera a su vez 25 cms. o $\frac{1}{2}$ diámetro de tubo más alta que el fondo de la arqueta.

Normalmente, los tubos de desagüe no están perforados para conducir el agua sin pérdidas. Por otra parte, el material de relleno de las zanjas con tubos de desagüe suelen ser impermeables para impedir lo más posible la subida del agua hacia la parte alta de la explanada.

Es conveniente dotar a los tubos de desagüe de una tapa basculante que evite la entrada de animales o residuos y que se abra con una ligera presión interior del agua.

Los tubos de desagüe deben estar claramente señalizados con un poste de material duradero, cuyo objetivo es facilitar el mantenimiento.

Una de las misiones que cumplen estos postes señalizadores es la advertencia a los operarios de trabajos de mantenimiento de taludes para que no se tapen los desagües con tierra vegetal o plantaciones.

5. CONTROL DE CALIDAD DEL DRENAJE SUBTERRANEO

El control de calidad de los elementos y sistemas de drenaje está en relación con la importancia que esta unidad de obra en el comportamiento estructural posterior de la carretera.

A continuación dividimos los ensayos de control de calidad en:

- 5.1. Ensayos previos (EP).
- 5.2. Ensayos de construcción (EC).
- 5.3. Ensayos finales (EF).
- 5.4. Ensayos especiales (EE).

Expresando para cada uno de ellos, la especificación, la finalidad, la frecuencia de los ensayos y la importancia relativa de los mismos (N. Necesario, C. Conveniente).

DRENAJE SUBTERRANEO				EP
5.1.	Tipo de control	Especificación	Finalidad	Impor.
	1. Resistencia mecánica de los tubos drenantes.	Norma ASTM-C 497-72 R = Carga de rotura en kgf/m. $\varnothing < 35$ cm; $R > 1000$ $35 < \varnothing < 70$ cm; $R > 1400$ $\varnothing > 70$ cm; $R > 2000$	Comprobar la resistencia a las cargas de tierras sobre el tubo y a las tensiones producidas por el tráfico.	1 ensayo en 1 m. lineal de tubo cada 1000 m. En tubos de plástico por certificado de ejecución en una misma partida 1 cada 2000 m.
	2. Permeabilidad de los tubos.	50 l/min. por cada kgf ² de carga hidrostática.	Comprobar el grado de filtrabilidad y capacidad de desagüe de los tubos.	Id. 1.
	3. Características geométricas en tubos rígidos.	Flecha máx. 1 cm/m.	Determinar el grado de calidad de la ejecución de los tubos, su homogeneidad y limitar los problemas de desagüe hidráulico.	1 ensayo cada 500 m de tubo.
	4. Desgaste de los Angeles para áridos de filtro.	Norma NLT-149/72 DLA < 40	Comprobar que los áridos no son friables ni se deterioran por efecto de las cargas.	1 ensayo cada 3.000 m ³ o fracción si no se ha hecho dentro del conjunto de la obra.
	5. Proctor Normal para áridos de filtro.	Norma NLT-107	Determinar la densidad patrón para comparar con ella la compactación del material filtrante.	1 ensayo cada 2000 m ³ .
	6. Granulometría de áridos para filtros cuando no se empleen láminas drenantes.	Tamaño máximo < 76 mm. Cantidad que pasa por el tamiz 0,080 mm inferior al 5 %. Norma NLT-150	Proporcionar una adecuada permeabilidad y proteger los tubos del punzonamiento.	1 cada 2000 m ³ .
	7. Condiciones filtro del material de relleno cuando no se empleen láminas drenantes.	F_x = tamaño superior al del x % en peso del filtro. D_x = Id. del terreno. $F_{15} = D_{85} < 5$ (a) $F_{15} = D_{15} > 5$ (b) $F_{50} = D_{50} < 25$ (c) $F_{60} = F_{10} < 20$ (d) En terrenos cohesivos $F_{15} < 0,1$ mm.	Evitar la contaminación del filtro por los finos del terreno. Se considera terreno a la fracción de este inferior a 25 mm.	Id. 5.

INFLUENCIA DEL DRENAJE SUBTERRANEO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CARRETERAS

	En terrenos no cohesivos $F_{15} < 1$ mm. En terrenos cohesivos homogéneos puede sustituirse (a) y (b) por $0,1 \text{ mm} < F_{15} < 0,4 \text{ mm}$.			
	En drenes ciegos $D_{60} / D_{10} < 4$. Tamaño máximo $> 20 \text{ mm}$. y $< 80 \text{ mm}$.			
8. Condiciones de estabilidad y antiarrastré del filtro cuando no se empleen láminas drenantes.	En tubos perforados con agujeros de diámetro $P F_{85}/P > 1$ En tubos con juntas de ancho $J F_{85}/J > 1,2$ En tubos de hormigón poroso de áridos con granulometría $d F_{85}/d_{15} > 0,2$ En mechinales de diámetro $M F_{85}/M > 1$	Evitar el deterioro del material filtrante por arrastre de finos e inclusión de éstos dentro del cuerpo del tubo. Se considera como terreno a la fracción de éste, inferior a 25 m.	Id. 5	N
9. Equivalente de arena del material filtrante.	Norma NLT-113 EA > 30	Limitar el contenido de finos del material filtrante para asegurar su permeabilidad y evitar la colmatación de los tubos.	Id. 5	N
10. Resistencia a la rotura de láminas drenantes. R_t	Norma AFNOR-C-07001 $R_t > 10000 \text{ N/ml}$. ($R_t > 1000 \text{ Kf/ml}$) Alargamiento $> 10 \%$ Valores dobles en láminas horizontales.	Comprobar la resistencia de las láminas a los esfuerzos mecánicos producidos por la ejecución de la obra y el tráfico.	1 ensayo cada 1000 ml. o cada 5000 ml. si hay certificado de fabricación.	N
11. Desgarramiento de láminas drenantes. R_d	Norma AFNOR-C-37104 $R_d > 250 \text{ N/ml}$. ($R_d > 25 \text{ Kf/ml}$.) Valores dobles en láminas horizontales.	Comprobar la resistencia al desgarramiento en obra por acción de la maquinaria o por el proceso de colocación.	Id. 9.	N
12. Permeabilidad de láminas drenantes.	Id. 2. Y además la permeabilidad bajo presión de 2 kg/cm^2 no será inferior en 100 veces a la permeabilidad sin carga.	Comprobar el grado de permeabilidad de la lámina.	1 ensayo cada 5000 m ² de lámina o cada 20.000 m ² si existe certificado de fabricación que incluya este ensayo.	N
13. Durabilidad de láminas drenantes.	Estables hasta 100°C . Resistentes a soluciones de pH de 5 a 9 sin pérdida de masa superior al 0,25 % de la inicial.	Evitar deterioros de las láminas por efecto de las temperaturas, aguas del terreno y agentes agresivos que intervengan en la ejecución de la obra.	1 ensayo cada 20.000 m ² o fracción si no existe certificado de idoneidad.	c
14. Condiciones de anticontaminación de láminas drenantes.	En láminas tejidas O_{95} es el orificio de la malla que deja pasar el 95 % del terreno uniforme. O_{95} = tamaño de poro. En láminas no tejidas $O_{95} =$ $e \left(\frac{\sqrt{2\pi(1+e)}}{4} - 1 \right)$ e = diámetro de las fibras. e = índice de huecos.	Evitar la colmatación de la lámina drenante.	Id. 12.	N

INFLUENCIA DEL DRENAJE SUBTERRANEO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CARRETERAS

Se cumplirá en general:
 $O_{95} < d_{90}$ (suelo)
 $O_{95} \leq 10 d_{50}$ (suelo)
 o bien:

$$\frac{O_{95}}{d_{50}} \leq \left(\frac{d_{60}}{d_{50}} \right)^{0.9}$$

En láminas no tejidas:

a) No comprimidas a más de 20g/cm².

$$50 \mu < O_{95} < 80 \mu$$

b) Comprimidas a más de 2kg/cm²

$$15 \mu < O_{95} < 50 \mu$$

5.2.	DRENAJE SUBTERRANEO				EC
Tipo de control	Especificación	Finalidad	Frecuencia	Impor.	
1. Densidad in situ del material filtrante.	NLT-109 > 95 % Proctor Normal.	Comprobar la densidad obtenida al compactar el material filtrante. Ver RP.	5 ensayos cada 1000 m ³ o cada 1500 ml de zanja.	C	
2. CBR in situ.	NLT-112 CBR > CBR de la sub-base empleada o CBR > 20.	Id. 1. Cuando no pueda realizarse la densidad in situ.	Id. 1.	C	
3. Solape de bordes de lámina drenante.	Solape > 10 cm. 0 > 20 % ancho de la zanja.	Evitar la contaminación del material drenante encerrado por las láminas drenantes, a través de las juntas.	En toda la superficie de la lámina.	C	

5.3.	DRENAJE SUBTERRANEO				EF
Tipo de control	Especificación	Finalidad	Frecuencia	Impor.	
1. Ensayo de funcionamiento.	Caudal por m ² = = Q = S.K. S = Superficie de ensayo. K = Permeabilidad del filtro.	Comprobar que la superficie de la zanja o capa filtrante (con tubo y/o tela drenante) absorbe el caudal previsto.	1 sección de ensayo cada 3000 m ² o fracción. Un ensayo por cada sistema drenante.	C	
2. Placa de carga comparativa.	Diferencia de valores menor del 25 %	Comparar la capacidad portante de la zona de filtros respecto a la zona adyacente de la explanada o sub-base que esté a la misma cota que la parte superior del material filtrante.	2 ensayos adyacentes, uno sobre el filtro y otro sobre la explanada cada 4000 ml de zanja drenante o zona diferenciada.	C	
3. Hincas de barras en la parte superior del material filtrante compactado.	Comparación de resultados.	Detección de zonas descompactadas y de heterogeneidades. Precaución para no dañar los tubos.	En zonas especiales o cada 50 m.	C	

5.4.	DRENAJE SUBTERRANEO				EE
Tipo de control	Especificación	Finalidad	Frecuencia	Impor.	
1. Paso de un eje de 13 T.	Transversalmente a la zanja drenante. Longitudinalmente en capas drenantes.	Comprobar que el grado de compactación es similar en la zanja de material drenante y en la explanada. Comprobar la homogeneidad de capas drenantes. La huella debe ser inapreciable.	A lo largo de una calle longitudinal en capas drenantes. Cada 1000 en zanjas drenantes.	C	
2. Prueba de funcionamiento de tramos entre arquetas.	Tubo drenante a media y plena carga.	Comprobar que el caudal que conducen los tubos de drenaje es el previsto en el cálculo y no hay fugas, obstrucciones o sobrepresiones.	Un tramo de cada 50, escogido de manera aleatoria.	C	

INFLUENCIA DEL DRENAJE SUBTERRANEO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CARRETERAS

3. Resistencia al punzonamiento de los geotextiles y de las geomembranas.	Norma BAW III-75/4 No habrá perforación al dejar caer un vástago de 300 N desde 2 m de altura.	Comprobar que los geotextiles y geomembranas resistan al punzonamiento producido por el empuje lateral o superior de gravas y a la maquinaria de obra.	Id. EP-12	C
4. Aplastamiento de tubos.	Carga transversal de 100 kg sobre una pieza de madera de 10 cm de ancho.	Comprobar que no se aplasta el tubo por cargas moderadas similares a las que se pueden dar en obra.	1 ensayo cada 200 tubos o 200 ml si no hay certificado de la casa suministradora.	C

6. CONSERVACION DEL DRENAJE SUBTERRANEO

La eficacia de un buen sistema de mantenimiento está fuera de toda duda, debido a la notable reducción de costes totales que proporciona. Dentro de un programa de mantenimiento general de la carretera hay que establecer algunas precauciones especiales respecto al programa de drenaje.

La limpieza de polvo, barro, residuos y otros materiales de la superficie de la calzada y arce- nes, además de ser necesario para la seguridad de la circulación, es muy conveniente para pre- venir colmataciones de bases drenantes y tubos porosos. La precaución a tener en cuenta es que todos estos residuos, si se vierten en los terra- plenes, no deben obstruir las salidas de los de- sagües, ni ocultar los postes de señalización.

Las salidas de los tubos de desagüe deben inspeccionarse, al menos, cada tres meses pa- ra asegurarse de que no están obstruidas o di- minuidas su capacidad, por crecimiento de hier- ba, arrastres, desprendimientos, impactos, nidos de animales, etc.

En los postes de señalización de desagües es conveniente colocar un letrero con la indicación «dren subterráneo», «tubo de drenaje» o «tubo de desagüe» visible desde la carretera y dispo- ner de un croquis sencillo de situación de pos- tes para reponer, si es necesario, alguno de ellos que haya desaparecido.

Las arquetas donde accedan tubos de drenaje deben ser practicables para una posible inspec- ción periódica y para efectuar la comprobación del funcionamiento de los tubos y su desobs- trucción, si fuera necesario.

En el caso de que, por razones de construc- ción, fuera necesario realizar arquetas ciegas sin posibilidad de registro por hallarse en el pavi-

mento, conviene, al menos, colocar un tubo ver- tical con tapa, de pequeño diámetro para efec- tuar pruebas de drenabilidad real por tramos, mediante uso de agua a baja presión.

La disposición ideal de los drenes longitudi- nales depende del tipo de sección transversal y del tipo de tráfico y pavimento, pero, en la ma- yoría de los casos, deben colocarse en el arcén, en la zona más cercana al pavimento donde no haya excesivo riesgo de circulación constante, pues en esta disposición pueden colocarse ar- quetas accesibles y proceder a una adecuada limpieza y conservación.

Como resumen, puede decirse que los siste- mas de desagüe y drenaje deben mantenerse li- bres de posibles obstrucciones de entrada y sa- lida, estando encargados los servicios de man- tenimiento general de comunicar al resto de los servicios cualquier modificación posible que pudiera afectar al drenaje, tales como, obstruc- ción de cauces naturales, obras de reparación en calzadas o terraplenes, modificaciones de trazado, nuevas construcciones, tendido de lí- neas auxiliares o de comunicación, etc.

7. RESUMEN GENERAL

La mayoría de los pavimentos de carreteras y aeropuertos construidos en los últimos años tienen sistemas de drenaje lento, en general de- bido a las tendencias de los proyectos, que da- ban más importancia a la densidad y estabilidad que al drenaje del agua superficial de filtración.

Durante los periodos de tiempo en que los pa- vimentos soportan el tráfico con agua libre en el interior de sus secciones estructurales, los da- ños son del orden de mil veces superiores que cuando no existe agua libre, en muchos casos y desde luego, del orden de 50 veces más, siempre.

Las grandes cantidades de dinero que se gastan en reparación de pavimentos pueden atribuirse, casi por entero, a no haber tenido en cuenta los impactos del tráfico en firmes con agua libre, además conviene estimar en los proyectos el coste total, respecto a los años de vida útil y nivel de servicio.

Si se quieren reducir los costes de reparación a un mínimo, las especificaciones de proyecto deben modificarse, dotando a las secciones transversales de capas drenantes capaces de eliminar el agua libre rápidamente sin esperar días o semanas.

En algunas ocasiones se han empleado subbases o bases de alta permeabilidad a causa de sus buenas capacidades protantes, pero no se han tratado como drenes, dotándolas de tuberías y, por consiguiente, han dado malos resultados. Todas las capas permeables bien desagüadas se han comportado con éxito.

Debe desterrarse la idea de que el sistema de drenaje de un proyecto es un factor poco importante y que influye poco en el comportamiento del firme. Esta idea es totalmente errónea.

Existe un desequilibrio entre la importancia del drenaje y la utilización de datos para su cálculo que suelen ser escasos y mal estimados.

Las acciones dinámicas de las cargas de tráfico producen en todas las capas saturadas una decohesión que destruye la resistencia mecánica de las mismas, sin embargo, los ensayos que sirven para fijar los parámetros de cálculo, no tienen en cuenta estas acciones dinámicas.

Las reglas experimentales, intuiciones y estimación de variables, sobre todo, la permeabilidad, conduce frecuentemente a errores considerables. Los métodos de cálculo deben basarse en fórmulas racionales, para las cuales es una buena iniciación la fórmula de Darcy para movimientos laminares de agua en medios porosos.

La estimación de caudales de entrada de agua al pavimento debe tener en cuenta todas las posibles vías de aportación de agua, aunque las más importante son las filtraciones superficiales y las de zonas laterales.

La estimación de caudales de salida de agua del pavimento debe tener en cuenta todas las posibles vías de eliminación de agua, pero por

razones de seguridad, sólo debe contarse con la del sistema del drenaje.

Es necesario limitar el tiempo en que el agua permanece saturando las capas, calculando el drenaje para que evacúe esté agua en exceso en un tiempo normal de 1 hora para la mayoría de los casos.

Para el cálculo de caudales de filtración superficial debe usarse el equivalente a una lluvia de 15 a 25 mm/hora, afectado de un coeficiente de 0,50 a 0,70 en pavimentos de hormigón y de 0,30 a 0,50 en pavimentos asfálticos.

Las capas drenantes deben protegerse de la colmatación de los finos del suelo arrastrados por el agua, mediante la interposición de capas granulares seleccionadas o, mejor aún, por ser más rápido y económico, por la protección de láminas drenantes o geotextiles que separen el dren del suelo o capa a drenar.

La granulometría y el tamaño máximo de capas filtrantes ha de guardar unas relaciones geométricas precisas con los correspondientes parámetros del suelo. De igual manera, el tamaño del poro de las láminas drenantes ha de estar relacionado con la granulometría del suelo, para garantizar un buen funcionamiento del sistema.

Todas las disposiciones constructivas durante la ejecución de un sistema de drenaje están encaminadas a evitar la suciedad, obstrucción y roturas de filtros, tubos, arquetas, láminas y demás elementos del drenaje, que son muy sensibles a este tipo de daños durante la construcción.

El control de calidad del sistema de drenaje subterráneo ha de estar compuesto por ensayos previos de materiales, de construcción, de aceptación final y especiales, a los cuales se le debe dar la importancia que se deriva, de la influencia del drenaje en el comportamiento general de la carretera.

La conservación del sistema de drenaje se compone de un conjunto de acciones cuyo objetivo común es la continuidad del funcionamiento del dren a lo largo del tiempo, inspeccionando si hay obstrucciones en tubos de drenaje, arquetas, tubos de desagüe o válvulas de salida.