

Ensayos para valorar los agregados pétreos destinados a la construcción de los pavimentos asfálticos de las carreteras nacionales. Compendio para *dummies*



Evaluation tests of aggregates in the construction of the national highway asphalt pavements. Abstract for dummies.

FERNANDO SÁNCHEZ SABOGAL

Ingeniero civil.

elexdos@gmail.com

Recibido: 14/04/2015 Aceptado: 20/08/2015

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este artículo se describe el propósito de los ensayos incluidos en las especificaciones generales de construcción de carreteras del Invías para valorar la calidad de los agregados pétreos destinados a la construcción de subbases y bases granulares y mezclas de concreto asfáltico.

Palabras claves: agregados, llenante mineral, concreto asfáltico, ensayos, especificaciones, Instituto Nacional de Vías.

Abstract

This document describes the purpose of the tests used to determine the quality of aggregates for granular subbases and bases and asphalt concrete mixes included in the Invías standard specifications for highway construction.

Keywords: aggregates, filler, asphalt concrete, tests, specifications, Instituto Nacional de Vías.

INTRODUCCIÓN

Las características de los agregados minerales empleados en la construcción de un pavimento asfáltico tienen influencia decisiva sobre el comportamiento de éste. Para elegir correctamente los agregados, el ingeniero debe saber cuáles han de ser sus propiedades fundamentales, tomando en cuenta la importancia de la carretera y el tipo de tránsito que va a hacer uso de ella, las condiciones ambientales (en particular en lo relacionado con la temperatura, las lluvias y la humedad), las capas del pavimento en las cuales se van a utilizar y, por último, la naturaleza y las propiedades de los materiales de construcción disponibles en la zona del proyecto.

Las especificaciones generales de construcción de carreteras fijan las características y condiciones que deben cumplir los agregados para la construcción de pavimentos, sin entrar a tratar las peculiaridades de cada obra, las cuales deben quedar reflejadas en especificaciones particulares.

Con el fin de eliminar la subjetividad y los conflictos que inevitablemente se derivan de ella, la ingeniería de carreteras ha venido adoptando a lo largo del tiempo unos ensayos normalizados de laboratorio, a partir de cuyos resultados se decide la aceptación o el rechazo de los materiales propuestos para la construcción de las capas de un pavimento. La idea es que los resultados de estas pruebas sean indicadores *a priori* del comportamiento real de los materiales en servicio, aunque, justo es reconocerlo, no en todos los casos ha sido posible establecer correlaciones incuestionables entre los resultados de las pruebas y el comportamiento en servicio del producto final.

Más adelante se resumen los ensayos dispuestos en las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías para el control de la calidad de los agregados por emplear en la construcción de subbases y bases granulares y de mezclas de concreto asfáltico (tabla 1), capas estas que componen la mayoría de los pavimentos construidos en Colombia (ref. 1). Se puede apreciar que las características fundamentales que ordenan verificar las especificaciones son la resistencia a la fragmentación, al pulimento y al intemperismo, la limpieza, la forma, la angulosidad, la granulometría, el valor soporte de los materiales para las capas granulares y la adhesividad de los agregados previstos para mezclar con el asfalto.

Los ensayos relacionados en la tabla se deben complementar con el conocimiento de la composición

mineralógica de los agregados, la cual tiene un efecto significativo sobre las características físicas y químicas que, en últimas, gobiernan el comportamiento de las capas de pavimento. Por ejemplo, los agregados de tipo calcáreo –calizas y dolomitas–, si bien presentan una excelente adherencia con los ligantes asfálticos, suelen mostrar una resistencia menor a la degradación de sus partículas y al pulimento que los agregados graníticos. Además de lo anterior, el proceso de manufactura de los agregados incide también sobre su calidad y comportamiento, aspecto éste que por lo general sólo se puede conocer debidamente durante la etapa de producción.

La toma de muestras es tan importante como los mismos ensayos y, por lo tanto, los encargados de hacerla deben adoptar las precauciones necesarias para obtener muestras que indiquen la verdadera naturaleza y las características reales de los materiales representados por ellas, tal como se indica en la norma INV E-201. En este punto se debe tener en cuenta que, en la mayoría de las fuentes de materiales, las propiedades de éstos presentan variaciones considerables en diferentes instantes en la misma fuente o aun en el mismo instante en diferentes puntos de ella. Por tal razón, la verificación regular de la calidad de los agregados es una condición básica para asegurar la calidad de los productos elaborados con ellos. Las instrucciones contenidas en las especificaciones de construcción en relación con la frecuencia del muestreo y de los ensayos persiguen ese objetivo.

DUREZA Y TENACIDAD

Los ensayos incluidos en este grupo pretenden evaluar el desgaste del agregado debido a la fricción y a la fragmentación a causa de sollicitaciones exteriores, como las producidas por su manejo y puesta en obra o las provocadas por el tránsito, cuya consecuencia es una modificación de la granulometría, aumentando la proporción de partículas de menor tamaño y, consecuentemente, modificando también las propiedades relacionadas con ella¹. El fenómeno es aún más perjudicial si los finos

1. En el ensayo para determinar el coeficiente de pulimento acelerado (CPA) solamente se evalúa el desgaste del agregado debido a la fricción generada sobre él por la acción combinada de una rueda y unos materiales abrasivos normalizados.

Tabla 1

 Ensayos especificados por el INV para verificar las características de los agregados pétreos destinados a la construcción de pavimentos asfálticos en las carreteras nacionales²

| Característica | Norma de ensayo INV | Subbase granular | Base granular | Concreto asfáltico |
|--|---------------------|------------------|---------------|--------------------|
| Dureza y tenacidad | | | | |
| Degradación por abrasión e impacto Los Ángeles | E-218 | X | X | X |
| 10 % de finos | E-224 | | X | X |
| Degradación del agregado grueso por abrasión micro-Deval | E-238 | X | X | X |
| Coefficiente de pulimento acelerado | E-232 | | | X |
| Resistencia al intemperismo | | | | |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de sodio | E-220 | X | X | |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio | E-220 | X | X | X |
| Limpieza | | | | |
| Límite líquido | E-125 | X | X | X |
| Índice de plasticidad | E-128 | X | X | X |
| Equivalente de arena | E-133 | X | X | X |
| Valor de azul de metileno (A) | E-235 | | X | X |
| Terrones de arcilla y partículas deleznable | E-211 | X | X | |
| Impurezas en el agregado grueso | E-237 | | | X |
| Geometría | | | | |
| Índices de aplanamiento y alargamiento | E-230 | | X | |
| Partículas planas y aplanadas | E-240 | | | X |
| Caras fracturadas mecánicamente | E-227 | | X | X |
| Angulosidad del agregado fino | E-239 | | X | X |
| Granulometría | E-213/E-214 | X | X | X |
| Características del llenante mineral | | | | |
| Densidad <i>bulk</i> | E-225 | | | X |
| Vacios del llenante seco compactado | E-229 | | | X |
| Concentración crítica | E-745 | | | X |
| Resistencia | | | | |
| CBR | E-148 | X | X | |
| Adhesividad | | | | |
| Riedel-Weber | E-774 | | | X |
| Efecto del agua sobre la mezcla asfáltica suelta | E-757 | | | X |
| Efecto del agua sobre la mezcla asfáltica compactada mediante tracción indirecta | E-725 | | | X |
| Gravedades específicas y absorción | | | | |
| Gravedad específica y absorción del agregado grueso | E-223 | | | X (B) |
| Gravedad específica y absorción del agregado fino | E-222 | | | X (B) |
| Gravedad específica del llenante mineral | E-128 | | | X (B) |

(A) El ensayo de azul de metileno se utiliza como complemento del equivalente de arena cuando el resultado de éste no satisface el requisito de la especificación.

(B) Los ensayos de gravedad específica y absorción de los agregados grueso y fino y de gravedad específica del llenante mineral no están especificados taxativamente, pero su ejecución es necesaria para los cálculos volumétricos de las mezclas asfálticas.

- Aunque los pavimentos asfálticos se pueden construir con muchos tipos de capas y así lo contemplan las especificaciones del Instituto Nacional de Vías, en aras de la síntesis en el artículo sólo se habla de los pavimentos convencionales de tipo flexible, constituidos por subbase y base granular y una o más capas de concreto asfáltico.

que se generan son activos. En este efecto inciden no solamente la petrología del agregado sino también la forma de las partículas, ya que las planas y alargadas son más fáciles de fragmentar que las equidimensionales, y una partícula redondeada sufre menos atrición que una angulosa.

Resistencia a la fragmentación

Hay muchos ensayos que intentan simular esta situación. El más empleado en Colombia y en muchos otros países es el de degradación por abrasión, impacto y molienda en la máquina de Los Ángeles. Los resultados de las investigaciones relacionadas con la significación del ensayo de Los Ángeles son muy variados. Muchas han concluido que tiene una buena relación recíproca con los ensayos de impacto, pero que no es un indicador de la resistencia a la abrasión ni se correlaciona bien con el comportamiento en el campo. Las esferas de acero crean un impacto vigoroso sobre la muestra de ensayo, el cual eclipsa cualquier abrasión interparticular, que es el proceso predominante en los pavimentos sometidos al tránsito. Por otra parte, algunas de las rocas más blandas tienden a absorber la energía del impacto de las esferas, lo que se traduce en bajos valores de desgaste, incluso dentro de los límites de tolerancia.

El ensayo de Los Ángeles mide la degradación de un agregado pétreo con una composición granulométrica definida, como resultado de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero rotatorio que contiene un número determinado de esferas metálicas, que depende de la granulometría de la muestra de ensayo. A medida que gira el tambor, una pestaña de acero recoge la muestra y las esferas y las arrastra hasta que caen por gravedad en el extremo opuesto del tambor, creando un efecto de impacto y trituración. Entonces la muestra y las esferas ruedan dentro del tambor, hasta que la pestaña las levanta y se repite el ciclo. Tras el número especificado de revoluciones, se retira el contenido del tambor y se tamiza la porción de agregado para medir la degradación, como un porcentaje de pérdida de tamaño de las partículas.

Dentro de este grupo de pruebas de degradación mecánica se puede incluir también el ensayo del 10 % de finos, ideado en la Gran Bretaña para obtener una medida relativa de la resistencia de los agregados al aplastamiento. El 10 % de finos es la carga requerida para producir 10 % de partículas pasantes del tamiz de 2,36 mm (N.º 8) al someter una muestra de gravilla a una carga de compresión aplicada gradualmente.

La prueba del 10 % de finos consiste en compactar en un cilindro metálico una muestra de agregado de tamaño especificado, aplicándole golpes con una varilla. La muestra compactada se somete gradualmente a un esfuerzo de compresión, a causa del cual sus partículas se van fragmentando en una cuantía que depende de su resistencia al aplastamiento. El grado de fragmentación del agregado se evalúa mediante el tamizado del espécimen a través de un tamiz de 2,36 mm (N.º 8), luego de terminada la compresión. El procedimiento se realiza con varias cargas de compresión, con el fin de establecer la carga con la cual se produce en el agregado 10 % de partículas, en masa, que atraviesan las aberturas de este tamiz.

Algunos investigadores han hecho intentos para correlacionar los valores obtenidos al realizar estos dos ensayos. En la figura 1 a) se presentan los datos obtenidos por Minty et al. en 1980 y por Kissakwa en 1990, los cuales muestran una tendencia hacia una correlación no lineal. Cuatro análisis de regresión efectuados con esos datos dieron como resultado las relaciones promedio que se muestran en la figura 1 b), de acuerdo con las cuales una carga de 100 kN en el ensayo de 10 % representa, aproximadamente, un desgaste Los Ángeles de 30 % y una de 200 kN queda representada por un desgaste de 20 % (ref. 2). Como la dispersión de los datos es muy amplia, estos valores se deben tomar sólo como orientativos.

En investigaciones realizadas por el Ministerio de Transporte de Ontario (Canadá) se llegó a la conclusión de que el ensayo de abrasión micro-Deval era un buen indicador del comportamiento de los agregados en servicio y que los límites establecidos para sus resultados resultaban mucho más efectivos que los basados en la prueba de Los Ángeles (figura 2); además, se consideró

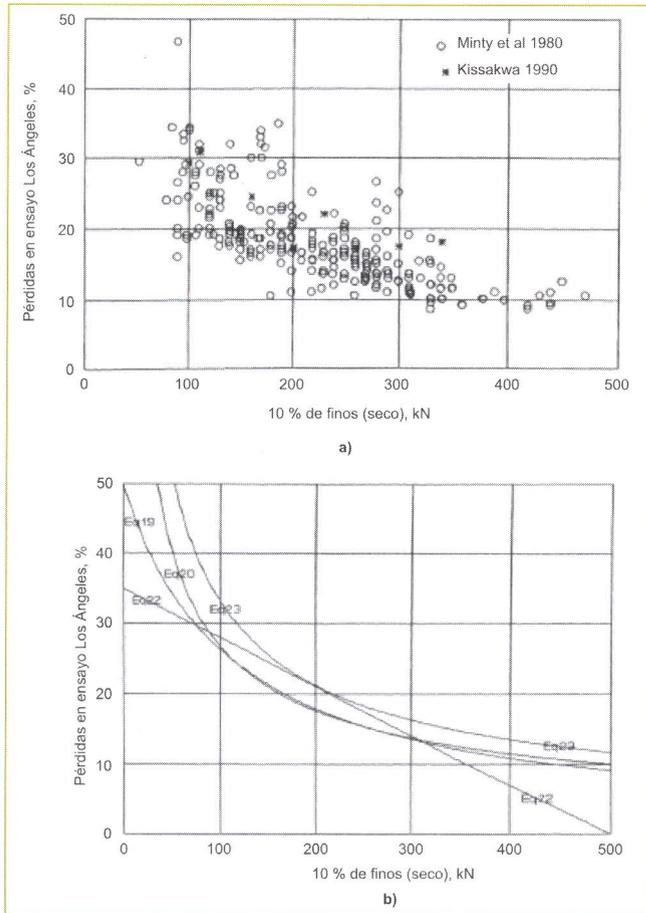


Figura 1. Relaciones entre los resultados de los ensayos de 10 % de finos y Los Ángeles (ref. 2).

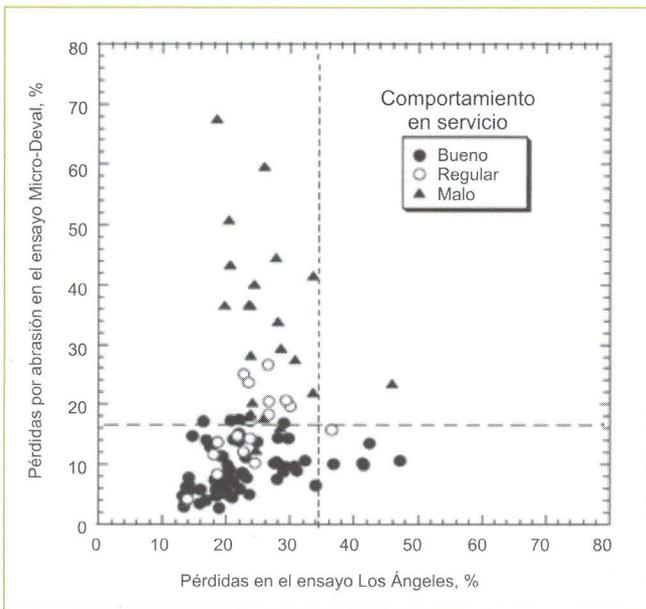


Figura 2. Relaciones entre los resultados de los ensayos de Los Ángeles y micro-Deval sobre cerca de cien muestras de agregados para capas asfálticas de rodadura en Ontario (ref. 3).

que por ser un ensayo de abrasión por vía húmeda ponía en clara evidencia aquellos tipos de rocas débiles que tienden a desintegrarse o a ver reducida su resistencia cuando se humedecen. La acogida que ha tenido este ensayo es tal que inclusive se han realizado estudios para establecer la posibilidad de que reemplace los ensayos tradicionales de solidez en sulfatos para medir la resistencia de los agregados al intemperismo.

El ensayo micro-Deval es una medida de la resistencia a la abrasión y de la durabilidad de los agregados pétreos, como resultado de una acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua. Existen dos versiones: una para el agregado grueso y otra para el agregado fino. El artículo 450 de las especificaciones del Invías solamente considera la primera. En este caso, una muestra del agregado grueso, con granulometría normalizada, se sumerge inicialmente en agua durante un lapso no menor de una hora. La muestra se coloca en seguida en un recipiente de acero de 20 cm de diámetro, con 2,0 litros de agua y una carga abrasiva, consistente en 5000 g de esferas de acero de 9,5 mm de diámetro. Recipiente, agregado, agua y carga se rotan a 100 r.p.m. hasta por 2 horas, dependiendo del tamaño de las partículas. Posteriormente, se lava la muestra y se seca en el horno. La pérdida es la cantidad de material que pasa el tamiz de 1,18 mm (N.º 16), expresada como porcentaje de la masa seca original de la muestra.

Resistencia al pulimento

El pulimento es la pérdida de microtextura de la superficie de los agregados que se encuentra expuesta a los neumáticos de los vehículos. La principal causa del pulimento es el tránsito. Si el agregado se pulimenta demasiado, la superficie del pavimento se vuelve resbalosa, en especial cuando se encuentra húmeda, y el número de accidentes por deslizamiento se puede incrementar. En consecuencia, la resistencia de las partículas del agregado al pulimento es una característica esencial para la seguridad de los usuarios. Por su concepto, se exige solamente a los agregados que vayan a formar parte de la capa de rodadura.

El desarrollo y la retención de la microtextura se caracterizan mediante el coeficiente de pulimento ace-

lerado (CPA). La resistencia al pulimento depende fundamentalmente de la naturaleza petrológica de la roca de origen. De acuerdo con estudios realizados en la Gran Bretaña (ref. 4), los agregados gruesos provenientes de areniscas y de algunas rocas ígneas, como el basalto y el granito, presentan una alta resistencia al pulimento, en tanto que los de tipo calizo tienden a pulimentarse mucho bajo la acción del tránsito automotor.

El ensayo de pulimento acelerado consiste en montar catorce probetas compuestas por partículas de gravilla sobre la periferia lisa de una rueda de 40 cm de diámetro, empleando un mortero de resina, y sometiénolas a la acción de una rueda neumática de 20 cm y de un material abrasivo. El ensayo tarda seis horas; durante las tres primeras, el material abrasivo que se aplica a la rueda es un esmeril granulado con tamaños entre 600 y 300 μm , mientras que en las tres horas siguientes se utiliza polvo de esmeril muy fino. La velocidad periférica del neumático es de aproximadamente 24,5 km/h. El estado de pulimento alcanzado por cada probeta después de tratada en la máquina se mide por el coeficiente de fricción entre su superficie y una zapata de caucho de un aparato portátil de tipo péndulo, para determinar el coeficiente de pulimento acelerado (CPA). Se considera que el estado de pulimento de las probetas al cabo de seis horas se aproxima al estado final de pulimento que alcanza el agregado luego de varios meses en una carretera sometida a tránsito muy intenso o de varios años en una carretera de tránsito liviano.

Una alta resistencia al pulimento es siempre deseable, con tal de que el agregado también sea durable. Un error frecuente entre los ingenieros consiste en pensar que debe existir una relación directa entre las resistencias del agregado al desgaste y al pulimento. Si bien estos dos conceptos no son estrictamente separables, representan características diferentes de los agregados, ya que mientras el pulimento es una reducción de la microtextura del agregado, el desgaste lo es de la macrotextura (ref. 5). Por tal razón, y dependiendo de su petrografía, algunos agregados exhiben alta resistencia al pulimento cuando su resistencia a la abrasión es alta, mientras otros presentan alta resistencia al pulimento para una baja resistencia a la abrasión (ref. 6). En investigaciones hechas en la

Gran Bretaña llegaron a la conclusión de que, como regla general, los agregados constituidos por granos de minerales de diferente tamaño o dureza, o de granos duros en una matriz cementante más blanda, presentan mayores valores de CPA que aquellos compuestos por granos uniformes de dureza semejante dentro de una matriz de dureza similar.

Los resultados del comportamiento en servicio de cerca de un centenar de mezclas asfálticas elaboradas con agregados evaluados mediante los ensayos de pulimento acelerado y micro-Deval (figura 3) indican la necesidad de balancear apropiadamente las resistencias al desgaste y al pulimento (ref. 3).

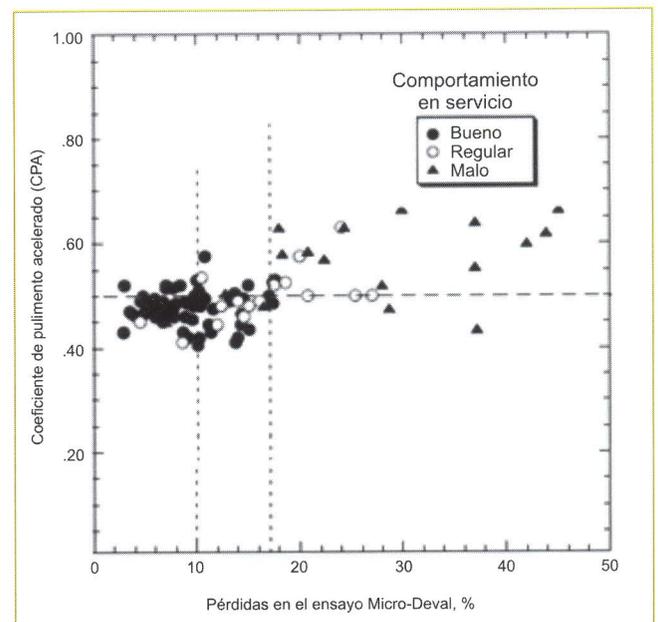


Figura 3. Relaciones entre los resultados de los ensayos micro-Deval y de pulimento acelerado sobre cerca de cien muestras de agregados para capas asfálticas de rodadura en Ontario (ref. 3).

RESISTENCIA AL INTEMPERISMO

Además de presentar tenacidad y resistencia a la abrasión, los agregados deben ser resistentes a la rotura o a la desintegración cuando se ven sometidos a ciclos de humedecimiento y secado (también a congelamiento y deshielo en países donde hay estaciones).

Alterabilidad de los agregados

Aunque los agregados provenientes de algunos tipos de rocas presentan mayor sensibilidad que otros a los

cambios físico-químicos producidos por los agentes ambientales, y un estudio petrográfico puede brindar un indicio del grado de alteración de los componentes de una roca, ni este grado es cuantificable ni tampoco es posible pronosticar la evolución de la alteración con el simple examen petrográfico. Por ello, lo usual en la ingeniería vial es tratar de evaluar la alterabilidad de los agregados a través de ensayos como los de solidez frente a la acción de sulfatos y de desleimiento-durabilidad. Este último, aunque está normalizado por el Invías (norma INV E-236), se aplica únicamente para calificar algunas rocas débiles (como las lutitas), por lo que su uso no está considerado para valorar los agregados empleados en la construcción de las capas de los pavimentos de la red vial nacional.

Mediante el ensayo de solidez se intenta determinar la resistencia de los agregados pétreos ante la acción de la intemperie. Este efecto se simula en el laboratorio sometiéndolos a inmersión repetida en soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio, seguida de secado en el horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los poros permeables de las partículas del agregado. Se supone que la fuerza de expansión interna, derivada de la rehidratación de la sal en la reinmersión, simula la expansión que sufre el agua al congelarse.

El ensayo de solidez consiste en someter una muestra del agregado, separada en varios rangos de tamaños, a cinco ciclos, consistente cada uno en inmersión en una solución saturada de sulfato de sodio o de magnesio durante 16 a 18 horas, seguida por el secado en horno a 110 °C hasta alcanzar masa constante. Este proceso hace que se formen cristales de sal en los poros permeables al agua del agregado, los cuales crean presión interna que fractura las partículas. Tras el quinto ciclo, las fracciones de la muestra se lavan, se secan en el horno y se tamizan para determinar las pérdidas individuales de masa debido a rotura o desintegración, pérdidas que se ponderan para obtener el resultado del ensayo.

El ensayo de solidez ha sido muy criticado no solamente por el tiempo que toma su ejecución y por su escasa precisión y repetibilidad sino, sobre todo, por

el cuestionamiento de su capacidad para predecir el comportamiento en servicio. Por otra parte, algunos agregados que contienen carbonatos de calcio o de magnesio son atacados químicamente por la solución de sulfato, obteniéndose valores de pérdida erróneamente altos. Asimismo, como el efecto físico que reproduce el ensayo es el de la acción del agua congelada dentro de los poros del agregado, muchos geólogos e ingenieros relacionados con la construcción vial en Colombia lo consideran excesivo, ya que los materiales de las carreteras nacionales no se encuentran sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo. A pesar de ello, el ensayo se ha mantenido en las especificaciones de construcción, por cuanto no se ha dispuesto de uno más apropiado para evaluar el posible comportamiento de los agregados en las condiciones climatológicas de servicio.

En años recientes se han hecho análisis de regresión entre los resultados de los ensayos de solidez en sulfatos y micro-Deval. Aunque se ha encontrado que hay relación directa entre ellos, en especial cuando las pérdidas en ambos son bajas, el ajuste entre los resultados no es suficientemente fuerte cuando son altas (partículas más blandas y absorbentes), condición crítica en relación con la selección de los agregados (figura 4). El hecho de que la correlación no sea mayor se debe, principalmente, a las diferencias en los mecanismos de degradación empleados en los dos ensayos. Independientemente de ello, lo que sí se ha determinado con claridad es que los resultados del micro-Deval son más consistentes y repetibles que los de la prueba de solidez.

Se puede concluir, en síntesis, que disponer de un ensayo realmente apropiado y ampliamente aceptado para valorar la resistencia al intemperismo de los agregados empleados en la construcción de pavimentos sigue siendo un asunto pendiente.

LIMPIEZA

Un aspecto fundamental para garantizar el buen comportamiento de los agregados utilizados en las capas de los pavimentos es su limpieza. Los agregados deberán estar exentos de materia orgánica, finos arcillosos y otras partículas deletéreas. Con la caracterización de la limpieza lo que se pretende es que, en presencia de agua, todas las capas del pavimento conserven sus propiedades resistentes y, en el caso de las mezclas asfálticas, no haya problemas de adhesividad.

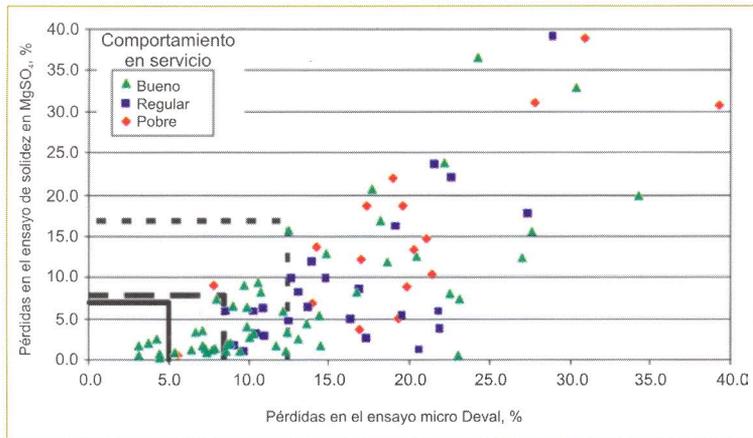


Figura 4. Comparación entre las pérdidas en el ensayo micro-Deval y en el de solidez sobre agregados empleados en la elaboración de mezclas de concreto asfáltico (ref. 7).

Las causas más frecuentes de la falta de limpieza de un agregado pétreo son el polvo adherido a las partículas durante su manufactura y su contaminación debido a una explotación incorrecta de las fuentes de materiales o por los suelos sobre los que se apoyan los materiales procesados durante su acopio, manejo y puesta en obra.

Presencia de finos perjudiciales. Plasticidad

Las pruebas más elementales que contemplan las especificaciones del Invías para establecer la limpieza de los agregados son las que conducen a la determinación del índice plástico. Aunque no hay una correlación reportada entre la plasticidad de la fracción fina de los materiales de las capas de un pavimento y el desempeño de éste, está comprobado que ella afecta negativamente el comportamiento de las capas granulares, pues una cantidad excesiva de finos plásticos les puede hacer perder resistencia al humedecerse, promoviendo el ahuellamiento u otro tipo de deformación permanente; sin embargo, su efecto puede resultar poco significativo cuando la cantidad de finos es muy baja. Es evidente, en consecuencia, que los factores granulometría y plasticidad se deben considerar en conjunto. Teniendo en cuenta las franjas granulométricas incluidas en las especificaciones de las capas de base y subbase granular, se estima que si la plasticidad se mantiene por debajo del límite establecido en ellas, su efecto nocivo queda controlado.

En el caso de los agregados para las mezclas asfálticas densas, es deseable la presencia de partículas finas

(denominadas llenante mineral) para formar un mástico de alta resistencia cohesiva con el ligante asfáltico, que haga menos sensible la mezcla asfáltica a la acción del agua. En este caso, la ausencia absoluta de plasticidad en la fracción fina es crucial para evitar problemas de adhesividad.

El índice plástico de un suelo o de la fracción fina de un agregado es la diferencia entre sus límites líquido y plástico y corresponde al rango de humedad dentro del cual el material manifiesta un comportamiento plástico.

El límite líquido se determina mediante tanteos, en los cuales una porción de la muestra pasante por el tamiz de $0,425 \mu\text{m}$ (N.º 40) se esparce sobre una cazuela de bronce y se divide en dos partes con un ranurador, permitiendo que esas dos partes fluyan como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la cazuela sobre una base normalizada. El ensayo requiere tres o más tanteos sobre un rango de contenidos de agua, cuyos resultados, al ser representados en un gráfico que ponga en conexión el número de golpes con la humedad, permiten establecer una relación a partir de la cual se determina el límite líquido, definido en el ensayo como el contenido de agua del suelo correspondiente al cierre de la ranura en una longitud aproximada de 13 mm tras 25 golpes recibidos por la cazuela.

El límite plástico se determina presionando de manera repetida una pequeña porción de suelo húmedo, de modo que se puedan formar rollos de 3,2 mm ($1/8''$) de diámetro, hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el que se produce el agrietamiento y/o el desmoronamiento de los rollos. El límite plástico es la humedad más baja con la cual se pueden formar rollos de suelo de este diámetro, sin que se agrieten o desmoronen.

Presencia de finos perjudiciales. Equivalente de arena y azul de metileno

El equivalente de arena es un ensayo muy práctico por su facilidad de ejecución y porque proporciona una información interesante en relación con la limpieza de las partículas menores de 4,75 mm. Sin embargo, es un ensayo incompleto, pues su resultado depende tanto de la cantidad como de la nocividad de los finos. Es posible

obtener el mismo equivalente de arena para finos más o menos plásticos, solamente variando su contenido (figura 5). Por esta razón, el ensayo se complementa, mas no se sustituye, con el de azul de metileno, el cual evalúa la actividad de la arcilla nociva presente en el agregado.

En el ensayo de equivalente de arena, un volumen normalizado de suelo o de agregado fino y una pequeña cantidad de solución floculante se colocan en un cilindro de plástico graduado y se agitan, para que las partículas de arena pierdan la cobertura de material arcilloso o similar. La muestra es posteriormente "irrigada", usando cierta cantidad de solución floculante, para forzar al material arcilloso o similar a quedar en suspensión sobre la arena. Después de un período de sedimentación, se determinan las alturas de la arcilla floculada y de la arena en el cilindro. El equivalente de arena es la relación entre la altura de arena y la altura que alcanza la arcilla, expresada en porcentaje.

El ensayo del valor de azul de metileno consiste en añadir de manera sucesiva pequeñas dosis de una solución de azul de metileno a una suspensión de la muestra de ensayo en agua. Después de cada dosis se comprueba la absorción de solución colorante por parte de la muestra, realizando una prueba de coloración sobre papel de filtro para detectar la presencia de colorante libre. Una vez confirmada la presencia de colorante libre, se calcula el valor de azul de metileno, expresado en gramos de colorante absorbido por kilogramo de la fracción granulométrica ensayada.

Presencia de partículas deletéreas

La determinación de la cantidad de terrones de arcilla y partículas deleznable es otra manera de verificar la limpieza de los agregados. Las partículas deleznable comprenden contaminantes como esquistos, madera, mica, carbón y otros materiales friables, cuya presencia en exceso afecta adversamente la capacidad de respuesta y la permeabilidad de las capas granulares, así como la adherencia con el asfalto en las capas ligadas, lo que genera desprendimientos.

El ensayo para determinar la cantidad de terrones de arcilla y partículas deleznable en un agregado consiste en tomar una muestra representativa de éste, secarla, pesarla y luego cubrirla con agua durante 24 horas, después de las cuales las partículas se ruedan y aprietan individualmente entre el pulgar y el índice para tratar de romperlas en tamaños más pequeños. Todas las partículas que se puedan romper con los dedos, convirtiéndolas en finos removibles mediante tamizado en húmedo, se clasificarán como terrones de arcilla o partículas deleznable. Posteriormente, la muestra se tamiza en húmedo, se remueven con cuidado de los tamices las partículas retenidas, se secan hasta masa constante a una temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, se dejan enfriar y se determina su masa. La diferencia entre las masas inicial y final, dividida por la inicial, es el resultado del ensayo.

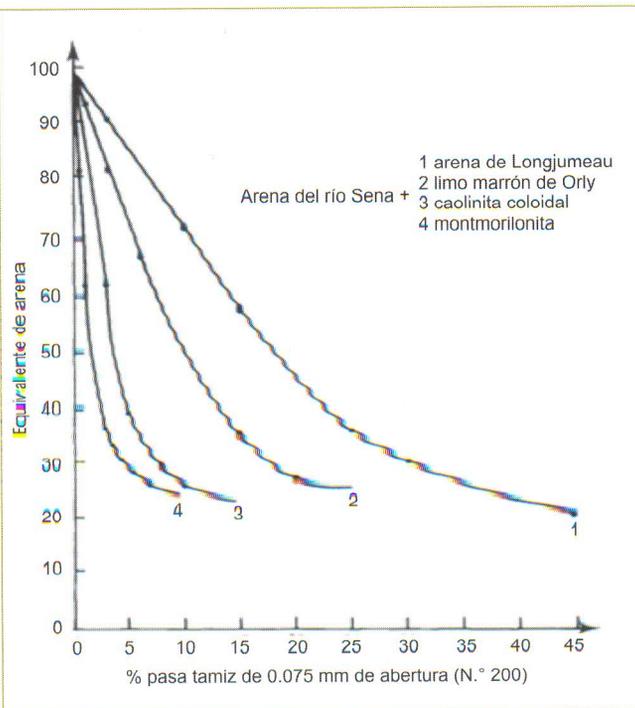


Figura 5. Variación del equivalente de arena en función del tipo y porcentaje de finos (ref. 8).

Limpieza del agregado grueso

La falta de limpieza es uno de los problemas más comunes de los agregados pétreos en Colombia. Un agregado

limpio y seco se deja mojar fácilmente por los ligantes hidrocarbonados. En ese orden de ideas, el Instituto Nacional de Vías decidió complementar los ensayos corrientes con otro de inspiración francesa, aplicándolo a la verificación de la limpieza de los agregados destinados a la elaboración de mezclas asfálticas. A la fecha no se conocen, sin embargo, referencias nacionales ni extranjeras sobre la real efectividad práctica de la ejecución de este ensayo.

El ensayo para la determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso consiste en separar por lavado, mediante un tamiz de referencia, las partículas menores de 0.5 mm mezcladas o adheridas a la superficie de las partículas del agregado grueso, las cuales se consideran como impurezas. Posteriormente, se calcula el porcentaje en masa de las impurezas respecto de la masa seca de la muestra total, el cual se denomina "coeficiente de limpieza superficial".

GEOMETRÍA

Junto con la forma, la dureza y la limpieza, la granulometría tiene gran influencia sobre el comportamiento mecánico y las propiedades de resistencia de las partículas en contacto y, consecuentemente, de la capa de la que forman parte. El tamaño máximo del agregado, la distribución de los tamaños y la forma de las partículas determinan la manera como ellas se puedan empaquetar, suponiendo que son sometidas a una compactación apropiada.

Forma

En relación con la forma, se prefieren las partículas equidimensionales a las aplanadas o alargadas, ya que estas últimas corren el riesgo de partirse debido a las tensiones provocadas durante su manejo y compactación o bajo la acción posterior del tránsito, modificando con ello la granulometría de las capas y, consecuentemente, su capacidad de respuesta y su permeabilidad. Aun si no se parten, las partículas aplanadas y alargadas generan problemas de trabajabilidad, pues se tienden a inmovilizar con las adyacentes, resistiéndose a la reorientación necesaria para conformar una estructura

más densa. Por lo tanto, un exceso de partículas planas y alargadas implica aumentar la energía de compactación para alcanzar una determinada densidad.

En las mezclas asfálticas, la modificación de la granulometría ocasionada por la fractura de estas partículas produce otras de menor tamaño que ocupan los vacíos en los agregados minerales, reduciendo el espacio disponible para que el asfalto cubra adecuadamente todo el agregado y dejando muchas partículas expuestas, lo que se puede traducir en la inestabilidad de la mezcla. De hecho, se ha establecido que el aumento de partículas aplanadas disminuye el módulo de las mezclas, haciéndolas más propensas al ahuellamiento (tabla 2).

Tabla 2
Variación del módulo resiliente con la proporción de partículas aplanadas en una mezcla densa en caliente (ref. 9)

| Partículas aplanadas (%) | Módulo resiliente (MPa) | |
|--------------------------|-------------------------|-------|
| | 25 °C | 40 °C |
| 10 | 2444 | 324 |
| 20 | 2353 | 305 |
| 30 | 2278 | 298 |

En Colombia, la forma de las partículas de los agregados pétreos se ha evaluado a través de sus índices de aplanamiento y alargamiento desde 1970, con motivo de una asistencia técnica prestada por el Road Research Laboratory al Ministerio de Obras Públicas. Hace pocos años, el Invías decidió adoptar también un ensayo que forma parte del diseño de mezclas asfálticas del sistema Superpave, mediante el cual se determinan los porcentajes de partículas planas, alargadas y planas y alargadas. Este último ensayo es exigido por el Invías únicamente a los agregados destinados a la elaboración de mezclas asfálticas.

El ensayo de índice de aplanamiento consiste en dos operaciones sucesivas. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones, comprendida cada fracción entre los tamices de aberturas D_i (mayor) y d_i (menor). A continuación, cada una de las fracciones se criba empleando tamices de barras paralelas colocadas a separaciones $0,6 \times [(d_i + D_i)/2]$. Las partículas

que pasen el tamiz son consideradas planas. En lugar de los tamices de barras paralelas, se puede utilizar un calibrador con ranuras cuyas aberturas son del mismo tamaño de las separaciones de las barras de los tamices.

El ensayo de índice de alargamiento consiste, también, en dos operaciones sucesivas. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones. Luego, cada fracción se analiza utilizando un calibrador de longitudes, el cual tiene barras verticales separadas a distancias $1,8 \times [(d_i + D_i)/2]$. Se considera que todas las partículas retenidas por las barras son alargadas.

En el ensayo para la determinación de los porcentajes de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en un agregado grueso, se miden partículas individuales de agregado de una fracción de tamaño específico, y se determinan las relaciones ancho/espesor, largo/ancho o largo/espesor, a partir de las cuales se calculan porcentajes por número o por masa o ambos, para cada grupo: 1) partículas planas; 2) partículas alargadas, y 3) total de partículas que son simultáneamente planas y alargadas, así como el porcentaje de partículas que no son ni planas ni alargadas.

El procedimiento de ensayo en el caso del agregado grueso consiste, en esencia, en separar manualmente las partículas que presenten caras fracturadas en cada una de las fracciones representativas del agregado y obtener su respectivo porcentaje, a partir del cual se calcula el porcentaje ponderado de la muestra total. Se debe usar la masa para calcular el porcentaje de partículas fracturadas, a menos que se especifique calcularlo con base en el conteo de partículas.

En el ensayo para determinar la angulosidad del agregado fino, un recipiente cilíndrico calibrado de 100 ml se llena con una muestra del material con la gradación prescrita, permitiendo que ésta fluya a través de un embudo desde una altura fija dentro del recipiente. El agregado fino se extrae del recipiente y se pesa para determinar su masa. Se calcula el contenido de vacíos de la muestra sin compactar como la diferencia entre el volumen del medidor cilíndrico y el volumen absoluto del agregado fino recogido en el medidor. El contenido de vacíos del agregado fino sin compactar se calcula usando su densidad relativa seca (gravedad específica). Se hacen dos medidas con cada muestra y los resultados se promedian.

Angulosidad

La angulosidad mide las caras fracturadas y la rugosidad de los bordes de las partículas de un agregado. Es importante, por cuanto determina el nivel de resistencia interna al corte que se puede desarrollar en el medio interparticular. Las partículas redondeadas y no trituradas, como la grava de río, con una microtextura lisa, tienden a moverse bajo las cargas del tránsito, brindando una escasa resistencia al ahueclamiento. Los aumentos de caras fracturadas y de aspereza en la microtextura aumentan el módulo resiliente y disminuyen la relación de Poisson de los agregados, debido a que el mayor número de contactos entre partículas desarrolla más trabazón entre ellas y distribuye mejor los esfuerzos producidos por las cargas del tránsito.

El Instituto Nacional de Vías caracteriza la angulosidad de las partículas del agregado grueso a través del porcentaje de caras fracturadas, mientras que la de las partículas del agregado fino se controla determinando el contenido de vacíos de una muestra de él en estado suelto.

Granulometría del agregado combinado

Uno de los ensayos básicos de laboratorio sobre los agregados en conjunto es el de granulometría, cuya finalidad es conocer la distribución de los tamaños de las partículas destinadas a la construcción de una determinada capa de pavimento. Las diferencias en las gradaciones se traducen en comportamientos significativamente distintos, aun en agregados del mismo tipo. Esto es el resultado del empaquetamiento diferente y de la distribución de vacíos, que desempeñan un papel fundamental en la distribución de los esfuerzos producidos por las cargas a través del contacto interparticular. La forma de curva granulométrica y el contenido de finos están interconectados en sus efectos sobre cuestiones tan importantes como la drenabilidad, la compactabilidad y las características resilientes y de resistencia a la deformación de las capas.

No viene al caso comentar las franjas granulométricas y su repercusión en las unidades de obra, pues se trata de un tema más propio de cada partida de trabajo que de las características exigibles a los agregados.

La práctica ha legitimado, para las unidades de obra, una serie de husos en los que debe encajar la granulometría o fórmula de trabajo respecto de la cual las especificaciones fijan las desviaciones admisibles durante la construcción de la capa. La mayor parte de las granulometrías especificadas para las mezclas asfálticas son sensiblemente continuas, a fin de lograr la máxima compacidad y estabilidad del conjunto, aunque también se emplean gradaciones uniformes (mezclas abiertas en caliente) y discontinuas (mezclas drenantes y mezclas discontinuas en caliente para rodadura).

La influencia de la granulometría en la formación de distintos tipos de estructuras granulares, con énfasis en las mezclas asfálticas, se trata de manera amplia en la referencia 10. Un procedimiento para desarrollar y ajustar combinaciones de agregados para mezclas asfálticas que garanticen la trabazón y el adecuado empaquetamiento de ellos, brindando una adecuada resistencia a la deformación permanente y manteniendo propiedades volumétricas que propician resistencia a los efectos ambientales, se describe en la referencia 11.

CARACTERÍSTICAS DEL LLENANTE MINERAL

El material que pasa el tamiz de $75 \mu\text{m}$ (N.º 200) del agregado empleado en la elaboración de las mezclas asfálticas requiere valoración mediante unas pruebas particulares. Ante todo, se especifica si el llenante puede ser el propio de los agregados o si debe provenir, parcial o totalmente, de aportación. Cualquiera sea el caso, se deberá tratar de un material no plástico.

Finura

La finura del llenante mineral no debe ser excesiva, pues podría dar lugar a problemas de envuelta y al requerimiento de un cantidad exagerada de asfalto en la mezcla. Esta propiedad se caracteriza a través de su densidad *bulk*.

El ensayo de densidad *bulk* consiste en medir el volumen ocupado por una cantidad especificada del llenante mineral cuando se sedimenta en kerosene. La densidad se obtiene dividiendo la masa del material ensayado por el volumen que ocupó. A mayor volumen sedimentado menor es la densidad, lo que indica que el llenante es más fino.

Concentración

La capacidad de las partículas del llenante para empaquetarse y retener el asfalto y contribuir en la formación de un mástico³ de rigidez adecuada se puede estimar calculando su volumen de vacíos al ser compactado bajo condiciones normalizadas. De acuerdo con la literatura, entre mayores sean estos vacíos (llamados también vacíos Rigden), mayor es la contribución producida por el llenante a la resistencia viscosa del asfalto.

Sin embargo, el aumento progresivo de concentración de llenante en el mástico va produciendo una desviación cada vez más marcada del flujo viscoso del sistema y va desarrollando cierta rigidez (viscosidad estructural) que reduce la capacidad de deformación a carga y temperatura constante (ref. 12). Para conservar la capacidad de deformación viscosa del sistema llenante-asfalto, es necesario que la concentración volumétrica del llenante en el sistema no supere un valor "crítico" que establece la máxima relación llenante/asfalto que asegura la capacidad de deformación del mástico sin rotura por rigidez.

El ensayo destinado a determinar esa concentración crítica no es una prueba de calidad tendiente a la aceptación o al rechazo del llenante, sino a controlar cuantitativamente su incorporación en las mezclas para evitar problemas de rigidez. En tal sentido, se puede considerar como complementario del destinado a conocer los vacíos del llenante seco compactado. La concentración crítica corresponde a una dispersión de las partículas del llenante en el asfalto en el estado más suelto posible pero con contacto entre ellas, es decir, cuando el esfuerzo aplicado es consumido en la deformación viscosa del medio continuo (asfalto), y la resistencia friccional entre las partículas minerales tiende a un mínimo.

El volumen de vacíos del llenante mineral seco compactado se determina colocando y compactando una muestra del llenante seco en un molde bajo condiciones normalizadas y determinando el volumen ocupado por ella. Con la masa y el volumen, más la gravedad específica del llenante, se calculan

3. Se llama mástico al conjunto conformado por el ligante asfáltico y el llenante mineral en una mezcla asfáltica.

los vacíos con aire en la muestra compactada empleando relaciones geométricas.

El ensayo de concentración crítica se realiza añadiendo una masa conocida de llenante seco a 20 cm³ de kerosene libre de agua, contenidos en una probeta. La probeta se sumerge en un baño de agua en ebullición, agitando el contenido con un alambre fino hasta eliminar totalmente el aire. Al cabo de una hora se retira la probeta del baño y se deja sedimentar en reposo completo durante 24 h. A continuación, se lee el volumen del sedimento. La concentración crítica se determina dividiendo la masa de llenante utilizada, por su gravedad específica y por el volumen del sedimento.

los suelos para diseñar pavimentos de calles, carreteras y aeropistas, así como para determinar la idoneidad de los materiales granulares previstos para la construcción de capas granulares de subbase y de base.

El ensayo CBR mide el esfuerzo necesario para penetrar un pistón de dimensiones determinadas a una velocidad previamente fijada en una muestra compactada bajo determinadas condiciones de humedad y densidad y, generalmente, después de un lapso de inmersión en agua. La relación, en porcentaje, entre este esfuerzo y el requerido para penetrar la misma profundidad una muestra de referencia es la resistencia de la muestra ensayada, expresada en unidades de CBR.

RESISTENCIA

Las consideraciones más importantes en relación con la construcción de las capas granulares no ligadas de un pavimento se relacionan con la uniformidad de su colocación in-situ, el nivel de compactación y la modificación de su humedad desde la compactación hasta su cobertura. El nivel de compactación y la humedad condicionan la resistencia a la deformación permanente y el módulo de los materiales granulares durante el servicio del pavimento.

En el estado actual de la práctica, los métodos de diseño de pavimentos asfálticos exigen la caracterización de la subrasante y de los materiales granulares no ligados a través de su módulo resiliente (MR), el cual se determina mediante un ensayo triaxial cíclico, sometiendo un espécimen del suelo a una carga pulsante de duración definida.

El ensayo triaxial cíclico requiere un equipo y unas condiciones de trabajo muy especiales, motivo por el cual su ejecución resulta dispendiosa, demorada y costosa, de manera que, en la mayoría de los estudios rutinarios, no es posible o no resulta práctico realizarlo, siendo habitual valorar la capacidad de respuesta de los materiales mediante otros ensayos más expeditos, de los cuales el más empleado en Colombia y en buena parte del mundo es el CBR. Aun reconociendo que el CBR no mide una propiedad fundamental de los suelos ni de los agregados pétreos, hay acumulada tanta experiencia con su empleo, que infinidad de agencias viales nacionales (el Inviás entre ellas) e internacionales lo siguen utilizando como prueba para valorar la respuesta de

ADHESIVIDAD

Las dos principales causas por las cuales el agua afecta la integridad de la interfase asfalto-agregado en una mezcla son la pérdida de adhesión entre la película de ligante y las partículas del agregado y la pérdida de la resistencia cohesiva de la mezcla. La pérdida de adhesión es producida por el agua que se logra interponer entre la película de asfalto y el agregado provocando la desunión de éste y los consecuentes desprendimientos del asfalto que envuelve las partículas, mientras la pérdida de cohesión se debe al debilitamiento que produce la presión de poros generada por el agua en el sistema asfalto-llenante mineral de la mezcla. Que la falla sea adhesiva o cohesiva depende de la naturaleza del mortero asfáltico (sistema asfalto-llenante) y del espesor de la película asfáltica que rodea las partículas de los agregados. Se ha determinado que cuando la película es muy delgada, la mezcla se deteriora a causa de la rotura de la liga adhesiva entre la película y las partículas minerales, mientras que cuando es espesa, el daño por humedad se produce debido a una falla cohesiva.

Sería deseable que existiera un método seguro para determinar en el laboratorio si un ligante asfáltico se adherirá bien a un determinado tipo de agregado en presencia de agua. Hasta el presente, los estudios sobre las propiedades físico químicas del sistema agregado-asfalto-agua no han sido suficientemente concluyentes para conducir a un método confiable para uso rutinario.

Los ensayos desarrollados para evaluar la sensibilidad de las mezclas asfálticas a la humedad se pueden clasificar en dos grandes grupos: los que se realizan sobre mezclas en estado suelto y los que se conducen sobre mezclas compactadas. Los del primer grupo solamente ofrecen una estimación de la compatibilidad entre el asfalto y el agregado y del potencial de pérdida de envuelta en presencia de agua, mientras los del segundo grupo intentan considerar, mediante pruebas mecánicas, la acción del agua (y en algunos casos también el efecto del tránsito) sobre el comportamiento de las mezclas compactadas. Las especificaciones de construcción del Instituto Nacional de Vías incluyen tres ensayos para determinar las condiciones de adhesividad en presencia de agua: dos del primer grupo (uno para el agregado fino y uno para el grueso) y uno del segundo grupo.

Adhesividad del agregado fino con el asfalto

Las especificaciones exigen valorar la adhesividad de los ligantes asfálticos con las arenas naturales o provenientes de trituración, sometiendo una mezcla de ellos a la acción de soluciones de carbonato sódico de concentración molar creciente, prueba conocida como Riedel-Weber. Aunque las condiciones de este ensayo no representan en absoluto la realidad de la obra, se lo considera eficaz por su rigor, de forma que una buena adhesividad dada por él se traduce, normalmente, en un margen de seguridad suficiente para el uso del agregado fino. El ensayo es muy utilizado, por cuanto brinda una respuesta expresada numéricamente y, además, es de muy sencilla ejecución.

En el ensayo Riedel-Weber una muestra del agregado se reduce al tamaño 0,2/0,6 mm y se envuelve con el ligante en una proporción determinada. Se toman 0,5 g del aglomerado y se hierven en 6 ml de agua durante un minuto. Si el ligante se separa del agregado, se considera que la adherencia entre ellos es pobre. Si esto no ocurre, se repite el ensayo sustituyendo el agua por 6 ml de solución de carbonato de sodio en concentraciones crecientes, utilizando cada vez una nueva porción del aglomerado. La adhesión se califica con un número asignado a la menor concentración de carbonato de sodio que produce el desplazamiento total del ligante de la superficie de la arena.

Adhesividad del agregado grueso con el asfalto

Las especificaciones de construcción del Inviás exigen valorar la adhesividad del agregado grueso con el asfalto mediante un ensayo rápido que permite determinar visualmente la pérdida de adherencia en mezclas sueltas de agregados cubiertos con asfalto, al ser sometidas a la acción de agua hirviendo. La ASTM considera que este método de ensayo es útil como indicio de la vulnerabilidad relativa del agregado cubierto de asfalto a la acción del agua, aunque recomienda no emplearlo como un indicador de su comportamiento en el campo, porque aún no se han establecido correlaciones para tal fin. Sugiere, además, que si el resultado muestra una pérdida importante de adherencia debido a la acción del agua, se empleen otros métodos de ensayo más detallados, para evaluar mejor la mezcla en relación con las características de adherencia del par ligante-agregado.

En todo caso, la prueba es muy incierta, tanto por lo subjetivo de su resultado como por el hecho de que si se observan desprendimientos, no se puede saber si se deben a la acción del agua o a la poca afinidad existente entre el agregado y el ligante.

El ensayo consiste en colocar durante diez minutos una muestra de mezcla asfáltica suelta en un recipiente con agua destilada hirviendo. Tras permitir el enfriamiento de la mezcla hasta alcanzar la temperatura ambiente, se decanta el agua y se vacía la mezcla húmeda sobre una toalla de papel blanco. Enseguida se determina visualmente la retención de la cobertura asfáltica por parte del agregado. Cualquier área con cubrimiento tenue, ennegrecida o translúcida será considerada como plenamente cubierta.

Resistencia de la mezcla compactada a la acción del agua

Los ensayos realizados sobre probetas se ajustan mejor a las condiciones de obra, ya que cuantifican la adhesividad midiendo la pérdida de cohesión de una mezcla compactada en una prueba de tracción indirecta, como resultado de los efectos de saturación acelerada en agua. Estos ensayos miden el comportamiento de la mezcla en conjunto (agregado grueso, agregado fino, llenante mineral y ligante).

El método especificado por el Invías es el Tunnicliff-Root. Este ensayo se emplea para probar mezclas de concreto asfáltico, en conjunto con los ensayos requeridos para el diseño de la mezcla, y su finalidad es establecer el potencial de daño por humedad, así como determinar si un aditivo mejorador de adherencia es efectivo o no y, en caso de que lo sea, encontrar la cantidad óptima de él para maximizar su efectividad. Este método de ensayo se puede usar, también, para evaluar mezclas producidas en planta, con el propósito de calificar la efectividad de los aditivos bajo las condiciones impuestas en servicio.

La sensibilidad al daño por humedad se determina preparando un grupo de especímenes compactados en el laboratorio, de acuerdo con la fórmula de trabajo de la mezcla y sin aditivos. Los especímenes se compactan de manera de obtener un contenido de vacíos con aire entre 6 y 8 %. El grupo se divide en dos subgrupos con contenidos de vacíos aproximadamente iguales; cada espécimen debe tener su par en el otro grupo. Un subgrupo se mantiene en condición seca, mientras que el otro se satura parcialmente con agua y se acondiciona en un baño de agua. La resistencia a la tensión de cada uno de los subgrupos se determina por la prueba de tracción indirecta. El potencial de daño por humedad queda indicado por la relación entre las resistencias a la tensión del subgrupo húmedo y las del subgrupo seco.

El efecto de un aditivo mejorador de la adhesividad se determina empleando un grupo de especímenes que contienen el aditivo y que se ensayan como se describe en el párrafo anterior. El efecto del aditivo se determina repitiendo las pruebas en grupos con diferentes dosis del producto.

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN

Las prácticas actuales del diseño y del control de la producción de las mezclas asfálticas se basan en las propiedades volumétricas. Los valores de las gravedades específicas de los agregados y del llenante mineral son indispensables para el cálculo de dichas propiedades en las mezclas compactadas. En esencia, las medidas de gravedad específica son factores que permiten convertir porcentajes en masa a proporciones en volumen.

Las gravedades específicas y la absorción (que se puede calcular a partir de las medidas realizadas en los ensayos normalizados para determinar las gravedades específicas) son propiedades intrínsecas de los agregados y, por lo tanto, no se especifican valores numéricos de ellas, aunque en el caso de la absorción algunas agencias viales (no en el país) la suelen limitar por cuanto una absorción elevada es sintomática de una alta porosidad que implica mayores requerimientos de ligante y, eventualmente, problemas de durabilidad, dado que su resistencia a la fragmentación es, por lo general, baja⁴.

Algunos investigadores han tratado de establecer relaciones entre la absorción y otros ensayos de calificación de los agregados. Uno de ellos intentó hallar una con los resultados de los ensayos de solidez en sulfato de sodio y aunque no la pudo obtener, encontró que el 82 % de los agregados con una absorción igual o superior a 2 % no satisfacían los requisitos exigidos a la prueba de solidez, mientras que la insatisfacción fue total cuando la absorción alcanzó 4 % (ref. 13). Estudios posteriores han confirmado que a medida que la absorción de los agregados aumenta, también lo hacen las pérdidas en la prueba en sulfatos, pero nunca se han llegado a obtener correlaciones realmente confiables.

También se han realizado investigaciones para establecer relaciones entre la absorción y la resistencia de los agregados a la fragmentación. Los coeficientes de correlación obtenidos han sido, por lo general, menores que los encontrados al compararla con las pérdidas en el ensayo de solidez (ref. 7).

EPÍLOGO

Las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías incluyen ensayos debidamente normalizados que, dentro del estado actual de la práctica y salvo excepciones, resultan significativos, a la vez que sencillos, rápidos y de suficiente precisión, repetibilidad y reproducibilidad para caracterizar los

- De la limitación en relación con el valor máximo de absorción se exceptúan algunos subproductos industriales empleados como agregados; la escoria de alto horno, por ejemplo, que pese a su alta capacidad absorbente presenta otras características que la hacen deseable, entre ellas su mayor resistencia al pulimento.

agregados pétreos. Sus características fundamentales que se pretenden evaluar con estos ensayos son la resistencia a la fragmentación, al pulimento y al intemperismo, la limpieza, la forma, la angulosidad, la granulometría, la resistencia y la adhesividad con ligantes asfálticos.

Los valores límites que fijan las especificaciones como aceptables a los resultados de los ensayos se basan en la relación entre ellos y el comportamiento en obra, de acuerdo con la experiencia local y foránea. En todos los casos, los criterios son más restrictivos a medida que los niveles de exposición y las condiciones de carga a que va a estar sometido el agregado son más intensas.

REFERENCIAS

1. <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>.
2. Vanderstaay, A.G.B. (September, 1994). An investigation into the ten percent fines test and other tests used to determine the strength of road making aggregates. Thesis submitted to the Central Queensland University.
3. Rogers, C.A., Lane, B.C. & Senior, S.A. (April, 2003). The micro-Deval abrasion test for coarse and fine aggregate in asphalt pavement. Ministry of Transportation (MTO), Downsview, Ontario, Canada, 11th Annual Symposium on Aggregates – Asphalt Concrete, Bases and Fines 2003, Austin, Texas, USA, 27-30.
4. Road Research Laboratory (1965). Materiales bituminosos en construcción de carreteras. Traducción española de Manuel Velásquez Velásquez. Madrid: Ministerio de Obras Públicas.
5. Abdui-Malak, M.-A.U., Meyer, A.H. & Fowler, D.W. (August, 1992). Implication of aggregates in the construction and performance of seal coat pavement overlays. Report N.º FHWA/TX-96/490-2, Center for Transportation Research The University of Texas at Austin.
6. Xirouchakis, D.M. (November, 2013). Correlations between mechanical and geometrical parameters in aggregates: a tool for quality assessment and control. *European Geologist, Journal of the European Federation of Geologists*, N.º 36, pp. 15-18.
7. Fowler, D.W., Allen, J.J., Lange, A. & Range, P. (June, 2006). The prediction of coarse aggregate performance by micro-Deval and other aggregate tests. Report N.º ICAR 507-1F, International Center for Aggregates Research, The University of Texas at Austin.
7. Tran, N.L. (mai-juin, 1980). L'essai au bleu de méthylène. Un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des granulats. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, 107.
8. Mahmud, M.Z.H., Yaacob, H., Jaya, R.P. & Hassan, N.A. (2014). Laboratory investigation on the effects of flaky aggregates on dynamic creep and resilient modulus of asphalt mixtures. *Jurnal Teknologi*, Penerbit UTM Press, Malaysia.
10. Rivera de Ronchi, Y. Llano, O.F.M. & Ruiz, C.L. (noviembre de 1975). Sobre la estructura granular de las mezclas asfálticas convencionales. Decimonovena reunión del asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Paraná.
11. Vavrik, W.R., Pine, W.J., Huber, G. Carpenter, S.H. & Bailey, R. (2002). Bailey method for gradation selection in HMA mixture design. Draft TRB Circular.
12. Ruiz, C.L. (febrero de 1966). Concentración crítica de filler, su origen y significado en la dosificación de mezclas asfálticas. Publicación N.º 11, Dirección de Vialidad, Provincia de Buenos Aires, La Plata.
13. Woolf, D.O. (December, 1927). Relation between sodium sulfate soundness tests and absorption of sedimentary rock. Public Roads.