

Aridos y capas no tratadas

Por D. Manuel Rivas Cervera
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular E.T.S. de Madrid

1. Drenaje de los firmes. Ensayo de laboratorio de permeabilidad del material granular

1.1 Introducción

EL drenaje de los firmes contribuye de una manera importante al adecuado comportamiento estructural de los mismos, hecho del que nos ilustran las referencias que se exponen a continuación.

Un estudio de la Federal Highway Administration (USA) sobre el comportamiento de los firmes en presencia de agua, frente a su comportamiento en estado seco, concluyó que en el primer caso el efecto de las cargas aplicadas por los vehículos pesados es muy superior al producido en el segundo.

Lo cual llevó a recomendar que

los firmes deben contener en su estructura, debajo de las capas impermeables, una capa granular abierta de elevado coeficiente de permeabilidad que abarque toda la anchura de la plataforma. El sistema de drenaje se completa con sendos colectores laterales dotados de los correspondientes desagües de manera que evacúe lo más rápidamente posible el agua infiltrada.

En el estudio se advierte del peligro que supone la ausencia de los colectores laterales, puesto que si el agua, infiltrada en la capa drenante no encuentra una rápida salida, puede almacenarse en ella formando una "bañera" que ocasionaría mayores daños a las capas superiores del firme que aquéllos que se pretenden evitar mediante un drenaje rápido y eficaz.

Todo ello se apoya en un estudio económico en el que se justifica que el coste adicional del sistema de drenaje compensa ampliamente debido a la mayor duración del firme



y el menor mantenimiento frente a los firmes no drenados de similares características.

Todo esto queda recogido en la "Guidelines for the Design of Sub-surface Drainage Systems for Highway Structural Sections" (7). En la que se recomienda para carreteras de tráfico pesado un sistema de drenaje que permita la evacuación del agua infiltrada en el firme en un período de media hora en zonas frías. Incrementándose a una hora en las



Circunvalación sur-oeste de Leganés a los dos años de puesta en servicio. (No han aparecido irregularidades superficiales ni defectos estructurales)

COMITE DE MATERIALES



Circunvalación sur-oeste de Leganés. Tramo de ensayo con una base granular drenante (abierta, sin finos)

restantes zonas.

Entrando en modelos hidráulicos de drenaje en sentido vertical y drenaje lateral, con el tiempo de una hora, se obtienen los siguientes coeficientes de permeabilidad de las capas drenantes:

- drenaje en sentido vertical: $K = 5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$
- drenaje lateral: $K = 250 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$

Ambos valores son superiores a los coeficientes de permeabilidad que H.R. Cedergren (4) atribuye a

las capas granulares de granulometría continua.

El mismo autor presentó en el 67th Annual Meeting of Transportation Research Board (5) la comunicación titulada "Why all important pavements should be well drained", donde expone que la presencia de agua en los firmes que carecen de drenaje, acelera su deterioro y afirma que un buen sistema de drenaje profundo puede alargar la vida de servicio de los pavimentos

3 ó 4 veces.

El interés por delimitar las características drenantes de las capas granulares, y la influencia que ejerzan en el comportamiento del firme se han hecho patentes en los últimos Congresos Mundiales de Carreteras.

Así, por ejemplo, en el XVI Congreso (1), España atribuyó una gran importancia a las características drenantes de las capas de base y subbase no tratadas debido a los problemas de inestabilidad, que se

“Una de las conclusiones adoptadas por el Comité Técnico de Firmes Flexibles es la exigencia de especificar las características de permeabilidad de las subbases, sobre todo en las regiones tropicales.”

deban en estas capas a causa de la insuficiente capacidad drenante que estaban manifestando.

En el XVII Congreso (2) se destacó lo siguiente:

- La mayoría de los informes no establecen el coeficiente de permeabilidad (K) de las capas granulares, pues las especificaciones relativas a la granulometría deben ser suficientes para asegurar la necesaria capacidad de drenaje. Entre los países con inviernos rigurosos, sólo Polonia y Bulgaria especifican un valor de K. Por ejemplo, para subbases, Bulgaria indica un valor mínimo de $2 \cdot 10^{-3}$ cm/s en autopistas, y de 10^{-3} cm/s en demás carreteras;
- varios países de clima tropical o árido, en los que las precipitaciones son fuertes y concentradas en determinados períodos, se reconoce que es importante establecer un adecuado nivel de permeabilidad. Añadiendo que las capas de subbase deban ser más permeables que las de base.

Una de las conclusiones adoptadas por el Comité Técnico de Firmes Flexibles es la exigencia de especificar las características de permeabilidad de las subbases, sobre todo en las regiones tropicales.

En el último Congreso (3), varios países recomiendan en firmes flexibles la utilización de capas granulares con un coeficiente de permeabilidad K superior a 10^{-3} cm/s, cuando se dé alguna de las siguientes circunstancias:

- inviernos rigurosos (heladas)
- lluvias puntuales de gran intensidad
- explanadas con materiales sensibles al agua
- niveles freáticos elevados

También se pone de manifiesto que la permeabilidad, como carac-

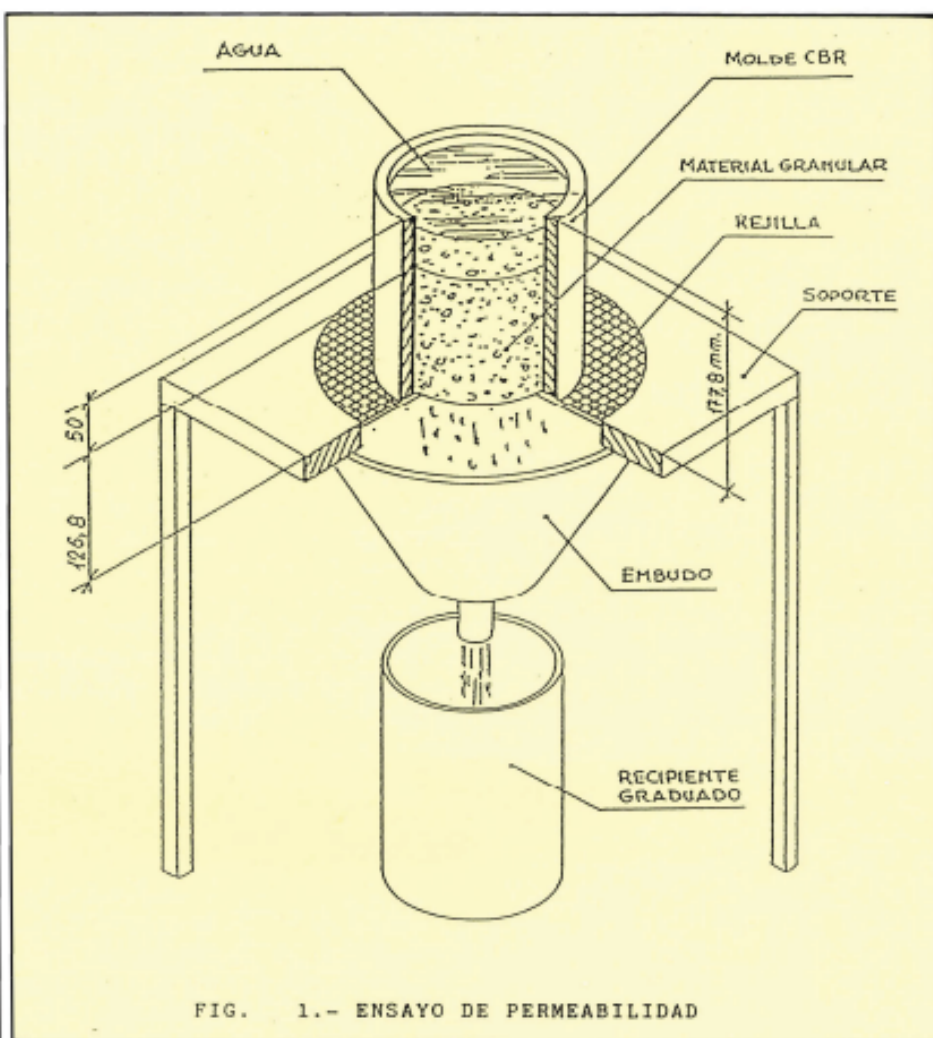


FIG. 1.- ENSAYO DE PERMEABILIDAD

terística de los materiales granulares, sólo se determina de una manera indirecta por alguna de las siguientes propiedades, según los países:

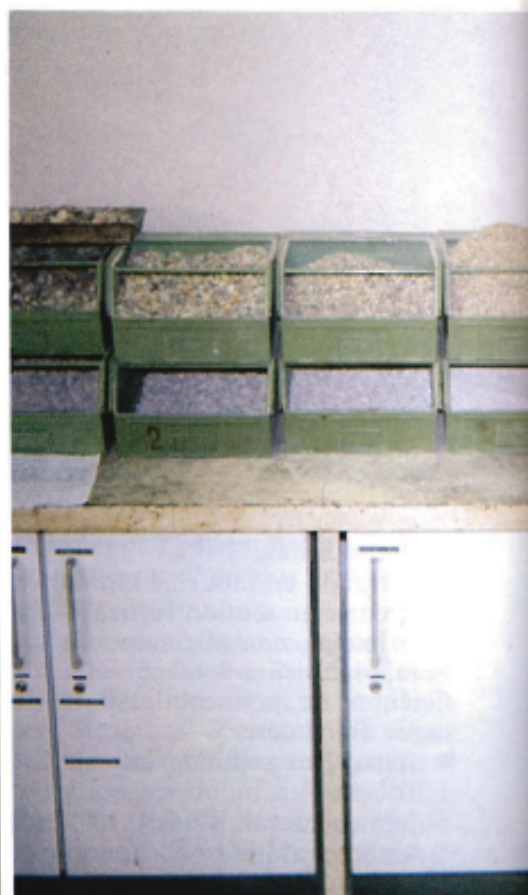
- granulometría
- índice de plasticidad
- densidad

No disponiéndose de un ensayo de permeabilidad de aplicación directa sobre el material.

También se señala que un factor determinante que asegura la duración de los firmes que presentan en su estructura alguna capa granular, está en la suficiente permeabilidad de dicha capa. Indicándose la necesidad de profundizar en el estudio de la capacidad de soporte de las capas drenantes y abiertas.

En un texto del siglo pasado sobre proyecto de carreteras (5) ya podía leerse: “Sólo hay tres cosas necesarias para obtener un buen firme: drenaje, drenaje, y más drenaje”...

1.2 Ensayo de laboratorio de permeabilidad del material granular. Descripción



Material granular. Acopios en Laboratorio



Material granular. Distribución por tamaños

A continuación se describe el ensayo diseñado y puesto a punto por el autor en el Laboratorio de Caminos de la Escuela T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

1. Objeto

1.1 Se describe el procedimiento de ensayo para la determinación del

coeficiente de permeabilidad de material granular sin ningún tipo de conglomerante.

2. Aparatos y material necesarios

2.1 Un molde de metal cilíndrico de 152,4 mm de diámetro interior y de 177,8 mm de altura, provisto de un collar supletorio de 51 mm de altura.

2.2 Un disco espaciador circular de metal de 151 mm de diámetro y de 50,8 mm de espesor.

2.3 Mazas de compactación como las descritas en las normas de ensayo NLT-107 y NLT-108.

2.4 Una balanza de unos 20 kg de capacidad, y otra de unos 1.000 g cuyos errores en la pesadas sean inferiores a 2 g y 0,1 g respectivamente.

2.5 Tamices de la serie UNE.

2.6 Un recipiente graduado.

2.7 Un cronómetro.

2.8 Un soporte con rejilla de malla cuadrada de 2 mm de abertura y embudo, similar al de la Figura 1.

2.9 Material diverso de uso general como cuarteador, mezclador, cápsulas, probetas, espátulas, discos de papel de filtro de diámetro del molde, etc.

3. Procedimiento

3.1 Preparación de la muestra.

3.1.1 Se procede según la NLT-111/78 en la preparación y compactación del material.

3.1.2 Se coloca la probeta sobre el soporte, de manera que quede en la parte superior el hueco que origina el disco espaciador.

“ Si a los 10 minutos del vertido de agua en la probeta no se ha iniciado la caída de agua en el recipiente se concluye el ensayo, dando por resultado un material impermeable con un coeficiente de permeabilidad $K < 10^{-7}$ cm/s. ”

3.2 Permeabilidad

3.2.1 Se introducen en el hueco que deja el disco espaciador 900 cm³ de agua.

3.2.2 El vertido de agua se toma como origen de tiempo, momento en que se pone en marcha el cronómetro.

3.2.3 El agua se recoge en un recipiente graduado, haciendo lectura de tiempo a los 200 cm³ y 700 cm³.

4. Cálculos y resultados

4.1 Se determina el valor T(s), diferencia entre las lecturas de tiempo de 700 cm³ y 200 cm³.

4.2 El coeficiente de permeabilidad K (cm/s) se determina mediante la siguiente expresión:

$$K = 0,6852501 \frac{1}{T} \quad (1)$$

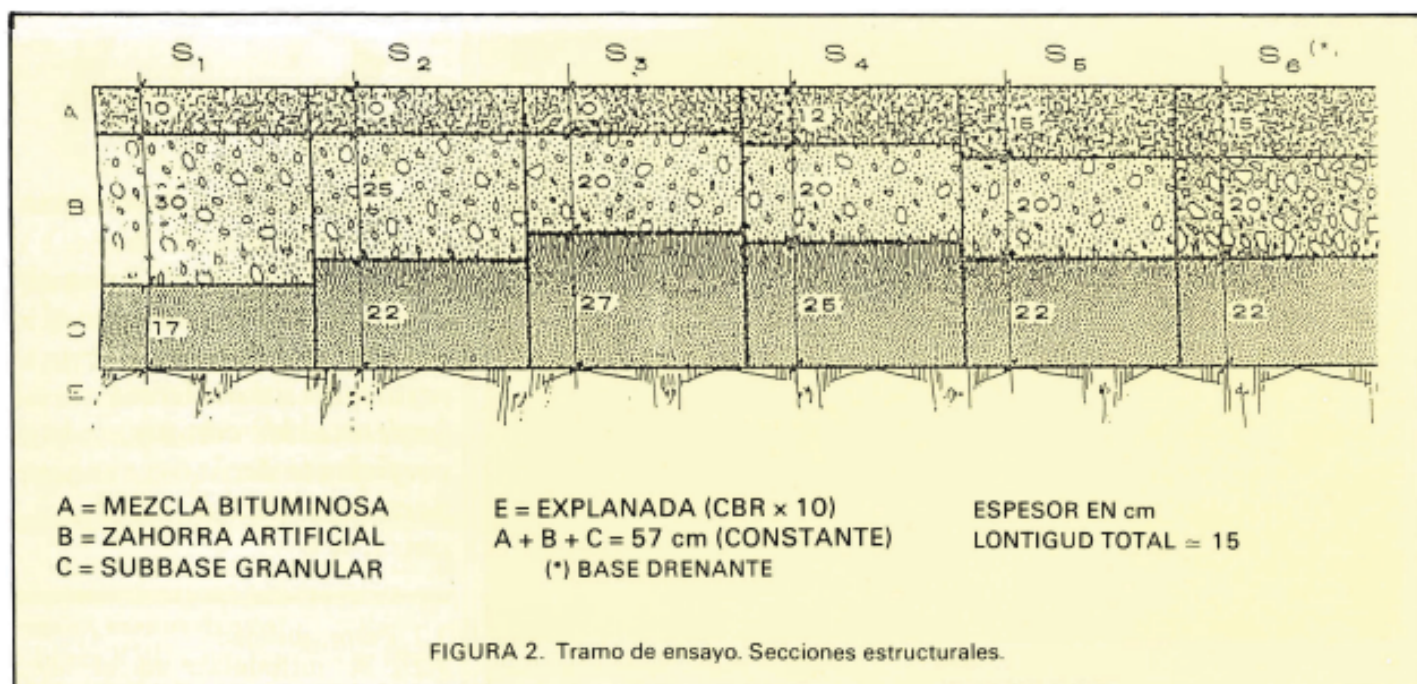
4.3 Si a los 10 minutos del vertido de agua en la probeta no se ha iniciado la caída de agua en el recipiente se concluye el ensayo, dando por resultado un material impermeable con un coeficiente de permeabilidad que puede expresarse como $K < 10^{-7}$ cm/s.

4.4 Si $T < 30$ segundos no se aplica la expresión (1), dando por resultado un material permeable con un coeficiente de permeabilidad que puede expresarse como $K > 20 \cdot 10^{-3}$ cm/s.

4.5 En cada probeta se repite 10 veces la determinación del coeficiente K. Tomándose como resultado del ensayo el último valor obtenido.

4.6 Para definir el coeficiente K de un material se ensayan tres probetas y se adopta como resultado el menor de los tres.





Límites de validez del ensayo

Henry Darcy en 1856 demostró experimentalmente para el flujo unidireccional de agua a través de las arenas de la ciudad de Dijon la ley que recibe su nombre:

$$V = K i$$

siendo K una constante de proporcionalidad que se denomina "coeficiente de permeabilidad", y que tiene las dimensiones de una velocidad; e i, el gradiente hidráulico.

Está demostrado matemáticamente (8) que la ley de Darcy es una consecuencia estricta de las ecuaciones de la hidrodinámica clásica aplicada al flujo de un fluido a través de un medio poroso siempre que se cumpla, entre otras condiciones, que las fuerzas de inercia sean despreciables respecto a las fuerzas de viscosidad, características del flujo laminar.

Diversos investigadores han encontrado que el valor del número de Reynolds a partir del cual deja de cumplirse la ley de Darcy en suelos, oscila entre 1 y 12. Indicando que dicho número se suele mantener en la práctica inferior a 1, excepto en gravas y arenas gruesas ($K \geq 10^{-1}$ cm/s).

Para números de Reynolds superiores a los anteriormente indicados, la importancia de las fuerzas de inercia (10) en el flujo esencialmente no uniforme de las partículas de fluido a través de los granos de suelo, hace que la ecuación correspondiente a la ley de Darcy se transforme en una ecuación del

tipo:

$$i = a + bv^2$$

siendo a y b constantes.

Por último, para números de Reynolds comprendidos entre 60 y 120 (11) el flujo se hace turbulento.

El apartado 4.4 de la propuesta de norma del ensayo de permeabilidad limita la sensibilidad del ensayo, debido a la capacidad de apreciación de los aparatos de medida y a las manipulaciones que se deben realizar a materiales con $K \leq 0,2 \cdot 10^{-1}$ cm/s.

Según los autores anteriormente mencionados, el régimen laminar se mantiene en suelos y capas granulares hasta valores de $K = 10^{-1}$ cm/s, límite en el que está incluido el campo de validez de este ensayo.

1.3 Resultados de la aplicación del ensayo

Los estudios realizados sobre la

“Para que una capa granular sea muy permeable ($K > 20 \cdot 10^{-3}$ cm/s), debe estar compuesta de material de granulometría abierta, sin arena, carente de elementos que pasan por el tamiz 5 UNE.”

permeabilidad de materiales empleados en capas granulares han arrojado las siguientes conclusiones:

1. Las capas granulares compuestas de material de granulometría continua con un contenido apreciable de finos (más del 5% que pasa por el tamiz 0,080 UNE) tienen un bajo coeficiente de permeabilidad (inferior a 10^{-7} cm/s).
2. Los cálculos hidráulicos realizados para determinar la capacidad drenante mínima que deben tener las capas granulares, para poder evacuar el agua de lluvia infiltrada en el firme, en un espacio de tiempo lo suficientemente breve, para minimizar el efecto de las cargas del tráfico sobre el firme saturado de agua, han arrojado un valor del coeficiente de permeabilidad (K) superior a 10^{-3} cm/s.
3. Para que una capa granular de granulometría continua tenga un coeficiente de permeabilidad (K) superior a 10^{-3} cm/s, debe estar limitado al 10% el material que pasa por el tamiz 1 UNE.
4. Las capas granulares descritas en el apartado anterior presentan una capacidad de soporte, medida en índice CBR superior a 90. Esto permite su empleo como capas de base.
5. Para que una capa granular sea muy permeable ($K > 20 \cdot 10^{-3}$ cm/s), debe estar compuesta de material de granulometría abierta, sin arena, carente de elementos que pasan por el tamiz 5 UNE.
6. Las capas granulares descritas en

“En las inspecciones visuales llevadas a cabo anualmente, no se ha apreciado ningún defecto estructural ni irregularidades superficiales, después de tres años de su puesta en servicio.”

el apartado anterior presentan una capacidad de soporte, medida en índice CBR, superior a 50. Esto permite su empleo como capas de subbase.

7. Las capas granulares descritas en el apartado 14, compactadas en seco (sin adición de agua), presentan una capacidad de soporte, medida en índice CBR, similar a la obtenida con adición de agua. Por tanto, resulta opcional la adición de agua en la puesta en obra.

1.4 Tramo de ensayo. Empleo de granulometrías abiertas

1. Introducción

La Dirección General de Carreteras de la Comunidad de Madrid proyectó en la “Circunvalación Sur-Oeste de Leganés” (carretera de 2 carriles de 3,5 m y arceles de 1 m, con una categoría de tráfico T2) un tramo de ensayo realizado en zona de terraplén compuesto de cinco subtramos de diferentes secciones (que se mantienen en los arceles), cuya composición estructural es de subbase y base granulares con pavimento de mezcla bituminosa, variando en ellos el espesor de las capas (Figura 2), manteniendo constante el espesor del firme.

Dicha Dirección General aceptó la propuesta del autor de añadir un sexto subtramo que introdujera una base granular abierta (sin finos) con las mismas dimensiones del subtramo S5. Los subtramos son de igual longitud (120 m), más 20 m de transición a ambos lados.

La obra se realizó en 1985.

2. Control de calidad

Se llevó a cabo en el laboratorio de Caminos un estudio de los mate-

riales previo a la ejecución de la obra. Y se realizó un control de ejecución mediante ensayos “in situ” en cada una de las capas del firme.

De la base drenante, elemento más singular del tramo de ensayo, se destacan las siguientes características:

- granulometría: carece de elementos inferiores a 6 mm;
- índice CBR = 52;
- coeficiente de permeabilidad: $K > 20 \cdot 10^{-3}$ cm/s;
- ensayo de carga con placa: $E2 > 900$ Kp/cm².

3. Seguimiento

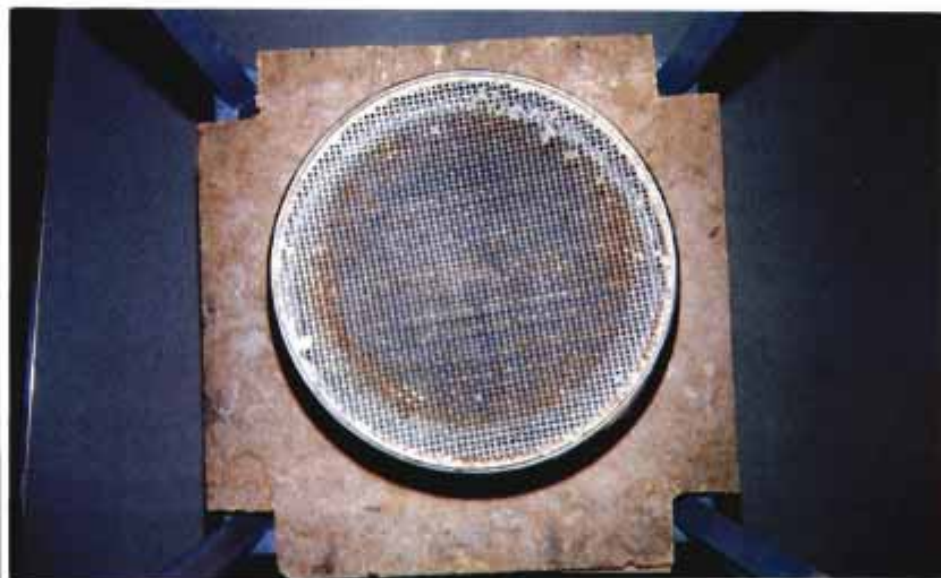
En las inspecciones visuales llevadas a cabo anualmente, no se ha apreciado ningún defecto estructural ni irregularidades superficiales, después de tres años de su puesta en servicio.

de rodadura en algunos puertos de montaña. En cambio, las variaciones de temperatura y humedad se puede considerar que afectan a la generalidad de las obras.

Para ello, se ha diseñado un ensayo que simule el efecto de estas dos acciones y que se describe a continuación, evaluándose las alteraciones referentes a:

- granulometría
- desgaste Los Angeles
- plasticidad

producidas por repetidas y alternativas inmersiones en agua y secados en estufa de muestras de estos materiales. Cada ciclo tiene 24 horas de duración, de las que 8 corresponden a la fase húmeda, y el resto a la operación de secado. El ensayo consta de un total de 25 ciclos, estableciéndose que la meteorización ocasionada en un ciclo equivale a la



Ensayo de permeabilidad. Soporte con rejilla

2. Meteorización de los materiales de las capas granulares. Ensayo

2.1 Introducción

Las modificaciones en las características de los áridos que componen las capas de base y subbase ocasionadas por el medio en que se halla la obra proceden de diversas causas, relacionándose a continuación las más importantes:

- oscilación de temperatura
- oscilación de humedad
- acción del hielo
- acción de sales

En España las heladas y las sales pueden afectar solamente a la capa

que se produce a lo largo de un año de servicio del firme (6).

2.2 Ensayo de meteorización mediante ciclos de humedad-sequedad

1. Objeto

1.1 Este ensayo tiene por objeto determinar en suelos y áridos la variación de:

- granulometría
- desgaste Los Angeles
- plasticidad

producidos por repetidas y alternativas inmersiones en agua y secados en estufa de muestras de estos materiales.

1.2 Para este ensayo se siguen dos métodos:



Ensayo de permeabilidad. Probeta conteniendo el material

la granulometría se tomarán las cantidades de árido que se indica en la norma NLT-150/72, procediéndose para su preparación según sea esa norma.

De igual modo se procederá con las normas NLT-149/72 para determinar la variación de desgaste Los Angeles; y las normas NLT-105/72 y 106/72 para determinar la variación de la plasticidad.

3.2 El ensayo consta de 25 ciclos, cada uno de 24 horas de duración.

Un ciclo se compone de dos partes:

- período húmedo, de 8 horas de duración. Procediéndose según indica el apartado 1.2 para cada método, debiéndose introducir el ma-

Método A. Para determinar la variación de granulometría y del desgaste Los Angeles se sumerge en agua el material.

Método B. Para determinar la variación de la plasticidad se añade una proporción de agua igual al óptimo del Próctor normal o modificado, según se trate de suelos o áridos.

2. Aparatos y material necesarios

2.1 Dos balanzas, una de 10 kg de capacidad, sensible al gramo, y otra de 200 g de capacidad, sensible a 0,01 g.

2.2 Una estufa de desecación, regulable, capaz de mantener una temperatura de $105 \pm 5^\circ \text{C}$.

2.3 Una cámara húmeda capaz de mantener una temperatura de $21 \pm 2^\circ \text{C}$ y una humedad relativa del 100 por 100.

2.4 Tamices UNE.

2.5 Una paleta para mezclas.

2.6 Bandejas de acero inoxidable para contener y transportar las muestras.

2.7 Una probeta de cristal graduada de 250 cm^3 de capacidad para medir agua.

2.8 Se utilizarán los aparatos y material indicados en las normas NLT-150/72, NLT-149/72, o NLT-105/72 y 106/72 según se trate de determinar la variación de granulometría, desgaste Los Angeles o plasticidad, respectivamente.

3. Procedimiento

3.1 Para determinar la variación de



Ensayo de meteorización. Material sumergido en agua



Ensayo de meteorización. Material en estufa de desecación

(NLT-171/86). Este Comité Técnico de Materiales ha considerado oportuno estudiar la repetitividad y reproductibilidad del ensayo mediante ruedas de ensayo entre diversos laboratorios. Proceso que se está desarrollando en la actualidad. Sin embargo, debido a su interés, se considera oportuno reproducir las conclusiones de un estudio de correlación entre este ensayo y el correspondiente ensayo de azul de metileno normalizado por AFNOR (Francia) con la referencia P 18-592, y que ha sido llevado a cabo por D. Juan Jose POTTI, miembro de este Comité.

3.2 Estudio de correlación entre el ensayo de azul de metileno realizado según la norma del Centro de Estudios de Carreteras NLT-171/86 y según la norma AFNOR P 18-592 (J.J. Potti, 1988)

Los resultados obtenidos al realizar 36 análisis con cada una de las normas en los siguientes filleres: Bentonita sódica, cal Tricalsa, cemento Asland PA-350, árido Mat y mezclas de los mismos han dado lugar a las siguientes conclusiones:

- 1) Se obtienen resultados coherentes en el ensayo tanto con la norma AFNOR como con la NLT.
- 2) Se observan dependencias lineales de la absorción de azul de metileno con el contenido de cada uno de los filleres en el filler resultante de las mezclas. Las ecuaciones que describen estas dependencias son:

Norma AFNOR, mezcla MAT-Bentonita:

$$y = 0,4431 (\text{MAT}) + 22,33 (\text{BENTONITA})$$

$$r^2 = 0,9928 \quad S_y = 0,3476$$

Norma NLT, mezcla MAT-Bentonita:

$$y = 0,4018 (\text{MAT}) + 22,25 (\text{BENTONITA})$$

$$r^2 = 0,9783 \quad S_y = 1,2181$$

Norma AFNOR, mezcla MAT-Tricalsa:

$$y = 0,3210 (\text{MAT}) + 0,1180 (\text{TRICALSA})$$

$$r^2 = 0,9341 \quad S_y = 0,0287$$

Norma NLT, mezcla MAT-Tricalsa:

$$y = 0,3170 (\text{MAT}) + 0,1340 (\text{TRICALSA})$$

$$r^2 = 0,9475 \quad S_y = 0,0349$$

- 3) Se puede considerar que existe igualdad práctica entre los resultados obtenidos con ambas normas.

La correlación entre los resultados responde a la ecuación:

$$\text{AFNOR} = 0,2265 + 1,0306 \text{ NLT}$$

$$r^2 = 0,9946$$

4. Otros trabajos en curso

Se están llevando a cabo estudios por miembros del Comité en los respectivos laboratorios donde desarrollan su actividad en los siguientes temas:

- Definición de angularidad mediante las caras de fractura en áridos rodados de grava que han sufrido un proceso de machaqueo.
- Repetitividad y reproductibilidad de la norma de ensayo del Centro de Estudios de Carreteras "Aridos. Determinación de la limpieza superficial" (NLT-172/86).
- Unificación de las prescripciones para los áridos a emplear en las diferentes unidades de obra de carreteras.

5. Bibliografía

1. ASSOCIATION INTERNATIONALE PERMANENTE DES CONGRES DE LA ROUTE (1979): "XVI Congrès Mondial de la Route". Wien.
2. ASSOCIATION INTERNATIONALE PERMANENTE DES CONGRES DE LA ROUTE (1983): "XVII Congrès Mondial de la Route". Sydney.
3. ASSOCIATION INTERNATIONALE PERMANENTE DES CONGRES DE LA ROUTE (1987): "XVIII Congrès Mondial de la Route". Bruxelles.

4. CEDERGREN, H.R. (1974): "Drainage of Highway and Airfield Pavements". New York.

5. CEDERGREN, H.R. (1988): "Why all important pavements should be well drained". 67th Annual Meeting, Transportation Research Board. Washington.

6. DAPENA, J.E. (1980): "Estudio de la influencia de la meteorización sobre las características de los materiales pétreos utilizados en el Proyecto de las Obras Públicas". Tesis Doctoral. Escuela T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

7. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1973): "Guidelines for the Design of Subsurface Drainage Systems from Highway Structural Sections". Washington.

8. JIMENEZ, J.A. et al (1975): "Geotécnica y Cimientos". Madrid.

9. RIVAS, M. (1988): "Estudio de los materiales granulares utilizados en capas de base y subbase en carreteras". Tesis Doctoral. Escuela T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

10. SHNEEBELI, G. (1955): "Experiences sur la limite de validité de la Loi de Darcy et l'apparition de la turbulence dans un écoulement de filtration". La Houille Blanche.

11. WRIGHT, D.E. (1968): "Non-linear flow through granular media". I. Hydraulics Div., A.S.C.E.



Dosificación del material en obra