

Sobre la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas (parte I)

About the permeability of dense graded asphalt mixes

FERNANDO SÁNCHEZ SABOGAL

Ingeniero civil
elexdos@yahoo.com

Recibido: 10/09/2011 Aceptado: 12/10/2011
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

La infiltración de agua a través de los vacíos interconectados de las capas asfálticas produce pérdidas de adherencia entre el ligante y los agregados, dando inicio a desprendimientos que pueden derivar en la destrucción del pavimento. Un primer paso para enfrentar los problemas causados por la presencia de agua en estos sistemas, consiste en cuantificar la permeabilidad de las mezclas asfálticas utilizadas en las capas de rodadura. Partiendo de datos sobre la granulometría de los agregados y sobre la permeabilidad y la composición volumétrica de núcleos de pavimentos asfálticos en servicio, se ha desarrollado una ecuación que permite estimar la permeabilidad de una mezcla asfáltica densa a partir de su porcentaje de vacíos con aire y de la granulometría de los agregados que la constituyen. La ecuación puede ser utilizada por los ingenieros de pavimentos para controlar los niveles de permeabilidad de estas mezclas tanto durante la fase de diseño, como durante su colocación en el terreno.

Palabras claves: mezcla asfáltica, permeabilidad, pavimento, vacíos con aire, carreteras.

Abstract

Infiltration of water through the interconnected voids of the asphalt layers produces the loss of the adhesive bond between the aggregate surface and the asphalt binder, initiating deterioration which can result in the destruction of the mat. A first step to face the problems caused by the presence of water in these systems is to quantify the in-place permeability of asphalt mixes used on the surface layers that wear traffic.

Based on data on the aggregate gradation and on the permeability and the volumetric composition of existing asphaltic pavement cores, an equation has been developed to estimate the permeability of a dense graded asphalt mix, starting from the percentage of air voids and the gradation of the aggregate that constitute it. The equation can be used by pavement engineers to control the permeability of these mixtures during the design phase as well as during its setting in-place.

Keywords: asphalt mix, permeability, pavement, air voids, highways.

INTRODUCCIÓN

El problema relacionado con la humedad en las mezclas asfálticas densas es la permeabilidad (1). Debido a que estas mezclas casi nunca son impermeables, la presencia de algún grado de humedad dentro de ellas es inevitable. Al permitir el ingreso de aire, agua y vapor de agua desde la superficie o desde la base, una elevada permeabilidad favorece el endurecimiento prematuro del asfalto, la pérdida de adherencia y el desprendimiento de partículas, lo que se traduce en una pérdida de soporte y de estabilidad (2).

Los investigadores y las agencias viales han reconocido siempre la necesidad de limitar la permeabilidad de las capas asfálticas superficiales de tipo denso para obtener pavimentos estables y durables. Un elevado volumen de vacíos con aire ha sido asociado frecuentemente con una alta permeabilidad. Hace más de 50 años, McLaughlin et al. (3) hallaron una relación directa entre el volumen de vacíos con aire y el coeficiente de permeabilidad de una mezcla densa compactada y llegaron a conjeturar que este último pronosticaba, mejor que la densidad, la posible durabilidad de la mezcla. En los años sesenta, Shklarsky et al. (4) encontraron una relación similar al ensayar una mezcla de arena asfalto y opinaron, además, que la ley de Darcy resultaba válida para estudiar el flujo de agua a través de los vacíos de un pavimento asfáltico denso. Zube (5) concluyó que las mezclas asfálticas densas se volvían excesivamente permeables al agua a partir de un contenido de vacíos con aire de 8% y, años más tarde, Brown (6) llegó a la misma conclusión. Algunos investigadores han sugerido emplear la permeabilidad como parte de los controles de calidad durante la construcción de las capas de rodadura de concreto asfáltico (7, 8).

Aunque desde los primeros estudios se había aceptado que, además de su contenido total, la continuidad y el tamaño de los vacíos con aire afectan la permeabilidad (5, 14), esta consideración sólo recibió suficiente atención a partir del momento en que se empezaron a construir las mezclas del tipo Superpave, las cuales mostraron, con alguna frecuencia, permeabilidades excesivas *in situ*, a pesar de contener volúmenes totales de aire inferiores al límite anteriormente citado (9). Encontrar mezclas densas con idénticos contenidos de vacíos con aire y coeficientes de permeabilidad muy diferentes ha sido frecuente en los últimos años.

Hasta el momento se han realizado numerosos estudios para analizar la incidencia que, sobre la permeabilidad, tienen diversos factores relacionados con las mezclas asfálticas (vacíos con aire, granulometría, tamaño máximo nominal de los agregados, contenido de asfalto en la mezcla, tipo y energía de compactación, espesor de la capa, etc.). Dada la dificultad práctica que aún se presenta para la ejecución rutinaria de las pruebas de permeabilidad sobre mezclas asfálticas compactadas, los autores de algunos de estos estudios han propuesto ecuaciones para estimarla de manera indirecta; sin embargo, no ha resultado posible la aplicación de ninguna de ellas con carácter general. Algunas sólo son aplicables a unas mezclas específicas, otras se han desarrollado a partir de los resultados de ensayos de permeabilidad efectuados sin apego a norma alguna, otras requieren la determinación de coeficientes de ajuste para cada caso particular y, por último, las dispersiones entre los valores de permeabilidad medidos y los calculados suelen ser amplias (4, 10, 9, 11).

PROPÓSITO DEL ESTUDIO

El propósito del presente estudio fue obtener una ecuación empírica, de aplicación general, para estimar el coeficiente de permeabilidad de un concreto asfáltico compactado en el terreno, a partir de propiedades elementales de la mezcla que sean de obtención rutinaria (contenido de vacíos y granulometría de los agregados), ecuación que pueda ser utilizada tanto en el diseño de las mezclas como en el control de su construcción, con el fin de prevenir el efecto adverso del agua sobre el comportamiento y la durabilidad de los pavimentos asfálticos.

El objetivo se alcanzó mediante el desarrollo de las siguientes tareas:

1. Análisis de los factores de una mezcla asfáltica de tipo denso que inciden sobre su permeabilidad.
2. Recopilación y análisis de modelos existentes para estimar la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas.
3. Elección de los parámetros requeridos para el desarrollo de la nueva correlación.
4. Recolección de datos, obtenidos bajo condiciones de ensayo debidamente normalizadas, en relación con el coeficiente de permeabilidad y con las propiedades de las mezclas asfálticas compactadas en el terreno.

5. Desarrollo de la ecuación de permeabilidad.

Verificación de la ecuación.

FACTORES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS QUE INCIDEN SOBRE SU PERMEABILIDAD

La revisión de la literatura permite inferir que son varios los factores asociados con las mezclas de concreto asfáltico que afectan su permeabilidad. Los resultados de todas las investigaciones coinciden en el hecho de que el contenido total de vacíos con aire de la mezcla es el factor de mayor incidencia potencial (3, 4, 5, 6, 9, 12, 13). Hudson y Davis (14) concluyeron que la permeabilidad dependía no sólo del porcentaje de vacíos con aire, sino también del tamaño de éstos. En otros estudios se indica que la granulometría de los agregados, su forma y su textura ejercen influencia sobre la manera como se interconectan los vacíos con aire dentro de la mezcla y, en consecuencia, sobre la permeabilidad (15). Igualmente, hay documentos que muestran la incidencia del espesor de la capa compactada y del tamaño máximo nominal del agregado, así como de la relación entre ellos sobre la permeabilidad (11, 13, 16, 17, 18, 19). Factores asociados con los equipos y el patrón de compactación también se han estudiado (5, 20, 21), aunque es evidente que ellos están ligados con los vacíos con aire finalmente obtenidos.

Vacíos con aire

Constituyen el factor potencialmente más incidente sobre la permeabilidad de una mezcla densa. A medida que éstos aumentan, la permeabilidad también lo hace. Massad et al. (22) reportan que pasar los vacíos con aire de 4 a 8% implica aumentar del orden de 18 veces el coeficiente de permeabilidad. La figura 1 ilustra una relación típica entre estos dos parámetros (11).

Cuando el volumen de vacíos con aire supera un valor crítico, la mezcla se hace muy permeable al agua y al aire. El primero produce los deterioros típicos asociados con la humedad, mientras que el aire genera oxidación y endurecimiento del ligante, haciendo la mezcla más propensa al agrietamiento prematuro.

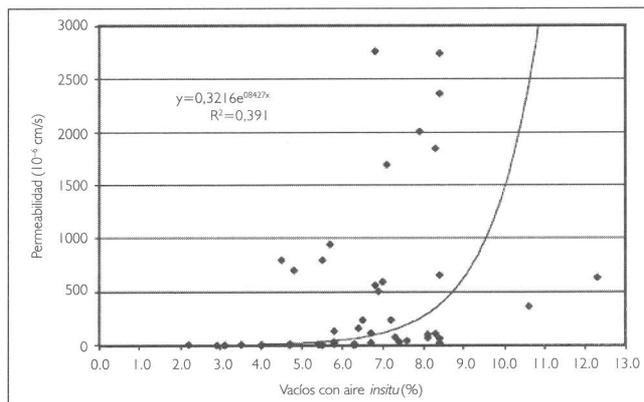


Figura 1. Relación típica entre los vacíos con aire y la permeabilidad de una mezcla densa compactada (11).

Factores asociados con los agregados pétreos

La granulometría es, quizás, la característica de los agregados que más incide sobre las propiedades y el comportamiento de una mezcla asfáltica densa. La distribución de los tamaños de las partículas influye prácticamente en todas las propiedades importantes de la mezcla, entre ellas la composición volumétrica, la permeabilidad, la estabilidad, la rigidez, la resistencia a la fatiga, la trabajabilidad y la resistencia al deterioro por acción del agua (23).

La forma de la curva granulométrica cumple un papel importante en la determinación del tamaño y la continuidad de los vacíos con aire en la mezcla compactada. Las gradaciones gruesas contienen una mayor cantidad de partículas de agregado grueso, lo que se traduce en un mayor volumen de vacíos con aire y en un mayor potencial para su interconexión. Referencias sobre ello aparecen tanto en publicaciones muy antiguas (3) como en otras recientes (24).

La permeabilidad presenta también una relación directa con el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado. A medida que éste aumenta, también lo hace el volumen de los vacíos con aire interconectados y, consecuentemente, el potencial de una alta permeabilidad de la mezcla (11). Por lo tanto, mientras mayor sea el TMN, es de esperar que el nivel de vacíos con aire a partir del cual la mezcla se hace excesivamente permeable sea menor. En otras palabras, para un contenido dado de vacíos con aire, las mezclas con agregados con mayor TMN serán más permeables. La forma típica como se produce esta variación se muestra en la figura 2. En ella se puede apreciar, sin embargo, que el efecto

sólo es verdaderamente marcado cuando los tamaños máximos nominales son mayores, pues las mezclas con los TMN más bajos (9.5 y 12.5 mm), que son las más empleadas en las mezclas densas, presentan características de permeabilidad muy similares.

Al estudiar mezclas del tipo Superpave para un determinado tamaño máximo nominal (TMN), Choubane et al. (9) encontraron que aquéllas cuya granulometría pasaba por encima de la línea de máxima densidad y de la zona restringida tendían a ser menos permeables que las mezclas gruesas, a igual cantidad de vacíos con aire.

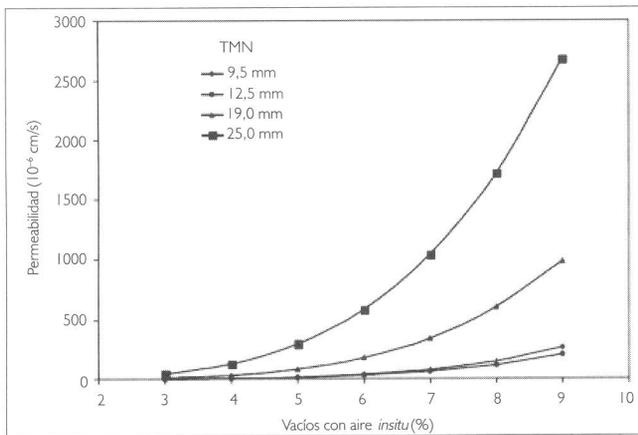


Figura 2. Efecto de los vacíos con aire sobre la permeabilidad en mezclas con distintos tamaños máximos nominales (10).

La forma de las partículas del agregado pétreo afecta el modo como éstas se acomodan dentro de la mezcla compactada. Aquéllas cuya forma tiende a la cúbica no se empaquetan de una manera tan apretada como lo hacen las aplanadas. Bajo la acción del tránsito, las partículas aplanadas tienden a orientarse horizontalmente unas sobre otras, dejando poco espacio entre ellas. Por esta razón, las especificaciones de construcción limitan el grado de aplanamiento de las partículas, con el fin de asegurar la formación de un volumen mínimo de vacíos en los agregados minerales (VAM) que permita alojar una cantidad suficiente de asfalto que prevenga su envejecimiento prematuro y que contribuya adecuadamente a la resistencia a la fatiga de la mezcla, a la vez que brinde suficientes vacíos con aire que prevengan afloramientos de ligante y deformaciones permanentes de la mezcla compactada.

La manera como se acomodan las partículas del agregado con una determinada gradación depende también

de su textura. Las texturas rugosas generan una mayor fricción entre las partículas y, consecuentemente, una mayor estabilidad de la mezcla compactada. Las caras de los fragmentos obtenidos por trituración tienen mayor rugosidad que las de los agregados rodados. El efecto práctico de ello es que, bajo un determinado esfuerzo de compactación y para el respectivo contenido óptimo de asfalto, los vacíos en los agregados minerales (VAM) y los vacíos con aire (VA) de una mezcla elaborada con mayor cantidad de agregados triturados son mayores. La tabla 1 presenta los resultados pertinentes de un concreto asfáltico ensayado durante una investigación realizada por Ruiz et al. (25), manteniendo constante la granulometría y reemplazando el pétreo de trituración por uno natural de la misma procedencia, con textura lisa.

Tabla 1
Efecto de la trituración del agregado sobre los vacíos de la mezcla (25)

Naturaleza del agregado	Propiedades de la mezcla óptima				
	Asfalto (%)	VAM (%)	VA (%)	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
Triturado	5,00	15,3	3,5	1285	4,2
Redondeado	3,75	12,2	3,2	511	2,1

Incidencia del ligante bituminoso

El asfalto afecta la compactación de la mezcla a través de su viscosidad. A mayor viscosidad del ligante, es de esperar que sea mayor la resistencia de la mezcla a la compactación. En consecuencia, se requerirá una mayor energía para alcanzar un determinado contenido de vacíos con aire. Por otra parte, las mezclas con bajo contenido de asfalto son más difíciles de compactar, debido a la carencia de lubricación. Así mismo, un bajo contenido de ligante trae como consecuencia una película muy delgada de éste sobre las partículas pétreas, cuyos efectos probables son su envejecimiento temprano y la posterior desintegración de la mezcla.

Método de compactación de la mezcla

El método de compactación repercute en la orientación que toman las partículas, a medida que éstas se alejan de la forma cúbica. La orientación alcanzada por las partí-

culas al ser compactadas en la vía suele ser diferente de la obtenida en el laboratorio empleando equipos como el de impacto Marshall, el compactador de amasado Hveem o el giratorio Superpave.

En una investigación realizada por el National Center for Asphalt Technology (NCAT) sobre un limitado número de muestras, se encontró una correlación aceptable entre la densidad y la permeabilidad de laboratorio para núcleos tomados del terreno y probetas elaboradas en el compactador giratorio Superpave, lo cual permitió concluir que estas últimas tenían el potencial para ser usadas con el fin de estimar el nivel necesario de compactación en el campo para producir una mezcla impermeable (10). Esta conclusión es opuesta a la efectuado en un estudio efectuado en la Florida en relación con la permeabilidad al agua de las mezclas Superpave de gradación gruesa (9), según la cual la estructura de los vacíos con aire de las probetas elaboradas en el compactador giratorio no era comparable con la hallada en probetas extraídas del terreno al mismo nivel de vacíos con aire.

Ante la duda que genera esta disparidad, parece prudente tener siempre en consideración el tipo de compactación al cual se somete la mezcla en el instante de estimar su permeabilidad en relación con su contenido de vacíos con aire.

Espesor de la capa compactada

Se suele considerar que el potencial de permeabilidad disminuye a medida que aumenta el espesor de la capa asfáltica. Ello se atribuye a dos razones (26): la primera, que las mezclas espesas son más fáciles de compactar debido a que retienen mejor el calor y permiten que el esqueleto granular se acomode de manera más apropiada; la segunda, que a medida que la capa tiene mayor espesor, disminuye la posibilidad de que los vacíos se interconecten en una longitud suficiente para permitir el flujo de agua.

Sin embargo, para que este principio general se cumpla, es necesario que exista una apropiada relación entre el espesor de la capa compactada (h) y el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado utilizado en la mezcla. Para un determinado TMN, se requiere que la capa tenga el espesor suficiente para que, al compactarla, las partículas del agregado se puedan orientar de modo que se obtenga la densidad deseada, previniendo una

permeabilidad excesiva. De acuerdo con estudios recientes (13), se sugiere que, para favorecer la compactación, la relación h/TMN sea cuando menos de tres (3) para las mezclas de gradación fina y no menor de cuatro (4) para las de gradación gruesa. Aunque es posible utilizar relaciones inferiores, se deberá tener presente que se requerirá una mayor energía de compactación para lograr el nivel de densidad exigido, a través del cual se controla en la práctica el contenido de vacíos con aire de la capa.

FACTORES RELACIONADOS CON EL ENSAYO DE PERMEABILIDAD

En los estudios realizados en relación con la permeabilidad de las mezclas asfálticas compactadas se han empleado diversos equipos y procedimientos de ensayo. En la mayoría de los casos, se ha utilizado el agua como fluido y el coeficiente de permeabilidad se ha determinado con la fórmula de Darcy. Su empleo implica suponer que la saturación de las muestras es total antes de comenzar el ensayo y que el flujo de agua es unidireccional y laminar durante el desarrollo de la prueba (27).

Los ensayos citados en la literatura incluyen tanto pruebas de laboratorio como de campo. En la mayoría de las pruebas de laboratorio se han utilizado permeámetros de carga variable, de empleo más sencillo y rápido que los de carga constante, y se ha usado el agua como fluido (12, 13, 27, 28, 29, 30). A la fecha no existe en los Estados Unidos de América un protocolo nacional normalizado en relación con el equipo y el procedimiento de ensayo; sin embargo, el método de prueba de mayor raigambre en los años recientes ha sido el del permeámetro Karol-Warner, adoptado provisionalmente por la ASTM bajo el estándar PS 129-01, tanto para ensayar probetas compactadas en el laboratorio como núcleos extraídos de pavimentos construidos. Aunque la ASTM retiró la norma en 2003, ella es equivalente a la vigente en algunos estados norteamericanos (31, 32, 33). En cuanto a las medidas de campo, éstas se han realizado empleando tanto dispositivos que utilizan aire (29, 34, 35, 36, 37) como agua (5, 10, 13, 16, 28, 29, 37, 38).

Existe una diferencia significativa entre los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos de laboratorio y los de campo, aun usando los mismos principios de

medición (39). La causa fundamental de ello es que el mecanismo de percolación del agua es distinto en los dos casos. En el laboratorio, la ley de Darcy resulta aplicable debido a que se puede garantizar el flujo unidimensional. En el terreno, por el contrario, la forma de determinarla ha de ser distinta, debido al carácter bidireccional del flujo.

Otros factores que hacen diferentes los resultados de campo y de laboratorio son el grado de saturación de la mezcla en el instante de la prueba, el tipo de flujo y las condiciones de borde de la misma. Aunque en un trabajo del NCAT se obtuvieron valores de permeabilidad similares en el campo y en el laboratorio sobre mezclas elaboradas con agregados con TMN no mayor de 12,5 milímetros (11), en la inmensa mayoría de los estudios se ha concluido que los valores de campo son consistentemente mayores que los obtenidos en el laboratorio y tanto mayores cuanto más permeable es la mezcla (39). Una explicación plausible para esta diferencia es que mientras en el laboratorio el flujo está restringido a la dirección vertical, en el ensayo de campo se dispersa horizontalmente, y tanto más cuanto más gruesa sea la gradación y mayor el TMN, por la mayor posibilidad que se presenta de interconexión de vacíos.

La medida de la permeabilidad en el terreno presenta, además, algunos problemas de tipo práctico (10): el grado de saturación de la mezcla no puede ser establecido con exactitud; el espesor de mezcla involucrado en la prueba de campo sólo puede ser conocido con precisión si se toman probetas en los sitios de ensayo, mientras que en las pruebas del laboratorio el espesor de la muestra siempre se conoce; en el ensayo *in situ* se debe estimar el área efectiva de pavimento a través de la cual fluye el agua, pues, como ya se mencionó, el flujo se dispersa horizontalmente más allá de los límites del recipiente de alimentación de agua del permeámetro. Igualmente, sin algún tipo de prueba destructiva, no es posible establecer si el agua fluye solamente a través de la capa que se ensaya o si se extiende hacia las capas inferiores. Por último, en el terreno no es posible determinar si el flujo a través del pavimento es laminar o turbulento, lo que genera dudas para la aplicación de la fórmula de Darcy.

En los últimos años se han realizado estudios para establecer la permeabilidad de los pavimentos asfálticos mediante modelos numéricos a partir de imágenes tridimensionales de las microestructuras de las mezclas, cap-

tadas mediante rayos X de tomografía computarizada. Estos modelos han permitido determinar el coeficiente de permeabilidad en las direcciones vertical y horizontal, teniendo en cuenta la anisotropía y la distribución heterogénea que tienen los vacíos con aire en las mezclas (40, 41). Los resultados indican que la permeabilidad en sentido horizontal es mucho mayor que en sentido vertical. A pesar del avance que supone este procedimiento, a la fecha existen muchas dificultades de tipo práctico para su utilización habitual.

ECUACIONES PARA DETERMINAR DE MANERA INDIRECTA LA PERMEABILIDAD DE LAS MEZCLAS DENSAS COMPACTADAS

Dada la heterogeneidad y la naturaleza anisotrópica de las mezclas asfálticas, no resulta fácil establecer una relación precisa entre la permeabilidad y las variables que la afectan. A pesar de estas limitaciones, diferentes investigadores han realizado análisis estadísticos para desarrollar modelos que permitan predecir el coeficiente de permeabilidad de las mezclas asfálticas densas. Algunos de ellos se presentan a continuación.

Ecuación de Shklarsky y Kimchi (4)

A partir de los resultados de ensayos efectuados con mezclas del tipo arena asfalto, empleando un permeámetro de laboratorio de concepción propia, estos investigadores establecieron la siguiente relación general:

$$k = a \times (VA)^m \quad (1)$$

Siendo:

k : coeficiente de permeabilidad, cm/s.

VA : vacíos con aire, %

Las constantes a y m dependían de la granulometría y era necesario establecerlas sobre cada mezcla particular. Para las arenas asfalto ensayadas por los autores, $a=10^{-16}$ y $m=10$.

Ecuación del Arkansas Department of Transportation (DOT) (17)

En 1998, el Departamento de Transporte de Arkansas llevó a cabo un estudio luego de que algunas mezclas

del tipo Superpave presentaran signos preocupantes de permeabilidad tras un mes de agosto de 1997 anormalmente lluvioso. El análisis de los resultados de los ensayos realizados sobre las mezclas de 16 proyectos dio lugar a la siguiente ecuación, cuyo coeficiente de correlación (R) fue 0,748:

$$k=(1,38 \times 10^{-7}) \times (3,92^{VA}) \times (0,61^h) \quad (2)$$

Donde:

k : coeficiente de permeabilidad, cm/s

VA : vacíos con aire, %

h : espesor de la capa asfáltica, cm

Ecuaciones de Cooley, Prowell y Brown (10)

Estudiando en 2002 algunas mezclas gruesas Superpave, estos investigadores del NCAT elaboraron regresiones lineales múltiples para relacionar la permeabilidad, medida tanto *in situ* como en el laboratorio, con las variables que consideraron de mayor incidencia sobre ésta.

Las determinaciones de permeabilidad *in situ* se realizaron con un permeámetro concebido por el NCAT, mientras las de laboratorio se hicieron conforme a la norma ASTM PS 129-01. Las ecuaciones obtenidas, con coeficientes de determinación (R^2) de 0,66 y 0,51, respectivamente, fueron las siguientes:

$$\ln k \text{ (insitu)} = -1,787 + 0,592 \times (VA) + 0,1966 \times (TMN) - 0,23 \times (h/TMN) \quad (3)$$

$$\ln k \text{ (laboratorio)} = -5,335 + 4,61 \times \ln(VA) + 0,138 \times (TMN) - 0,24 \times (h) \quad (4)$$

Siendo:

\ln : logaritmo natural.

k : coeficiente de permeabilidad, 10^{-5} cm/s.

VA : vacíos con aire, %.

TMN : tamaño máximo nominal del agregado, mm.

h : espesor de la capa asfáltica, mm.

El tamaño máximo nominal (TMN) al cual se refieren estas ecuaciones corresponde a la definición de Superpave, es decir, el tamaño de abertura del tamiz inmediatamente superior al que retiene más de 10% acumulado del agregado.

Ecuación de Hainin, Cooley & Prowell (30)

En un estudio presentado a comienzos de 2003, estos investigadores encontraron la siguiente ecuación de regresión, con un coeficiente de determinación $R^2=0,76$, tras ensayar 354 probetas extraídas de 42 proyectos en ejecución con mezclas Superpave de gradaciones gruesa y fina. Los vacíos con aire de las probetas se calcularon a partir de la densidad determinada con el dispositivo Corelock (norma ASTM D6752). La permeabilidad se estableció de acuerdo con la norma provisional ASTM PS129-01.

$$\ln k = -19,2 + 5,96 \times \ln(VA) + 1,47 \times (RAG) + 0,078 \times P_{12,5} + 0,0485 \times P_{1,18} - 0,00928 \times N_{DIS} - 0,0124(h) \quad (5)$$

Donde:

\ln : logaritmo natural.

k : coeficiente de permeabilidad, cm/s.

VA : vacíos con aire, %.

RAG : relación de agregado grueso.

$P_{12,5}$: porcentaje que pasa el tamiz de 12,5 mm ($1/2''$).

$P_{1,18}$: porcentaje que pasa el tamiz de 1,18 mm (N.º 20).

N_{DIS} : número de giros de diseño de la mezcla (método Superpave).

h : espesor de la capa asfáltica, mm

La relación de agregado grueso (RAG) incluida en esta ecuación, fue definida por los autores como el porcentaje de agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm (N.º 4) dividido por el porcentaje que pasa ese mismo tamiz.

Ecuación del Louisiana Transportation Research Center (LTRC) (42)

En 2005, investigadores del LTRC presentaron varios modelos de regresión estadística para predecir la permeabilidad a partir de los resultados de pruebas efectuadas sobre probetas extraídas de diez (10) pavimentos construidos en Louisiana con mezclas del tipo Superpave. Los ensayos de permeabilidad se realizaron en el laboratorio con un permeámetro de carga variable, acorde con la norma ASTM PS 129-01. La ecuación obtenida para el caso en que los vacíos con aire se determi-

naron a partir de la densidad medida con el método de las probetas saturadas y superficialmente secas (norma ASTM D2726) fue la que se presenta a continuación. Su coeficiente de determinación (R^2) fue 0,73:

$$k=10^{-4} \left[\begin{array}{l} 23,8(VA)^2 - 147,8(VA) \\ + 114,5P_{0,075} - 49,1P_{0,3} \\ + 65,5P_{0,6} - 48,7P_{2,36} + 5,4P_{12,5} \end{array} \right] \quad (6)$$

Donde:

k : coeficiente de permeabilidad, mm/s.

VA : vacíos con aire, %.

$P_{0,075}$: porcentaje que pasa el tamiz de 0,075 mm (N.º 200).

$P_{0,3}$: porcentaje que pasa el tamiz de 0,3 mm (N.º 50).

$P_{0,6}$: porcentaje que pasa el tamiz de 0,6 mm (N.º 30).

$P_{2,36}$: porcentaje que pasa el tamiz de 2,36 mm (N.º 8).

$P_{12,5}$: porcentaje que pasa el tamiz de 12,5 mm ($1/2''$).

Ecuación obtenida por Brown, Hainin, Cooley & Hurley (13)

Como parte del proyecto 9-27 del NCHRP, un grupo de trabajo del NCAT desarrolló en 2004 varias regresiones lineales múltiples combinando diversos factores de las mezclas, incidentes sobre la permeabilidad. Las regresiones se hicieron sobre una muestra de 226 probetas extraídas de pavimentos en servicio, ensayadas todas ellas en el laboratorio con un permeámetro de carga variable ajustado a la norma provisional ASTM PS 129-01. Los vacíos con aire de las probetas fueron calculados a partir de la densidad determinada con el dispositivo Corelock (norma de ensayo ASTM D6752).

Los resultados de las regresiones llevaron al grupo a recomendar la siguiente expresión como la más representativa, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,722 y un coeficiente de Mallows (C-p) igual a 3,1:

$$\ln k = -2,20 + 6,75 \times \ln(VA) + 0,316 \times (RAG) - 3,05 \times \ln(VAM) \quad (7)$$

Donde:

\ln : logaritmo natural.

k : coeficiente de permeabilidad, 10^{-5} cm/s.

VA : vacíos con aire, %.

RAG : relación de agregado grueso, %.

VAM : vacíos en los agregados minerales de las probetas compactadas, %.

En desarrollo de esta expresión, los autores definieron la relación de agregado grueso (RAG) como el porcentaje retenido en un tamiz tres tamaños más pequeño (dentro de la serie normal de tamices usados para controlar la granulometría de los agregados de las mezclas asfálticas) que el correspondiente al TMN, dividido por el porcentaje que pasa ese mismo tamiz. De acuerdo con esta definición, los tamaños de las aberturas de los tamices asociados con los TMN de 19,5, 12,5 y 9,5 mm fueron 4,75, 2,36 y 1,18 mm, respectivamente.

Ecuación de Masad, Al-Omari y Lytton (44)

La fórmula de Kozeny-Karman ha sido empleada desde hace mucho tiempo para estimar la permeabilidad de los materiales granulares. Algunos investigadores la han utilizado también como base para obtener aproximaciones de la permeabilidad de las mezclas asfálticas, a partir de sus propiedades volumétricas y de la granulometría y de la superficie específica de los agregados. En 2006, Masad et al. (44), investigadores del Instituto de Transporte de Texas, desarrollaron la siguiente expresión a partir de una adaptación de dicha fórmula:

$$K = \frac{\bar{C}n^3}{(1-n)^2} \left[D_s \left(1 + \frac{G_{sb}(P_b - P_{ba}(1 - P_b))}{G_b(1 - P_b)} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \frac{\gamma}{\mu} \quad (8)$$

Donde:

k : coeficiente de permeabilidad.

\bar{C} : coeficiente empírico de calibración.

n : vacíos con aire en la mezcla.

D_s : tamaño promedio de partícula.

G_b : gravedad específica del asfalto.

P_{ba} : proporción de asfalto absorbido por el agregado (tanto por uno).

P_b : proporción de asfalto respecto del peso total de la mezcla (tanto por uno).

G_{sb} : gravedad específica del agregado.

γ : peso unitario del agua.

μ : viscosidad del agua.

Se puede apreciar que, además de los factores típicos de vacíos, granulometría y gravedades específicas, la fórmula incluye un coeficiente de calibración que depende del tipo de ensayo utilizado y que intenta con-

siderar, además, las dificultades existentes para asegurar la saturación de la probeta y las pérdidas alrededor de su circunferencia, así como las diferencias que existen entre las diversas pruebas para registrar el gradiente hidráulico y la velocidad del flujo de agua. Ello obliga, en la práctica, a determinar dicho coeficiente para cada caso particular.

Análisis general de las ecuaciones

A pesar de las diferencias que se presentan en cuanto a los tipos de ensayos de permeabilidad ejecutados y a las variables independientes analizadas, las ecuaciones reseñadas permiten establecer la presencia de algunos factores y tendencias determinantes.

Ante todo, es evidente que la permeabilidad es directamente proporcional al contenido total de vacíos con aire. También lo es a la relación de agregado grueso; en otras palabras, cuanto más gruesa sea la gradación, es de esperar que los vacíos con aire individuales sean mayores, lo que genera una probabilidad más alta de que se interconecten. Igualmente, se aprecia que la permeabilidad aumenta al disminuir el espesor de mezcla involucrado y también al incrementar el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado pétreo. Por último, una de las ecuaciones da a entender que la permeabilidad aumenta al decrecer los VAM (13), lo que los autores interpretan con el argumento de que menores valores de VAM generan un menor espacio para el cemento asfáltico en la mezcla, lo que se traduce en un mayor potencial de interconexión de los vacíos con aire.

REFERENCIAS

- Gierhart, D. (2010, June 18th). *Correcting permeability in dense-graded HMA mixes*. Asphalt Institute.
- Asphalt Institute (1995). *Mix Design Methods. Manual Series*, N.º 2, 6th ed. Lexington, Ky.
- McLaughlin, J.F. & Goetz, W.H. (1955). Permeability, Void Content and Durability of Bituminous Concrete. *HRB Proceedings*, vol. 34, pp. 274-286.
- Shklarsky, E. & Kimchi, A. (1962). Influence of Voids, Bitumen and Filler Content on Permeability of Sand-Asphalt Mixtures. *HRB Bulletin*, 358. Washington, D.C., pp. 1-11.
- Zube, E. (1962). Compaction Studies of Asphalt Concrete Pavements as Related to the Water Permeability Test. *HRB Bulletin*, 358. Washington, D.C., pp. 12-37.
- Brown, E.R., Collins, R. & Brownfield, J.R. (1989). Investigation of Segregation of Asphalt Mixtures in the State of Georgia. *Transportation Research Record*, 1217. Washington, D.C.: National Research Council.
- Gotolski, W.H., Roberts, J.M., Smith, R.W. & Ciesielski, C.A. (1972). Permeance as a Mix Design Criterion for Asphaltic Concrete Pavements. *Research Project*, 68-1. Pennsylvania: Pennsylvania Department of Transportation.
- Maupin Jr., G.W. (2000). Asphalt Permeability Testing in Virginia. Presented at the 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Choubane, B., Page, G.C. & Musselman, J.A. (1997, July). Investigation of Water Permeability of Coarse Graded Superpave Pavements. *Research Report*, FL/DOT/SMO/97-416. Florida DOT.
- Cooley Jr., L.A., Prowell, B.D. & Brown, E.R. (2002, July). Issues Pertaining to the Permeability Characteristics of Coarse-Graded Superpave Mixes. *NCAT Report*, N.º 2002-06. Auburn, AL 36830: National Center for Asphalt Technology.
- Mallick, R.B., Cooley Jr., L.A., Teto, M.R., Bradbury, R.L. & Peabody, D. (2003, June). An Evaluation of Factors Affecting Permeability of Superpave Designed Pavements. *NCAT Report*, N.º 03-02. Auburn, AL 36830: Auburn University, National Center for Asphalt Technology.
- Maupin Jr., G.W. (2000, June). Investigation of Test Methods, Pavements, and Laboratory Design Related to Asphalt Permeability. *Report VTRC 00-R24*. Charlottesville, Virginia: Virginia Transportation Research Council.
- Brown, E.R., Hainin, M.R., Cooley Jr., L.A. & Hurley, G. (2004, September). Relationships of HMA In-Place Air Voids, Lift Thickness, and Permeability. *NCHRP Web Document 68* (Project 9-27). Auburn, Alabama: Auburn University, National Center for Asphalt Technology.
- Hudson, S.B. & Davis, R.L. (1965). Relationship of Aggregate Voidage to Gradation. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 34.
- Ford, M.C. & McWilliams, C.E. (1988). *Asphalt Mix Permeability*. Fayetteville, AR: University of Arkansas.
- Cooley Jr., L.A., Brown, E.R. & Maghsoodloo, S. (2001, September). Development of Critical Field Permeability and Pavement Density Values for Coarse-Graded Superpave Pavements. *NCAT Report*, 01-03. Auburn AL 36830: Auburn University, National Center for Asphalt Technology Auburn University.
- Westerman, J.R. (1998, January 21). AHTD's Experience with Superpave Pavement Permeability. Little Rock, Arkansas: Arkansas Superpave Symposium.
- Musselman, J.A., Choubane, B., Page, G.C. & Upshaw, P.B. (2006). *Superpave Field Implementation: Florida's Early Experience*. Gainesville, FL 32609: Florida Dept. of Transportation, State Materials Office, N.E. Waldo Road.
- Mohammad, L.N., Herath, A. & Huang, B. (2003). *Evaluation of Permeability of Superpave Asphalt Mixtures*. TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM.
- Cechetini, J.A. (1974). *Vibratory Compaction of Asphalt Concrete Pavements. Proceedings*, vol. 43. Association of Asphalt Paving Technologists, pp. 384-408.
- Abd El Halim, O. & Abdelzaher, M. (2006). *Asphalt Multi-Integrated Rollers and Steel Drum Compactors: Evaluating Effect of Compaction on Permeability of Asphalt Pavements*. Carleton University, Department of Civil and Environmental Engineering, Transportation Research Record, Issue 1967, pp. 173-180.
- Massad, E., Al-Omari, A. & Lytton, R. (2006). *Simple method for predicting laboratory and field permeability of hot-mix asphalt*. Washington, D.C.: Transportation Research Record N.º 1970, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 55-63.
- Brown, E.R., Decker, D. Mallick, R. & Bukowski, J. (1999). Superpave construction issues and early performance evaluation.

- Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 68, pp. 613-623.
24. Waddah, S.A., Obaidat, M.T. & Abu-Sa'da, N.M. (1998, May). Influence of aggregate type and gradation on voids of asphalt concrete pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 10, N.º 2. Reston, Virginia, pp. 76-85.
25. Ruiz, C., Rivara de Ronchi, Y. & Llano, O.M. (1997, mayo). Sobre la estructura granular de las mezclas asfálticas convencionales. Segunda parte. Vigésima Reunión del Asfalto. Buenos Aires: Comisión Permanente del Asfalto, pp. 45-76.
26. Khosla, N.P. & Sadasivam, S. (2005, February). *Determination of Optimum Gradation for Resistance to Permeability, Rutting and Fatigue Cracking*. Report N.º FHWA/NC/2004-12. North Carolina State University, Department of Civil Engineering.
27. Gogula, A.K., Hossain, M. & Romanoschi, S.A. (2004, November). *A Study of Factors Affecting the Permeability of Superpave Mixtures in Kansas*. Report N.º K-TRAN: KSU-00-02. Manhattan, Kansas: Kansas State University, Department of Civil Engineering.
28. Prowell, B.D. (2001, October). *Investigation of Pavement Permeability: Old Bridge Road*. Report N.º VTRC 02-TAR5. Charlottesville, Virginia: Virginia Transportation Research Council.
29. Russell, J.S., Bahia, H.U., Kanitpong, K., Schmitt, R. & Crovetto, J. (2005, April). *Effect of Pavement Thickness on Superpave Mix Permeability and Density*. WisDOT Highway Research Study 0092-02-14. University of Wisconsin.
30. Hainin, M.R., Cooley Jr., L.A. & Prowell, B.D. (2003, January). *An Investigation of Factors Influencing Permeability of Superpave Mixes*. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, 82nd Annual Meeting of Transportation Research Board.
31. Florida Department of Transportation (2000, September, 1.º). *Florida Method of Test for Measurement of Water Permeability of Compacted Asphalt Paving Mixtures - Designation: FM 5-565*. Revised: January 26, 2006.
32. Virginia Department of Transportation (2005, October 6). *Virginia Test Method - 120 Method of Test for Measurement of Permeability of Bituminous Paving Mixtures Using a Flexible Wall Permeameter - (Asphalt Lab)*.
33. Oklahoma Department of Transportation (2007). *OHD L-44 Method of Test for Measurement of Water Permeability of Compacted Paving Mixtures*. Revised 9/24/07.
34. James, J.M. (1988, September). *Asphalt Mix Permeability, Final Report, TRC-82, FHWA/AR-88/003*. Arkansas State Highway and Transportation Department.
35. Kari, W.J. & Santucci, L.E. (1963). Control of Asphalt Concrete Construction by the Air Permeability Test. *Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 32.
36. Allen, D.L., Schultz Jr., D. & Fleckenstein, L.J. (2001, July). *Development and Proposed Implementation of a Field Permeability Test for Asphalt Concrete*. Research Report KTC-01-19/SPR216-00-1F. Lexington, Kentucky: Kentucky Transportation Center, University of Kentucky, College of Engineer (revised June, 2003).
37. Cooley Jr., L.A. (1999, February). Permeability of Superpave Mixtures: Evaluation of Field Permeameters. *NCAT Report*, N.º 99-1. Alabama: National Center for Asphalt Technology, Auburn University.
38. Cooley Jr., L.A. & Brown, E.R. (2000). *Selection and Evaluation of a Field Permeability Device for Asphalt Pavements*. Transportation Research Record 1723.
39. Gogula, A.K., Hossain, M., Romanoschi, S. & Fager, G.A. (2003, August). *Correlation between the Laboratory and Field Permeability Values for the Superpave Pavements*. Kansas State University and Kansas Department of Transportation. Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Ames, Iowa.
40. Al Omari, A.M. (2004, December). *Analysis of HMA Permeability through Microstructure Characterization and Simulation of Fluid Flow in X-Ray CT Images*. Texas A&M University.
41. Kutay, M.E., Wydilek, A.H., Masad, E. & Harman, T. (2007, March). Computational and Experimental Evaluation of Hydraulic Conductivity Anisotropy in Hot-Mix Asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 8, N.º 1, pp 29-43.
42. Mohammad, L.N., Herath, A., Wu, Z. & Cooper, S. (2005). *Factors Influencing the Permeability of Hot-Mix Asphalt Mixtures*. Shreveport, Louisiana: Louisiana Transportation Research Center, Louisiana Asphalt Technology Conference, February 23-24.
43. Hainin, M.R., Cooley Jr., L.A. & Prowell, B.D. (2003). *An Investigation of Factors Influencing Permeability of Superpave Mixes*. National Center for Asphalt Technology, TRB 2003 Annual Meeting.
44. Masad, E., Al-Omari, A. & Lytton, R.L. (2006). *Simple Method for Predicting Laboratory and Field Permeability of Hot-Mix Asphalt*. Washington D.C.: Transportation Research Record, N.º 1970, pp. 55-63.

