

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

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.

ELECCIÓN DE PARÁMETROS PARA EL DESARROLLO DE LA NUEVA CORRELACIÓN

Como resultado del análisis de las ecuaciones, se han elegido los parámetros volumétricos y granulométricos que se describen a continuación para el desarrollo del nuevo modelo de estimación indirecta de la permeabilidad.

Parámetros volumétricos

Vacíos con aire (VA)

La necesidad de disponer del volumen de vacíos con aire (VA) como insumo de una ecuación para determinar la permeabilidad de la mezcla no resiste discusión. No obstante, se debe tener en cuenta que existen varios procedimientos normalizados para la medida de la densidad de las probetas, a partir de la cual se determina el volumen de vacíos con aire, y que éstos no dan siempre los mismos resultados.

El método tradicionalmente utilizado en Colombia para determinar las densidades de las probetas asfálticas durante el diseño de las mezclas y en los controles de construcción de pavimentos es el conocido como el método de la probeta saturada y superficialmente seca (SSS), que corresponde a la norma ASTM D2726. La determinación de la densidad empleando especímenes parafinados (norma ASTM D1188) está recomendada para probetas con apariencia abierta, que exhiban vacíos interconectados o que presenten absorciones de agua superiores a 2% en volumen, aunque, en la práctica, es poco usada en los diseños y en los controles diarios de las obras colombianas. El método de sellado automático por vacío para determinar la densidad de probetas asfálticas compactadas, conocido como Corelok (norma ASTM D6752), no se ha empleado en el país; sin embargo, los datos obtenidos mediante su uso los han utilizado investigadores extranjeros en los años recientes para calcular los vacíos con aire en el establecimiento de algunas correlaciones con la permeabilidad (10, 13).

En general, quienes han hecho comparaciones entre los resultados obtenidos con estos procedimientos manifiestan que los cálculos de vacíos a partir del método de sellado al vacío coinciden razonablemente con los obtenidos a partir del método SSS, cuando las probetas presentan niveles de absorción por debajo de

2%, típicos de mezclas elaboradas con gradaciones “finas”. Consideran, además, que las probetas de mezclas preparadas con agregados de gradación gruesa tienen vacíos con aire de mayor tamaño, los cuales pueden llegar a interconectarse, permitiendo que el agua entre y también drene con facilidad durante el desarrollo del ensayo ASTM D2726, creando problemas de falta de precisión al desplazar un menor volumen de agua y, consecuentemente, subestimando el volumen bruto de las probetas. Por tal motivo, han preferido el uso del dispositivo Corelok, el cual dicen que da lugar, en estos casos, a contenidos de vacíos con aire más altos (10, 29, 46). No obstante, hay al menos una investigación cuyas conclusiones son diametralmente opuestas (47).

Aunque, en principio, en este estudio se han utilizado los vacíos con aire (VA) obtenidos a partir de la ejecución del ensayo descrito en la norma ASTM D2726, por cuanto en Colombia no se dispone de equipos para la determinación rutinaria de la densidad mediante sellado por vacío, también se presenta el ejercicio para el caso de que éstos se hayan calculado a partir de los resultados de la prueba ASTM D6752.

Vacíos en los agregados minerales (VAM)

La ecuación 7 incluye los vacíos en los agregados minerales (VAM) como parámetro para calcular la permeabilidad y da una justificación discutible en relación con su presencia (13). Para los efectos de esta investigación no se estimó necesaria su inclusión en los modelos de regresión, por cuanto el componente de los VAM que incide sobre la permeabilidad es el contenido de vacíos con aire. En consecuencia, incluir también los VAM en la ecuación equivaldría a considerar los vacíos con aire por duplicado.

Parámetros de los agregados pétreos

Granulometría

Las relaciones entre las granulometrías de los agregados pétreos de las mezclas asfálticas convencionales y las estructuras granulares de éstas, formadas durante el proceso de compactación, se estudiaron hace más de 30 años, quedando demostrado que la formación de las estructuras depende, fundamentalmente, del escalonamiento granulométrico y, en menor grado, de la forma

y de la textura superficial de las partículas (25). Por lo tanto, cualquier cambio en la granulometría incidirá en la cantidad de espacio disponible dentro del esqueleto granular y, en consecuencia, en la permeabilidad de la mezcla. Desafortunadamente, las leyes que gobiernan el efecto de la granulometría sobre el empaquetamiento de los agregados no son bien conocidas por el común de los diseñadores de mezclas asfálticas.

Las ecuaciones de correlación extraídas de la literatura e incluidas en este documento incorporan varios parámetros asociados con la granulometría: tamaño promedio de partícula (D_p), tamaño máximo nominal (TMN), relación de agregado grueso (RAG) y porcentajes que pasan diferentes tamices.

El tamaño promedio de partícula (D_p) incluido en la ecuación propuesta por Masad et al. (ecuación 8) corresponde al volumen del agregado y del asfalto absorbido (44). Según describen los autores, se obtiene calculando el tamaño promedio de partícula retenida en cada tamiz y determinando luego el diámetro promedio de toda la granulometría, mediante una ponderación de los pesos de agregado retenidos en los diferentes tamices. En razón de que la granulometría del agregado tiene una incidencia tan importante sobre la permeabilidad de la mezcla, al elaborar el presente informe se ha considerado que definir la granulometría a través de un único valor promedio dentro de una ecuación de correlación genera gran incertidumbre.

Teniendo en cuenta la existencia de estudios que indican que la permeabilidad de la mezcla depende del tamaño máximo nominal (TMN) del agregado, este parámetro se incluyó en algunos de los modelos analizados en el presente estudio.

La relación de agregado grueso (RAG) es otro parámetro interesante de analizar en relación con su inclusión en una expresión para estimar la permeabilidad de un concreto asfáltico compactado. Los autores de la ecuación 5 la definieron como el porcentaje de agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm dividido por el porcentaje que pasa ese mismo tamiz, en tanto que el grupo que desarrolló la ecuación 7 la definió como el porcentaje retenido en un tamiz tres tamaños más pequeño (dentro de la serie especificada para verificar la granulometría de los agregados) que el correspondiente al TMN, dividido por el porcentaje que pasa ese mismo tamiz. Para los propósitos del presente estudio se consideró importante la adopción de esta relación,

aunque no definida de una manera tan aparentemente arbitraria.

La separación entre el agregado grueso y el fino en una mezcla asfáltica debe ser más específica que la utilizada tradicionalmente en los sistemas de clasificación de suelos. En ese orden de ideas, la definición de la RAG debe ir destinada a determinar los grados de empaquetamiento y de trabazón de los agregados; así, Bailey (48) considera que el agregado grueso (AG) está constituido por las partículas de mayor tamaño que, al ocupar determinado volumen, crean espacios vacíos entre ellas, en tanto que el agregado fino (AF) es el conjunto de partículas que ocupan parcialmente los vacíos creados por el agregado grueso en la mezcla. De acuerdo con estas consideraciones, resulta evidente que se requiere más de un tamaño de tamiz para definir si un agregado pétreo es grueso o fino. Bailey determinó que el tamiz que separa el agregado grueso del fino, al cual denominó “tamiz de control primario”, es aquel cuya abertura sea la más cercana al resultado de multiplicar el TNM por 0,22. Aplicando esta pauta, los tamices que separan los agregados gruesos de los finos para distintos TNM son los que se muestran a continuación (tabla 2). En los modelos analizados en desarrollo del presente informe se ha utilizado la RAG definida de acuerdo con este criterio.

Tabla 2

Abertura de los tamices de control primario (TCP) para diferentes tamaños máximos nominales (TNM) (48)

TMN (mm)	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
TCP (mm)	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18

Los tamaños D_{60} y D_{10} , así como su relación, llamada coeficiente de uniformidad (C_u), se han usado tradicionalmente para definir la continuidad de una granulometría y se citan en la literatura relacionada con la estructura granular de las mezclas asfálticas (25). Por tal razón, estos parámetros también se tomaron en cuenta para la elaboración de los modelos.

Los porcentajes de agregado que pasan los diferentes tamices dan la información real sobre su composición granulométrica y, por lo tanto, muestran mejor que cualquier relación o indicador promedio la verdadera distribución de los tamaños de las partículas. La

elaboración de modelos a partir de la información granulométrica detallada se consideró, por consiguiente, indispensable.

Textura y forma de las partículas

La textura y la forma inciden en la manera como se acomodan las partículas del agregado dentro de la mezcla compactada (25). Por razones ligadas fundamentalmente a la estabilidad de la mezcla, las especificaciones de construcción exigen unos índices mínimos en relación con estos dos factores. No resulta sencillo incorporar su efecto en una expresión simplificada para estimar la permeabilidad, motivo por el cual no forman parte de ninguna de las correlaciones analizadas.

Espesor de la capa compactada

En lo que se refiere al espesor de la capa compactada, el cual forma parte de algunas de las fórmulas incluidas en este documento, así como en otras regresiones analizadas y finalmente desestimadas por Brown et al. (13), no se consideró indispensable su inclusión en los modelos desarrollados aquí, por cuanto las actuales especificaciones de construcción vial exigen que se respete una relación mínima entre el espesor de capa y el TMN¹. De este modo, se evita la combinación de espesores muy pequeños con TMN muy grandes, la cual pudiera generar problemas de permeabilidad que, eventualmente, hicieran considerar el espesor como un parámetro independiente.

PARTE EXPERIMENTAL

Recopilación de datos

La parte experimental del estudio que dio origen a este documento consistió en la obtención de datos apropiados en relación con la composición y las características de las mezclas asfálticas compactadas de tipo denso, que permitieran el desarrollo de una ecuación sencilla y de aplicación general para estimar indirectamente su per-

meabilidad. Para ello se realizó una revisión exhaustiva de la literatura disponible, buscando datos confiables y consistentes que permitieran alcanzar el objetivo. En los términos del presente estudio, la confiabilidad y la consistencia de los datos se refieren, específicamente, a tres aspectos: 1) que incluyeran toda la información requerida en relación con la granulometría de los agregados y con la composición volumétrica de las muestras ensayadas; 2) que las pruebas de permeabilidad se hubieran efectuado en el laboratorio mediante un solo procedimiento y que éste se encontrara normalizado, y 3) que las muestras ensayadas se hubieran compactado mediante algún método que representara la realidad de las mezclas compactadas en el terreno.

Dichas condiciones fueron satisfechas por la información correspondiente a 307 probetas. De éstas, 287 fueron obtenidas y ensayadas por un grupo de trabajo del Centro Nacional para la Tecnología del Asfalto (NCAT) de Auburn (Alabama), en desarrollo de la investigación identificada como NCHRP 9-27 (13), mientras que las 20 restantes provienen de un estudio realizado por el Consejo de Investigaciones sobre el Transporte de la Universidad de Virginia, a pedido del DOT del estado del mismo nombre (28). Los 307 ensayos de permeabilidad se efectuaron en permeámetros Karol-Warner, de acuerdo con la norma provisional de ensayo ASTM PS 129-01, correspondiente con las normas vigentes en algunos DOT norteamericanos (31, 32, 33)². Por último, las 307 probetas corresponden a testigos extraídos de pavimentos en servicio, los cuales representan la manera real como las mezclas asfálticas quedan compactadas *in situ*.

Desarrollo de la ecuación de correlación

Empleando regresiones lineales múltiples, se desarrollaron diferentes modelos para estimar la permeabilidad de las mezclas densas compactadas, a partir de los contenidos de vacíos con aire y de algunos parámetros críticos relacionados con la granulometría de los agregados de las 307 probetas. Los resultados se sintetizan posteriormente (tabla 3).

1. El Artículo 450-06 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías exige una relación mínima de 3 entre el espesor de la capa de rodadura compactada y el TMN del agregado.

2. Debido a que la norma provisional ASTM fue retirada en 2003, no hay en el momento ningún método estandarizado que abarque todo el ámbito de los Estados Unidos de América para medir la permeabilidad al agua de los especímenes de mezclas asfálticas densas.

Teniendo en cuenta los valores de los respectivos coeficientes de determinación (R^2) y los parámetros C-p de Mallows, se concluye que el modelo que mejor predice la permeabilidad de una mezcla asfáltica compactada es el correspondiente a la novena regresión, el cual está constituido por una combinación de los vacíos con aire y los porcentajes que pasan determinados tamices, mediante la expresión:

$$k(\text{cm/s}) = \frac{2,223 \times 10^{-8} \times (\text{VA})^{6,207} \times P_{9,5}^{2,326} \times P_{0,3}^{2,311}}{P_{2,36}^{3,053} \times P_{0,6}^{1,512} \times P_{0,075}^{2,044}} \quad (9)$$

Donde:

VA: vacíos con aire obtenidos a partir de la prueba SSS, %.

$P_{9,5}$: pasa tamiz de 9,5 mm de abertura ($3/8''$), %.

$P_{2,36}$: pasa tamiz de 2,36 mm de abertura (N.º 8), %.

$P_{0,6}$: pasa tamiz de 0,6 mm de abertura (N.º 30), %.

$P_{0,3}$: pasa tamiz de 0,3 mm de abertura (N.º 50), %.

$P_{0,075}$: pasa tamiz de 0,075 mm de abertura (N.º 200), %.

Con el fin de determinar la influencia que tienen los parámetros incluidos en la ecuación 9 sobre la permeabilidad, cada uno de ellos se varió, dentro de los rangos representativos de las mezclas densas, manteniendo constantes los demás. Como era de esperar, se encontró que el volumen total de vacíos con aire (VA) tiene la mayor incidencia. Un cambio de ellos de 5 a 8% incrementa la permeabilidad aproximadamente 18 veces. En relación con los porcentajes que pasan los diversos tamices, tanto el efecto como el sentido en el

cual ocurre el cambio son variados. Los tamaños más incidentes son los menores, aunque con efecto contrario: mientras un aumento de 2% en el porcentaje que pasa el tamiz de 0,075 mm (N.º 200) se traduce en una reducción de 50% en la permeabilidad, un incremento de la misma magnitud en el pasante del tamiz de 0,3 mm (N.º 50) la aumenta en 30%. La incidencia de los demás tamices a causa de un cambio del mismo orden en el pasante es bastante menor, pues no supera el 15%, en más o en menos, según si sus "porcentajes que pasan" se encuentran en el numerador o en el denominador de la ecuación.

La ecuación muestra que al aumentar las proporciones de agregado que pasan por los tamices de 2,36 y 0,60 mm se reduce la permeabilidad. Este resultado concilia con el obtenido en un estudio efectuado por el DOT de Carolina del Norte (26), según el cual la presencia de fracciones de estos tamaños e intermedios hace decrecer los vacíos con aire y es deseable para obtener mezclas de menor permeabilidad. En cambio, el efecto que muestra la ecuación en relación con el pasante del tamiz de 0,075 mm (N.º 200), es discrepante con el obtenido en otros estudios: mientras la ecuación del Louisiana Transportation Research Center (ecuación 6) da a entender que un aumento en la cantidad de dicho material incrementa la permeabilidad, Schmitt et al. (49) concluyeron que el porcentaje que pasa el tamiz de 75 μm no tiene impacto sobre ella. El hecho de que en la ecuación obtenida en el presente estudio la permeabilidad disminuya al incrementar la fracción pasante de este tamiz pudiera explicarse si se considera que en las mezclas del tipo concreto asfáltico, donde

Tabla 3
Mejores ajustes de regresión sobre los factores que afectan la permeabilidad

Regresión	N.º de variables	R ²	R ² ajustado	C-p	VA	TMN	D ₆₀	D ₁₀	Cu	RAG	P _{9,5}	P _{2,36}	P _{0,6}	P _{0,3}	P _{0,075}
1	3	0,765	0,763	20,2	X	X				X					
2	3	0,698	0,695	112,3	X	X			X						
3	3	0,737	0,734	59,5	X		X	X							
4	3	0,766	0,764	18,8	X			X		X					
5	4	0,750	0,743	47,5	X	X	X	X							
6	4	0,767	0,764	19,3	X		X	X		X					
7	5	0,767	0,763	20,3	X	X	X	X		X					
8	5	0,762	0,758	27,0	X						X	X	X	X	
9	6	0,777	0,773	7,0	X						X	X	X	X	X

el contenido de llenante mineral es relativamente bajo, los agregados grueso y fino forman una macroestructura granular, dentro de la cual las fracciones menores “actúan como relleno (...) dentro de los huecos de la macroestructura” (50). La situación sería diferente si las mezclas fueran altamente “fillerizadas” (51).

VERIFICACIÓN DEL MODELO ESCOGIDO

Para verificar la capacidad de la ecuación hallada para predecir la permeabilidad, se hizo, en primer lugar, una comparación entre los resultados obtenidos al aplicarla a la información sobre vacíos y granulometría correspondiente a las 226 probetas del proyecto NCHRP 9-27 antes citado y los resultados que se obtienen al emplear la fórmula propuesta por los autores de dicho proyecto (13), la cual se presenta en este informe como ecuación 7. La comparación indica que para 150 de las 226 probetas (66,4%), la ecuación obtenida en el presente estudio da lugar a valores más cercanos a los medidos. La mayor proximidad es particularmente evidente en los valores en los cuales las dos ecuaciones predicen una permeabilidad inferior a la medida.

Se realizó, además, una segunda verificación comparando los valores obtenidos al aplicar la ecuación que se propone sobre los datos de las 307 probetas, con los que se obtienen al aplicarles la expresión del Louisiana Transportation Research Center (fórmula 6). En este caso, el 84% de los valores calculados con la ecuación propuesta resultaron más cercanos a los medidos en el laboratorio. Se encontró, además, que para algunas combinaciones de los datos de las probetas ensayadas, la fórmula de Louisiana daba lugar a valores negativos del coeficiente de permeabilidad.

Estimación de la permeabilidad empleando los vacíos con aire obtenidos a partir del ensayo Corelok

Considerando que la ecuación 9 se desarrolló utilizando los vacíos calculados a partir de las mediciones de densidad efectuadas sobre probetas saturadas y superficialmente secas (norma ASTM D2726) y que, según investigadores norteamericanos, la determinación de los vacíos a partir de la prueba Corelok (norma ASTM D6752) es más apropiada para probetas con vacíos con aire elevados, se estableció una regresión similar con los datos de las 307 probetas, pero empleando los vacíos

Corelok en lugar de los vacíos SSS. La ecuación hallada, cuyo R^2 ajustado es 0,747, fue la siguiente:

$$k(\text{cm/s}) = \frac{2,22 \times 10^{-8} \times (\text{VA})^{5,85} \times P_{9,5}^{1,404} \times P_{0,3}^{2,794}}{P_{2,36}^{1,793} \times P_{0,6}^{1,925} \times P_{0,075}^{2,179}} \quad (10)$$

Los valores a los cuales da lugar esta ecuación se han comparado con los obtenidos al emplear la ecuación basada en las probetas ensayadas en condición SSS (ecuación 9). Los resultados no permiten establecer cuál resulta más apropiada, por cuanto cada una se aproxima más que la otra a los valores de permeabilidad medidos en el 50% de los casos. Además, no se advierte una tendencia que permita determinar en qué casos resulta más precisa cada una de ellas, lo que impide afirmar que el cálculo de la permeabilidad a partir de los vacíos Corelok sea más preciso que el efectuado a partir de los vacíos SSS para probetas con elevados contenidos de vacíos con aire, contrariamente a lo que se menciona en la literatura.

Lo que sí resulta evidente es que la ecuación 10 reporta resultados más confiables que la ecuación 7, hallada, como se indicó atrás, a partir del ensayo de 226 probetas en desarrollo del proyecto NCHRP 9-27. En ambas ecuaciones, los vacíos con aire son los determinados a partir de las densidades Corelok. Al comparar los resultados obtenidos al aplicar las dos ecuaciones a los datos de las 226 probetas proyecto NCHRP 9-27 se encontró que, en el 68,5% de los casos, los valores calculados con la ecuación 10 fueron más cercanos a los valores de permeabilidad medidos que los obtenidos en aplicación de la ecuación 7.

Vacíos con aire críticos en las mezclas especificadas por el Instituto Nacional de Vías

El Artículo 450 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías incluye las granulometrías que se resumen en la tabla 4, en relación con las mezclas de concreto asfáltico, densas y semidensas (52).

De acuerdo con Cooley et al. (16), las mezclas con tamaño máximo nominal de 19,0 mm se tornan excesivamente permeables cuando su coeficiente de permeabilidad supera 120×10^{-5} cm/s, mientras que en

Tabla 4
Franjas granulométricas para mezclas de concreto asfáltico

TAMIZ (mm/U.S. Standard)												
MEZCLA	25.0	19.0	12.5	9,5	4,75	2,36	2,00	0,60	0,425	0,30	0,18	0,075
	1"	¾"	½"	⅜"	N.º 4	N.º 8	N.º 10	N.º 30	N.º 30	N.º 50	N.º 80	N.º 200
MEZCLAS DENSAS - % QUE PASA												
MDC-1	100	80-95	67-85	60-77	43-59	33-48	29-45	17-29	14-25	12-22	8-17	4-8
MDC-2		100	80-95	70-88	49-65	35-51	29-45	17-29	14-25	12-22	8-17	4-8
MDC-3			100	65-87	49-68	43-61	21-35	16-29	13-25	9-19	5-10	
MEZCLAS SEMIDENSAS - % QUE PASA												
MSC-1	100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-43	24-38	12-23	9-20	8-17	6-12	3-7
MSC-2		100	80-95	65-80	40-55	28-43	24-38	12-23	9-20	8-17	6-12	3-7

Nota: Los porcentajes que pasan los tamices de 2,36 mm, 0,60 mm y 0,30 mm han sido interpolados, por cuanto estos tamices no están incluidos en la especificación.

aquellas con TMN de 12,5 y 9,5 mm el cambio se hace evidente a partir de $100 \cdot 10^{-5}$ cm/s. Por su parte, en un primer documento del DOT de la Florida se sugirió que las capas de rodadura con permeabilidades inferiores a $100 \cdot 10^{-5}$ cm/s previenen la infiltración excesiva de agua dentro de la estructura del pavimento (9), valor que se ajustó posteriormente a $125 \cdot 10^{-5}$ cm/s (53). El DOT de Virginia requiere que la permeabilidad de una capa de rodadura no exceda de $150 \cdot 10^{-5}$ cm/s para un contenido de vacíos con aire de 7,5% o mayor (54).

Empleando la ecuación 9, se han calculado los vacíos con aire (VA) que corresponden a unas granulometrías coincidentes con los límites superior e inferior de los husos presentados en la tabla 4, para unos valores de permeabilidad de $100 \cdot 10^{-5}$ cm/s y $125 \cdot 10^{-5}$ cm/s. Los resultados (tabla 5) muestran que para la condición más desfavorable, que correspondería a la combinación de una permeabilidad límite de $100 \cdot 10^{-5}$ cm/s con una granulometría ajustada a la parte inferior del huso, los vacíos con aire que darían lugar a una mezcla que pudiera considerarse permeable son, cuando menos, de 8,2% para las mezclas densas y de 7,3% para las semidensas.

El Artículo 450 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías exige que las capas asfálticas de rodadura sean compactadas, como mínimo, al 94% de la densidad máxima teórica de la mezcla, en proyectos donde el tránsito de diseño no exceda de cinco millones de ejes equivalentes de 80 kN y cuando menos al 93% para

Tabla 5
Vacíos con aire (VA) que darían lugar a una mezcla permeable según la ecuación 9

Mezcla	Límite del huso granulométrico	Vacíos con aire correspondientes a $k = 125 \cdot 10^{-5}$ cm/s (%)	Vacíos con aire correspondientes a $k = 100 \cdot 10^{-5}$ cm/s (%)
MDC-1	Superior	13,7	13,2
	Inferior	8,8	8,5
MDC-2	Superior	10,7	10,3
	Inferior	8,5	8,2
MDC-3	Superior	12,7	12,2
	Inferior	9,7	9,3
MSC-1	Superior	10,7	10,3
	Inferior	7,5	7,3
MSC-2	Superior	10,2	9,8
	Inferior	7,6	7,3

tránsitos mayores. Estos valores corresponden a 6 y 7% de vacíos con aire, respectivamente.

De acuerdo con lo anterior, se concluye que no es de esperar que las mezclas asfálticas construidas con las granulometrías incluidas en la tabla 4 y compactadas sobre los niveles mínimos de densidad recién indicados presenten problemas de permeabilidad, siempre y cuando se atienda debidamente el párrafo del Artículo 450 que señala que “el material que produzca el Constructor deberá dar lugar a una curva granulométrica uniforme, sensiblemente paralela a los límites de la franja por utilizar, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del tamiz adyacente y viceversa”.

CONCLUSIONES

Como resultado de la información recolectada, procesada y analizada en este estudio, se pueden presentar las siguientes conclusiones:

1. Se cumplió el objetivo del estudio, cual era evaluar los factores que afectan la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas compactadas, medida con un permeámetro normalizado, y desarrollar un modelo para estimarla a partir de éstos.
2. La ecuación que se propone relaciona la permeabilidad con el volumen de vacíos con aire de la mezcla compactada y algunos parámetros granulométricos de determinación rutinaria. Su coeficiente de determinación (R^2) fue 0,773 y su coeficiente C-p 7,0.
3. En cuanto a las condiciones de aplicabilidad de la ecuación, el modelo se determinó empleando valores de permeabilidad obtenidos en el laboratorio con el permeámetro Karol-Warner, sobre probetas cuyos vacíos con aire se calcularon a partir de las densidades halladas mediante el método de la probeta saturada y superficialmente seca (norma ASTM D2726). Todas las probetas correspondían a núcleos extraídos de pavimentos construidos, motivo por el cual los vacíos representan las características de compactación *in situ* de la mezcla.
4. Para la elaboración del modelo se emplearon 307 juegos de datos, tomados de dos investigaciones realizadas en los Estados Unidos de América: 287 pertenecen al proyecto identificado como NCHRP 9-27, llevado a cabo por un grupo de trabajo del Centro Nacional para la Tecnología del Asfalto (13), y las 20 restantes provienen de un estudio efectuado por el Consejo de Investigaciones sobre el Transporte de la Universidad de Virginia (28). Los autores de la investigación NCHRP 9-27 desarrollaron una ecuación para predecir la permeabilidad a partir de los resultados de los ensayos realizados a 226 de las 287 probetas, ecuación que se identifica con el número 7 en este informe. El coeficiente de determinación (R^2) de esta ecuación fue 0,722, es decir, cinco centésimas inferior al que dio lugar el modelo recomendado en el presente estudio.
5. El hecho de que la confiabilidad de la ecuación obtenida en este estudio no sea mayor obedece a la existencia de factores insalvables por el momento, entre los cuales se pueden citar la falta de certeza sobre la saturación completa de la muestra y sobre la aplicabilidad de la ley de Darcy, las posibles pérdidas alrededor de la circunferencia de la probeta durante el ensayo, la imposibilidad de incluir en una fórmula elemental los efectos de la forma y de la textura de las partículas, etc.
6. La ecuación obtenida confirma que el contenido de vacíos con aire *in situ* es el factor de mayor impacto sobre la permeabilidad de las mezclas asfálticas densas. Le siguen en importancia, aunque a considerable distancia, los contenidos de llenante mineral y de arena fina.
7. La incidencia del tamaño máximo nominal del agregado (TMN) sobre la permeabilidad no quedó materializada en la ecuación propuesta. Esta ausencia obedece, en buena parte, al reducido número de tamaños máximos involucrados en los cálculos. Dentro del grupo de probetas analizado, sólo había tres TMN, y el 92% de las probetas tenía tamaños máximos nominales de 9,5 o 12,5 mm. Se debe anotar, por otra parte, que en los modelos elaborados en los cuales se incluyó el TMN, éste resultó inversamente proporcional a la permeabilidad, contrariando lo que menciona la literatura. En un estudio realizado por Cooley et al. (10), los autores concluyeron que las características de permeabilidad de las mezclas con TMN de 9,5 y 12,5 mm son muy similares. De hecho, si se observa la figura 2, tomada del estudio de Cooley, se aprecia que la curva correspondiente a 9,5 mm está ligeramente por encima de la de 12,5 mm, lo que explica la relación inversa encontrada en el presente estudio. La misma figura 2 permite advertir que el efecto verdaderamente notable sobre la permeabilidad se presenta cuando el TMN pasa de 12,5 a 19,0 mm.
8. Considerando el empleo cada vez mayor del dispositivo Corelok para calcular la densidad de las probetas compactadas (norma ASTM D6752), se desarrolló asimismo una ecuación para estimar la permeabilidad a partir de los valores de vacíos con aire determinados mediante dicha densidad (ecuación 10). La ecuación hallada mostró, también, un mayor nivel de aproximación a los valores reales que la obtenida en el proyecto NCHRP 9-27.
9. Comparando los resultados de las ecuaciones 9 y 10, no se pudo comprobar que los vacíos estimados a partir de la prueba Corelok dieran lugar a determi-

naciones más aproximadas de la permeabilidad que los vacíos de las probetas SSS, cuando las probetas presentan elevados porcentajes de vacíos con aire, contrariamente a lo que cita la literatura.

10. Aceptando los umbrales de permeabilidad que fija la literatura internacional para el tipo de ensayo con el cual se obtuvo la ecuación 9, se puede concluir que si las mezclas densas incluidas en el Artículo 450 de las especificaciones de construcción del Instituto Nacional de Vías se elaboran atendiendo las exigencias establecidas en éste, ellas no deberían presentar problemas asociados con la permeabilidad.

REFERENCIAS

45. R. Christopher Williams, Brett Williams, Andrea Kvasnak, Brett Stanton & Tom Van Dam, "Development of Acceptance Criteria of Compacted Hot Mixture Asphalt Bulk Specific Gravity Based on Vacuum Sealed Specimens: Final Report", Final Report – Volume I, Michigan Technological University, October 2005.
46. R. Christopher Williams, "Early Permeability Test for Asphalt Acceptance", Center for Transportation Research and Education Iowa State University, Report N.º OR09-017, February 2009.
47. Eliana del Pilar Vivar & John E. Haddock, "HMA Pavement Performance and Durability", Report FHWA/IN/JTRP-2005/14, Purdue University, April 2006.
48. William R. Vavrik, Gerald Huber, William J. Pine, Samuel H. Carpenter & Robert Bailey, "Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design", Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, October 2002.
49. Robert Schmitt, Samuel Owusu-Ababio, James Crovetto & Allen L. Cooley, "Development of In-Place Permeability Criteria for HMA Pavement in Wisconsin", WHRP 06-15, University of Wisconsin, Platteville, February 2007.
50. Celestino Ruiz, Yolanda Rivara de Ronchi & Oscar M. Llano, "Sobre la estructura granular de las mezclas asfálticas convencionales", Decimonovena Reunión del Asfalto, páginas 99-130, Comisión Permanente del Asfalto, Entre Ríos, noviembre de 1975.
51. Celestino Ruiz, "Interpretación del Ensayo Marshall. Relación Estabilidad-Fluencia", Dirección de Vialidad, Provincia de Buenos Aires, Publicación N.º 57, La Plata, Argentina, mayo de 1966.
52. Instituto Nacional de Vías, "Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras", Bogotá, D.C., 2006.
53. Florida Department of Transportation, "Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Section 334, Superpave Asphalt Concrete", 2010.
54. Virginia Department of Transportation, "Road and Bridge Specifications, Section 211, Asphalt Concrete", Richmond, 2007.