

Implementación del ensayo de evaluación de la resistencia mecánica por el método de 10% de finos

Implementing the Mechanical Resistance Evaluation Test with the 10 per cent fines method

SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ

Escuela Colombiana de Ingeniería. Centro de Estudios Geotécnicos. Bogotá.

sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Recibido: 23/10/08 Revisado: 31/10/08 Aceptado: 12/12/08

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

Resumen

Teniendo en cuenta que el ensayo “Evaluación de la resistencia mecánica por el método de 10% de finos”, propuesto en las “Especificaciones generales de construcción de carreteras, 2007”, del Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías y en las “Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá, D.C. - IDU ET 2005”, no es bien conocido en Colombia, en los laboratorios de Suelos y Pavimentos del Centro de Estudios Geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería se inició un estudio para su implementación, cuyos resultados preliminares se presentan en este artículo.

Adicional a una breve revisión teórica de los conceptos básicos involucrados en el ensayo, se muestran los resultados de las pruebas de 10% de finos y de desgaste Los Ángeles, realizadas sobre seis muestras de agregado, utilizados en la ciudad de Bogotá en la construcción de estructuras de pavimento. Igualmente, se incluye el análisis de los resultados y se presentan conclusiones preliminares, teniendo en cuenta el número reducido de muestras analizadas y de referencias del ensayo que se encontraron. Finalmente, se incluyen algunas recomendaciones derivadas del proceso.

Palabras claves: agregados, 10% de finos, dureza, carreteras.

Abstract

Taking into account that the test Mechanical Strength Evaluation with the 10 per cent Fines Method (proposed within the Ministry of Transport's “General Specifications for Highway Construction - 2007” and within the document “Technical General Construction and Materials Specifications for Road Infrastructure Projects and Public Space Works in Bogotá, D.C. IDU ET 2005”) is not well known in Colombia, the Soils and Pavements Laboratory from the Geotechnical Studies Center at the Escuela Colombiana de Ingeniería began a process for its implementation. The preliminary results from this process are presented in this document.

In addition to a brief theoretical review of the basic concepts involved in the test, results from 10 per cent fines and Los Angeles Abrasion tests performed over 6 aggregate samples used in pavement construction projects in the city of Bogotá are presented. An analysis of results is included and preliminary conclusions are presented, taking into account the limited amount of samples evaluated and test references found. Some recommendations derived from the process are also included.

Keywords: aggregates, 10 per cent fines, hardness, roads.

ANTECEDENTES

En las “Especificaciones generales de construcción de carreteras”, del Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, de la República de Colombia, año 2007 (1), y en las “Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá, D.C. - IDU ET 2005” (2), dentro de los nuevos ensayos que se introducen para evaluar la dureza de los agregados pétreos que se empleen para la construcción o la conformación de las diferentes capas de la estructura de un pavimento, se encuentra el ensayo de “Resistencia mecánica por el método del 10% de finos”, o simplemente 10% de finos, contemplado en las Especificaciones del Instituto Nacional de Vías por la norma INV E-224, o por la Norma BS-812 Parte 111, en las Especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano.

Los ensayos de 10% de finos y Micro Deval complementan la evaluación de la calidad de los agregados que se realiza comúnmente, aplicando la prueba tradicional de desgaste en la máquina de Los Ángeles.

El ensayo del 10% de finos se derivó del ensayo de Valor de Trituración del Agregado, ACV (por su sigla en inglés, *Aggregate Crushing Value*), desarrollado por el Road Research Laboratory de Gran Bretaña hace más de 40 años. En Colombia, aun cuando una variante del ACV, conocida como “Coeficiente de Friabilidad de los Agregados” se encontraba contemplada en las normas de ensayo de materiales para carreteras del Instituto Nacional de Vías de 1996, bajo la designación INV E - 229 (3), el ensayo no se implementó de manera rutinaria en los laboratorios de control de materiales para carreteras debido principalmente a que sus resultados no se consideran en las especificaciones de los agregados.

Lo anterior motivó en los laboratorios de suelos y pavimentos del Centro de Estudios Geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, la implementación del ensayo del 10% de finos y el análisis comparativo de sus resultados con los encontrados en el ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles. Los ensayos se realizaron sobre fuentes de agregados utilizados en la ciudad de Bogotá. En este artículo se presentan los resultados y las conclusiones preliminares obtenidas, así como algunas recomendaciones derivadas de este proceso.

1. EL ENSAYO DE 10% DE FINOS

Los ensayos de 10% de finos y el Valor de Trituración del Agregado (ACV) son bien conocidos y aceptados en el Reino Unido para estimar las propiedades mecánicas de los agregados. En el primer ensayo, se determina la carga para producir un 10% de finos, mientras que en el segundo se establece la cantidad de finos que se producen bajo la acción de una carga de 40 toneladas. Ambos ensayos se encuentran normalizados en los estándares británicos (BS 812) y se llevan a cabo de manera similar sobre aproximadamente la misma cantidad de muestra, siendo indicativos de la resistencia a la trituración de los agregados.

De acuerdo con el reporte No. 281 del *National Cooperative Highway Research Program* (NCHP), de 2003 (4), no se tienen disponibles estándares de ensayo de la AASHTO o de la ASTM equivalentes al ensayo del 10% de finos para medir la resistencia del agregado, lo que hace lógico el pensar que esta prueba no es especificada por ninguno de los departamentos de transporte de los estados de Estados Unidos. Igualmente, quizás debido a no contar con este ensayo especificado en los estándares norteamericanos, no se encuentran referencias recientes de estudios relacionados con el método de ensayo.

En el Reino Unido, el ensayo de Valor de Trituración del Agregado (ACV) se adoptó inicialmente como un estándar para agregados, naturales o triturados, usados en la elaboración de concretos hidráulicos. Posteriormente este ensayo se aceptó también como estándar para agregados utilizados en carreteras

En el ACV, una muestra con partículas de tamaño comprendido entre 14 mm y 10 mm se somete a la aplicación de una carga de 40 toneladas a una velocidad uniforme de 4 ton/min. Aproximadamente 3 kg de agregados, con tamaño normalizado, se colocan en un molde de acero cilíndrico de 15 cm de diámetro y se someten a una carga continua, transmitida por un pistón, en una máquina de ensayos de compresión. Después de la aplicación de la carga, se tamiza la muestra por la malla de abertura 2,40 mm, registrando la masa del material que pase este tamiz, la cual se expresa como un porcentaje de la masa de la muestra original. El promedio de los porcentajes obtenidos en dos ensayos, que no difieran en más del 1%, aproximado al entero, se da como el ACV del agregado ensayado.

Aun cuando, en general, el ensayo de ACV se encontró como un medio útil para comparar la resistencia a

la trituración de muchos tipos de agregados usados en carreteras, también se encontró que es relativamente insensible a las diferencias en resistencia de materiales débiles, tal como lo establecieron Shergold y Hosking, en 1959, y lo citan Turk y Dearman en el artículo “An investigation of the relation between ten percent fines and crushing value test of aggregates” (UK) (5). Se considera que este resultado se debe a que los materiales débiles se compactan, adquiriendo una configuración densa antes de que se alcance la carga de 40 toneladas, reduciéndose por tanto la cantidad de trituración que puede ocurrir en las etapas posteriores a la densificación.

Debido a que la densificación del material, resultante del llenado de los vacíos con los finos formados durante el ensayo, impide diferenciar entre sí los materiales débiles, Shergold y Hosking observaron que esta dificultad se podía superar, seleccionando condiciones de ensayo que aseguraran la formación de una porción de finos relativamente baja. Así, sugirieron la carga para el 10% de finos como un ensayo alterno, aceptado por los estándares británicos (BS).

En el ensayo del 10% de finos se determina la carga requerida para producir este porcentaje, empleando el mismo equipo y los mismos tamices usados en la determinación del ACV. En el ensayo, se aplica una carga a una velocidad uniforme sobre un agregado de tamaño normalizado (14 - 10 mm) para causar, en diez minutos, si el material de ensayo es roca triturada, una penetración total del pistón de aproximadamente 20 mm. Se espera que el peso de los finos que pasan el tamiz de 2,40 mm, expresado como un porcentaje del peso inicial de la muestra, se encuentre entre 7,5 y 12,5%. De otra manera, el ensayo debe repetirse para alcanzar una diferente penetración en el material y un contenido de finos en el rango mencionado.

La fuerza requerida para producir el 10% de finos se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Carga } 10\% \text{ de finos} \quad (1)$$

Donde:

$$\% f_x = \text{corresponde al porcentaje de finos producidos por la carga } Q_x.$$

$$Q_x = \text{carga aplicada para lograr una cierta penetración y producir un porcentaje de finos } f_x \text{ entre } 7,5 \text{ y } 12,5\%.$$

Esta ecuación la propusieron inicialmente Shergold y Hosking basados en la relación experimental establecida entre las cargas y los finos producidos en el ensayo de Valor de Trituración del Agregado (ACV), llevado a cabo con la aplicación de cargas diferentes de 40 toneladas. Aun cuando en la gran mayoría de los casos esta relación se encontró que era curvilínea, Shergold y Hosking sugirieron, para propósitos prácticos y para todo tipo de agregado, que la relación podía considerarse una recta, en el rango de 7,5 a 12,5% de finos, pasando la recta por las coordenadas (0, -4) en cero carga.

Un valor alto de la carga para producir el 10% de finos es indicativo de un agregado resistente, mientras que un valor bajo lo es de un material débil.

El procedimiento de ensayo es relativamente simple y no consume mucho tiempo, por lo que se considera apropiado para especificarse como un ensayo de empleo rutinario en los laboratorios para la evaluación y el control de calidad de los agregados usados para la conformación de capas de estructuras de pavimento. Sin embargo, pueden presentarse limitaciones para su implementación en laboratorios de control en campo, debido a la necesidad de contar, dentro de los equipos para la realización del ensayo, con una máquina de compresión que tenga capacidad para aplicar cargas de por lo menos 500 kN (50 toneladas fuerza).

En la figura 1 se muestra de manera detallada el diagrama de flujo del ensayo siguiendo el procedimiento propuesto en la norma INV E 224. También se puede apreciar este procedimiento en la secuencia fotográfica 1.

2. COMPARACIÓN DEL ESTÁNDAR DE ENSAYO PROPUESTO POR EL INV CON OTROS ESTÁNDARES

El ensayo de carga para el 10% de finos se normalizó en el Reino Unido y se encuentra contemplado en la norma BS 812 - Parte 111, “Methods for Determination of Ten Percent Fines Value (TFV)” (6). La norma citada corresponde al estándar sugerido en las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano ET-2005 y es, como ya se mencionó, básicamente un ajuste del ensayo del

Valor de Trituración del Agregado (*Aggregate Crushing Value, ACV*). Muy similares a este estándar de ensayo y prácticamente derivados de éste se encuentran, entre otros, el estándar Surafricano Sabas *Method 842:1994, Fact value (10% fines aggregate crushing value) of coarse aggregates* (7) y los estándares del estado de Queensland Q205A, Q205B y Q205C de 1986, *Determination of the ten percent fines value dry, wet y wet/dry strength variation* (8), respectivamente.

Aun cuando los equipos y sus especificaciones para el ensayo del 10% de finos que se presentan en el estándar del INV son prácticamente los mismos que en los estándares citados, se tienen ligeras diferencias entre los procedimientos propuestos por estas normas, que vale la pena mencionar. Por ejemplo en los otros estándares:

- Se propone ensayar el agregado tanto en condición seca como en condición húmeda (Agregado saturado y seco superficialmente).

- En los estándares del estado de Queensland es posible ensayar agregados en rangos diferentes de tamaño, para lo cual se varían las dimensiones de los cilindros de ensayo y del tamiz sobre el cual se determina el porcentaje de finos.
- En algunos de estos estándares, para cada condición del agregado, se ensayan tres muestras, variando la velocidad de aplicación de la carga y por tanto la profundidad de penetración del pistón en cada muestra, tomando como referencia una penetración de 20 mm, de tal forma que se obtenga la magnitud de la fuerza aplicada para obtener menos del 7,5% de finos, entre el 7,5 y 12,5%, y más del 12,5% de finos.
- Los resultados, diferenciando aquellos obtenidos para la condición seca de los encontrados para la húmeda, se presentan en un gráfico de porcentaje de finos contra carga aplicada, de la cual se obtienen las fuerzas requeridas para obtener el 10% de finos, en cada una de las condiciones de ensayo del agregado.

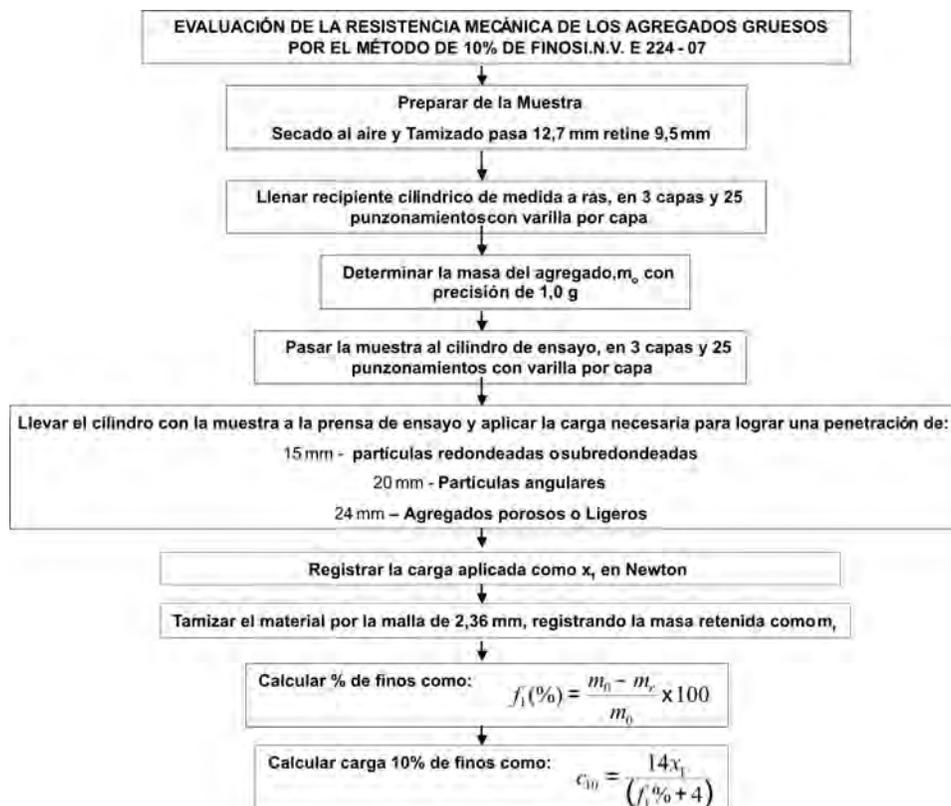
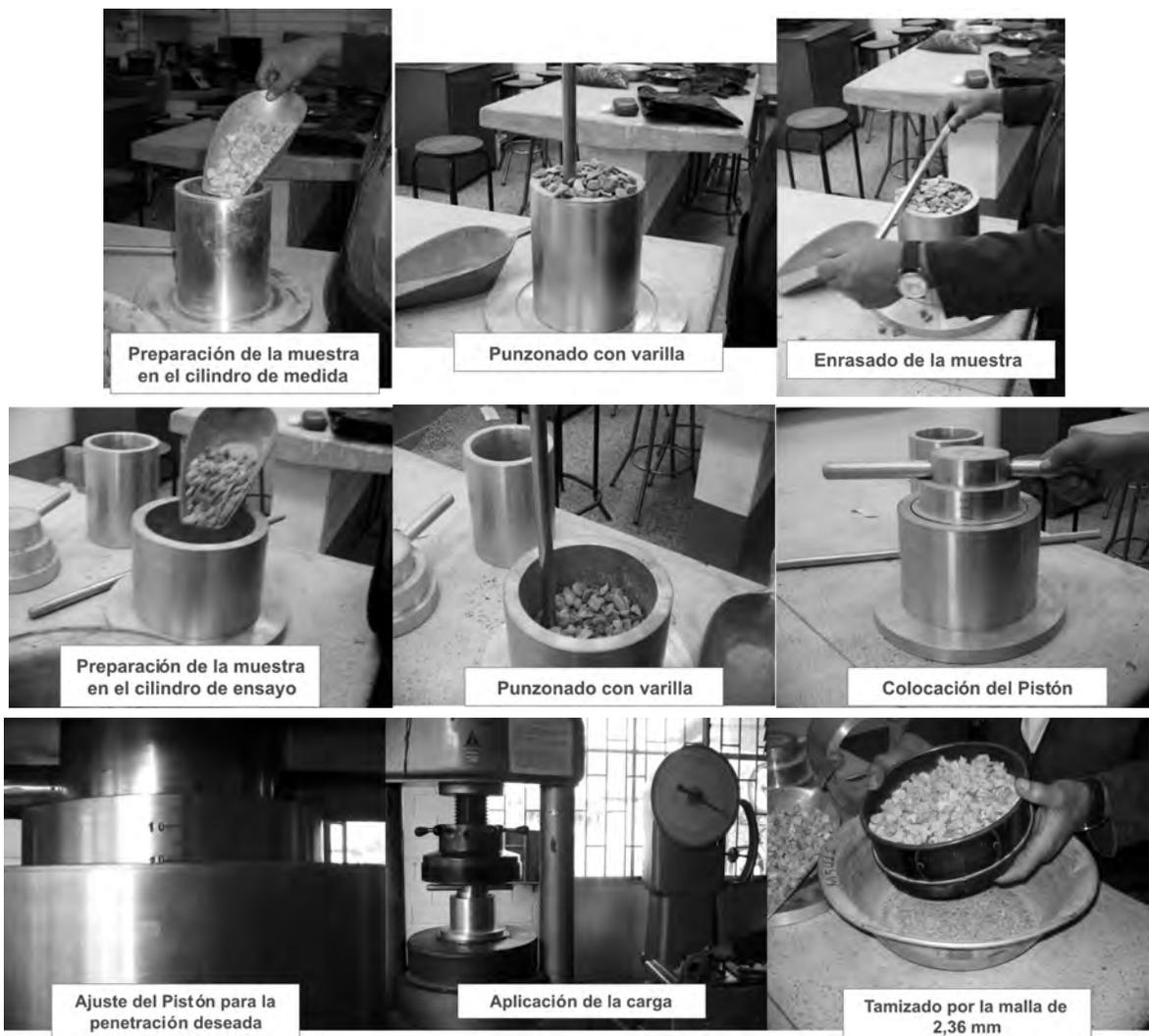


Figura 1. Diagrama de flujo del ensayo 10% de finos de acuerdo con la norma INV E -224.

Figure 1. Flow chart of 10 per cent fines test according to the Standard INV E-224.



Fotos 1. Secuencia fotográfica del procedimiento del ensayo 10% de finos.
Photo 1. Photographic sequence of 10 per cent fines test.

- En general, los estándares indican que es posible la aplicación de la ecuación 1, en caso de ensayos de rutina y en aquellos en que el comportamiento de la muestra se pueda predecir con bastante precisión, cuidando que el porcentaje de finos producido bajo la carga aplicada se encuentre en el rango de 7,5 a 12,5%.
- En algunos de estos estándares se incluye la precisión que debe tener el ensayo, estableciendo su repetibilidad y su reproducibilidad.

Aun cuando se considera que estas diferencias en los procedimientos no son significativas, se recomienda la revisión de la norma INV E 224 para, en lo posible,

ajustarla a un procedimiento en el que se tomen en cuenta los aspectos mencionados, con la posibilidad de obtener un parámetro adicional de calidad de los agregados como lo es su comportamiento en condición húmeda y de esta manera también poder evaluar su susceptibilidad al agua. A este respecto cabe destacar que las especificaciones de materiales del INV exigen un valor mínimo de la relación entre las cargas para el 10% de finos con el agregado en condición húmeda y en condición seca.

Igualmente, la realización de tres pruebas sobre el mismo agregado para obtener las cargas que producen diferentes porcentajes de finos, en lugar de aplicar únicamente la ecuación 1, permitiría, además de la ve-

rificación de esta ecuación, ampliar la información del comportamiento y de las características de dureza de las fuentes de agregado propias.

3. COMPORTAMIENTO DE LOS AGREGADOS EN EL ENSAYO

Como ya se mencionó, en estudios realizados sobre diferentes materiales por Shergold y Hosking, se encontró una relación no lineal entre los finos producidos durante los ensayos de valor de trituración de los agregados, ACV y la carga aplicada (figura 2). Para agregados de rocas de Dolerita, en un rango de bajos porcentajes de finos, Weinert (1980) obtuvo una relación lineal (figura 3).

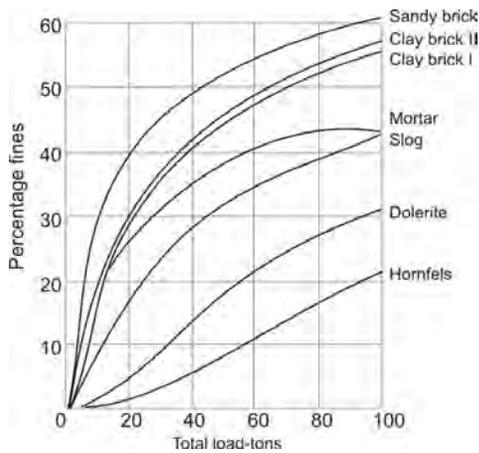


Figura 2. Relación entre la carga y el porcentaje de finos producido.
Figure 2. Relation between load and fines percent produced.

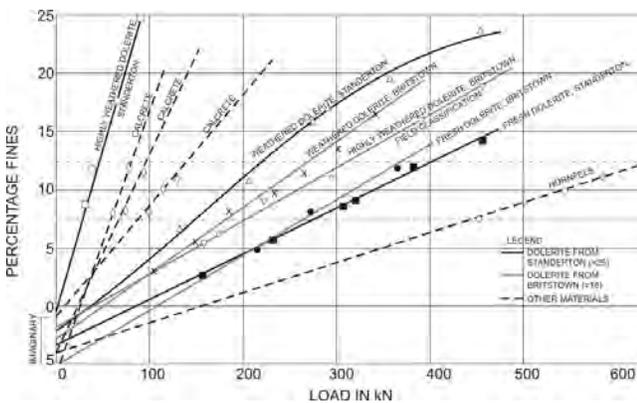


Figura 3. Relación entre la carga y el porcentaje de finos producido (Weinert, 1980).
Figure 3. Relation between load and fines percent produced (Weinert, 1980).

La proporcionalidad entre la carga aplicada y los finos producidos durante el ensayo también se corroboró en los estudios de Turk y Dearman (1989) para materiales como cuarzo dolerita, frescos o meteorizados y también para calizas (figuras 4 y 5).

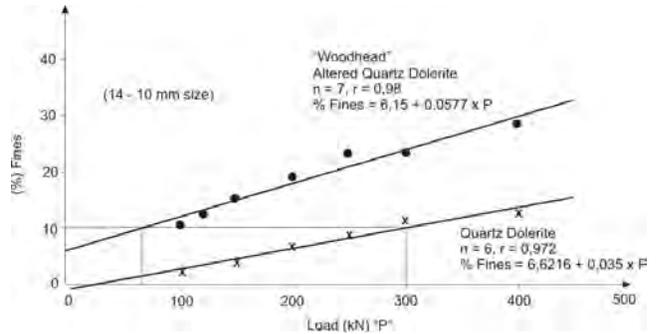


Figura 4. Relación entre la carga aplicada y los finos producidos (Turk y Dearman, 1989).
Figure 4. Relation between applied load and fines produced (Turk y Dearman, 1989).

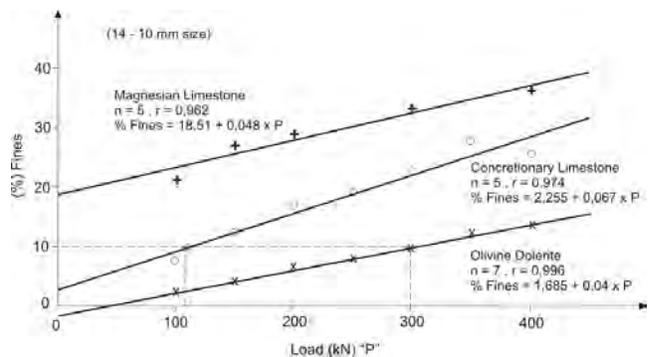


Figura 5. Relación entre la carga y los finos producidos (Turk y Dearman, 1989).
Figure 5. Relation between load and fines produced (Turk y Dearman, 1989).

De esta manera, Shergold y Hosking sugirieron, para propósitos prácticos y para todo tipo de agregado, la ecuación 1, que relaciona la carga y el porcentaje de finos, cuando el porcentaje de finos producido se encuentra entre el 7,5 y 12,5%.

4. EFECTO DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS EN EL VALOR DE LA CARGA PARA EL 10% DE FINOS

Los resultados del ensayo de carga para el 10% de finos, al igual que los de ensayos similares como el Valor de Trituración del Agregado (ACV) y el Valor de Impacto del Agregado (AIV), son fuertemente dependientes del tamaño de las partículas de agregado.

En todos estos ensayos generalmente se recomienda preparar una muestra del agregado con partículas de tamaño estándar, cuyos diámetros estén comprendidos entre 14 y 10 mm. Sin embargo, a menudo este rango de tamaños de partículas es difícil de obtener, por lo que para evaluar la calidad del agregado se recurre al ensayo usando una muestra con tamaño de partículas diferente del especificado. En la tabla 1 se muestra, de acuerdo con los estándares Q205A y Q205B propuestos por el estado de Queensland, el rango de tamaños de partículas que es posible evaluar, junto con los respectivos diámetros de los cilindros de ensayo y de medida y la apertura del tamiz para separar los finos.

Turk y Dearman (1988) (9) investigaron la influencia en los resultados del ensayo de carga para el 10% de finos, sobre diferentes tipos de rocas, obteniendo el comportamiento que se aprecia en la figura 6. En esta gráfica queda de manifiesto que cuanto más grande sea el tamaño de las partículas de agregado, menor es la carga requerida para producir el 10% de finos.

De los resultados presentados en la figura 6, también es posible concluir que la magnitud del efecto del tamaño de las partículas de agregado sobre la carga para producir el 10% de finos está relacionada con la dureza de la roca; cuanto más débil sea ésta, se presenta un efecto poco significativo del tamaño de las partículas en la carga, mientras que si la roca es fuerte se observa un efecto más pronunciado.

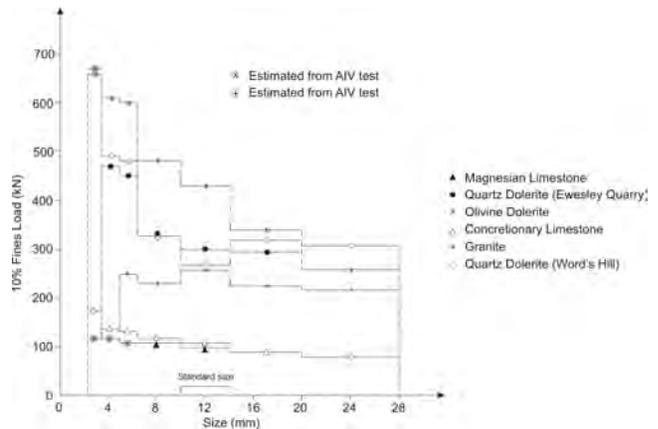


Figura 6. Relación entre el tamaño de partículas del agregado y la carga para el 10% de finos.
Figure 6. Relation between the particle size of the aggregate and the load for the 10 per cent fines.

Tabla 1
 Rangos de tamaños de partículas y demás condiciones generales para el ensayo del 10% de finos, propuesto en el estándar Q205A

| del del agregado | Tamaño nominal | Diámetro del | Diámetro del | Cantidad aproximada de | | Profundidad de la | Abertura |
|---------------------|----------------|--------------|--------------------|------------------------|---|--|------------------------------|
| | Pasa | Retiene | cilindro de ensayo | cilindro de medida | materiales para los tres ensayos y llenar el cilindro de medida | muestra de prueba, en el cilindro de ensayo, después del punzonamiento | tamiz para separar los finos |
| | mm | mm | mm | mm | kg | litros | mm |
| | 26,5 | 19,0 | 150 | 115 | 15 | 9 | 100 |
| | 19,0 | 13,20 | 150 | 115 | 15 | 9 | 100 |
| | 13,20 | 9,50 | 150 | 115 | 15 | 9 | 100 |
| | 9,50 | 6,70 | 150 | 115 | 15 | 9 | 100 |
| | 6,70 | 4,75 | 75 | 60 | 1,8 | 1,5 | 50 |
| | 4,75 | 3,35 | 75 | 60 | 1,8 | 1,5 | 50 |

Para tener un orden de magnitud de la carga que pueda producir el 10% de finos en agregados ensayados en condición seca y en condición húmeda, de diferentes tipos de rocas, se presenta en la tabla 2 un listado de valores típicos.

Tabla 2

Valores típicos de carga para producir el 10% de finos en agregados de diferentes tipos de rocas

| Roca | Resistencia en seco típica (kN) | Resistencia en húmedo típica (kN) |
|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Adamelia | 150 | 130 |
| Andesita | 190 | 140 |
| Basalto | 290 | 250 |
| Diorita | 260 | 230 |
| Dolerita | 180 | 160 |
| Gabro | 250 | 200 |
| Granito | 200 | 170 |
| Granodiorita | 300 | 260 |
| Basalto metamorfoseado | 330 | 240 |
| Hornfels | 290 | 220 |
| Calizas, | 200 | 160 |
| Meta - Gragwaca | 270 | 210 |
| Lodolita | 180 | 160 |
| Cuarcita | 220 | 110 |
| Riolita | 230 | 210 |
| Pizarra | 190 | 150 |
| Tracita | 220 | 180 |
| Toba | 250 | 190 |

6. MATERIALES Y ENSAYOS REALIZADOS EN EL ESTUDIO

Varios proveedores de agregados usados principalmente para la elaboración de mezclas asfálticas en la ciudad de Bogotá colaboraron con el estudio suministrando un total de seis muestras de materiales, sobre las cuales se realizaron los ensayos de desgaste Los Ángeles, en seco 500 revoluciones, (INV E 218), en seco 100 revoluciones y de evaluación de la resistencia mecánica por el método de 10% de finos (INV E 224).

Con el propósito de aproximar el tamaño de las partículas de agregado del ensayo de desgaste Los Ángeles al usado en la prueba del 10% de finos, se empleó la gradación B (19,0 mm - 9,5 mm), indicada en la norma respectiva.

A las muestras de agregado se les realizó inspección visual para identificar el tipo de roca predominante,

encontrándose que corresponden en su mayoría a areniscas cuarcíticas, con excepción de la muestra 5, en la que se tiene una mezcla de diabasas, granitos, areniscas y andesitas, principalmente.

Tabla 3

Resultados del ensayo de 10% de finos sobre las muestras analizadas

| Muestra No. | Penetración (mm) | Carga (kN) | % finos |
|-------------|------------------|------------|---------|
| 1 | 12 | 98 | 4,8 |
| | 15 | 137 | 8,0 |
| | 20 | 188 | 10,1 |
| | 25 | 287 | 15,3 |
| 2 | 12 | 84 | 5,2 |
| | 15 | 162 | 10,0 |
| | 20 | 240 | 14,8 |
| 3 | 20 | 141 | 6,2 |
| | 24 | 201 | 10,1 |
| | 28 | 303 | 15,3 |
| 4 | 10 | 92 | 3,3 |
| | 15 | 125 | 5,8 |
| | 20 | 219 | 10,2 |
| | 25 | 343 | 16,0 |
| 5 | 12 | 208 | 6,1 |
| | 15 | 220 | 6,5 |
| | 20 | 341 | 10,1 |
| | 25 | 532 | 15,7 |
| 6 | 12 | 125 | 3,3 |
| | 15 | 200 | 7,5 |
| | 20 | 271 | 10,1 |
| | 25 | 396 | 14,8 |

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 3 se presentan para cada una de las muestras a las cuales se les realizó la prueba de 10% de finos, siguiendo la norma INV E 224, los valores de penetración medida, carga aplicada y porcentaje de finos obtenido, para la respectiva penetración.

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de desgaste Los Ángeles en seco a 500 y a 100 revoluciones, incluyendo el cálculo de la relación entre las pérdidas respectivas.

Tabla 4
Resultados del ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles

| Muestra | % pérdidas 100 rev | % pérdidas 500 rev | Relación 100 rev / 500 rev |
|---------|--------------------|--------------------|----------------------------|
| 1 | 9,8 | 28,7 | 0,34 |
| 2 | 6,9 | 29,7 | 0,23 |
| 4 | 5,1 | 25,2 | 0,20 |
| 5 | 7,0 | 22,8 | 0,31 |
| 6 | 3,3 | 18,8 | 0,17 |

Una mirada rápida a los datos consignados en la tabla 3 arroja una conclusión evidente: a medida que se aumenta la penetración en el agregado, se incrementa la carga requerida para lograr esta penetración y el porcentaje de finos producido, presentándose una relación no lineal entre la penetración y cada uno de estos parámetros.

En el rango de finos obtenido (< 20%), y para todas las muestras ensayadas, se presenta una relación lineal entre la carga aplicada y la cantidad de finos producida, tal como se puede apreciar en la figura 7 y en los datos consignados en la tabla 5. Se tiene así una familia de rectas que, con excepción de la muestra 5, presentan pendientes muy similares, lo cual presumiblemente es atribuible a que se trata de un mismo tipo de roca, que como ya se mencionó corresponden a areniscas cuarcíticas, en su gran mayoría.

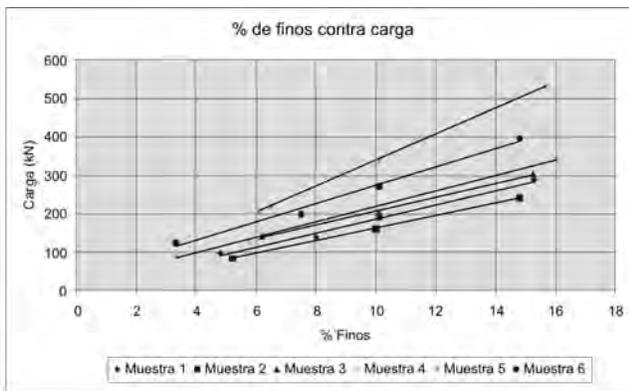


Figura 7. Relación entre el porcentaje de finos producido y la carga aplicada para las muestras evaluadas.
Figure 7. Relation between the fines percent produced and the applied load for tested samples.

Tabla 5
Relaciones obtenidas entre carga aplicada y porcentaje de finos producido

| | | |
|----|--|----------------|
| M1 | $Q = 18,403 * \% \text{ finos} + 1,7483$ | $R^2 = 0,9894$ |
| M2 | $Q = 16,219 * \% \text{ Finos} - 0,4542$ | $R^2 = 1$ |
| M3 | $Q = 17,95 * \% \text{ finos} + 26,102$ | $R^2 = 0,9952$ |
| M4 | $Q = 20,102 * \% \text{ finos} + 17,253$ | $R^2 = 0,9954$ |
| M5 | $Q = 33,821 * \% \text{ finos} + 0,3921$ | $R^2 = 1$ |
| M6 | $Q = 23,802 * \% \text{ finos} + 35,589$ | $R^2 = 0,9892$ |

Aun cuando prácticamente para cada una de las muestras la carga para el 10% de finos Q10 se obtuvo directamente en el ensayo, esta carga también se calculó usando la ecuación 1, incluyendo los casos en los cuales, con las cargas aplicadas, se obtuvo un porcentaje de finos comprendido entre el 7,5 y 12,5%. Los resultados así obtenidos se presentan en la tabla 6.

Como se observa de los datos consignados en la tabla 6, la carga para el 10% de finos, calculada a partir de las cargas aplicadas con las que se lograron los porcentajes de finos menores del 10%, difiere en un 20 kN de la medida, subestimando este valor.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que todos los materiales evaluados presentan una adecuada resistencia y dureza. En términos generales, se puede decir que los valores respectivos de la carga para el 10% de finos superan a los mínimos establecidos en las especificaciones del INV y del IDU, para las aplicaciones en el pavimento y para los niveles de tránsito.

Tabla 6
Carga para producir el 10% de finos en cada una de las muestras ensayadas

| Muestra No. | Carga aplicada (kN) | % finos medido | Carga para el 10% de finos (kN) calculada |
|-------------|---------------------|----------------|---|
| 1 | 137 | 8,0 | 160 |
| | 188 | 10,1 | 187 |
| 2 | 162 | 10,0 | 162 |
| 3 | 201 | 10,1 | 199 |
| 4 | 219 | 10,2 | 215 |
| 5 | 341 | 10,1 | 339 |
| 6 | 200 | 7,5 | 243 |
| | 271 | 10,1 | 269 |

En cuanto a los resultados del ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles, como se desprende de los datos consignados en la tabla 4, con excepción de las muestras 1 y 5, los demás materiales evaluados en el estudio son relativamente homogéneos en su dureza, ya que la relación entre las pérdidas en el ensayo Los Ángeles después de las 100 y las 500 revoluciones, se encuentra alrededor del 20%. Por otro lado, la magnitud de las pérdidas obtenidas es indicativa de que todas las muestras ensayadas presentan una adecuada resistencia o dureza, y en términos generales podrían usarse para la elaboración de mezclas asfálticas que se van a aplicar en capas de base e intermedias en vías con altos volúmenes de tránsito, de acuerdo con las especificaciones vigentes del INV y del IDU.

En la figura 8 se presenta la relación entre el porcentaje de pérdidas obtenidas en el ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles y la carga para producir el 10% de finos, para las muestras evaluadas. Como se desprende de esta figura, aun cuando no se obtuvo una buena correlación entre estos dos parámetros, sí es clara la tendencia de que a medida que aumentan las pérdidas en el ensayo de desgaste disminuye la magnitud de la carga necesaria para producir el 10% de finos.

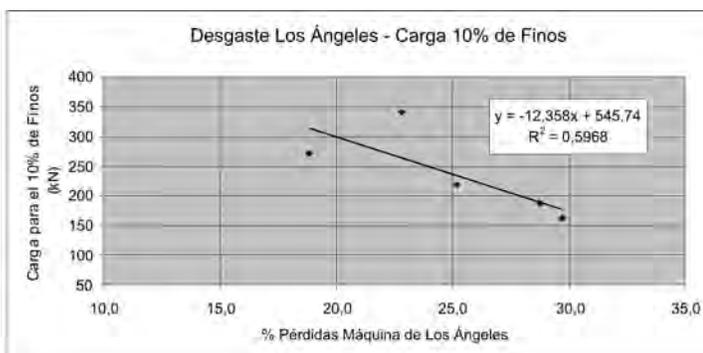


Figura 8. Relación entre las pérdidas en el ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles y la carga para producir el 10% de finos.
Figure 8. Relation between losses in the test of Abrasion in the Machine of Angels and the load to produce 10 per cent fines.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La calidad de los agregados empleados en el pavimento constituye un factor importante que determina su comportamiento. Es bien sabido que una

de las características que debe cumplir un agregado usado en pavimentación es su dureza. Se exige, por tanto, que los agregados sean resistentes a la abrasión para prevenir la trituración, la degradación y la desintegración que se pueden presentar cuando se encuentran almacenados, se transportan, se extienden, compactan y se someten a las cargas del tránsito.

- El ensayo de carga para el 10% de finos, para medir la dureza de un agregado, es una prueba relativamente simple que se puede implementar en los laboratorios de control de calidad de materiales para carreteras. Sin embargo, pueden presentarse limitaciones para su implementación en laboratorios de control en campo debido a la necesidad de contar, dentro de los equipos para la realización del ensayo, con una máquina de compresión que tenga capacidad para aplicar cargas de por lo menos 500 kN (50 toneladas fuerza).
- Aun cuando el ensayo tiene mas de 40 años de implementado en el Reino Unido, en muchos países americanos, entre ellos Estados Unidos, la prueba no está especificada y las referencias recientes, relacionadas con el ensayo y con el parámetro así obtenido, son bastante limitadas.
- Aun cuando el número de muestras de ensayo evaluadas es reducido, fue posible comprobar la validez de la ecuación de carga para el 10% de finos, presentada en la norma INV E-224, aplicable solamente en el rango entre el 7,5 y 12,5% de finos, fuera del cual la carga puede ser subestimada o sobrestimada. Así mismo, se comprobó que la relación entre la carga aplicada y el porcentaje de finos, para un porcentaje de finos menor del 20%, es lineal. Para todas las muestras evaluadas, los datos experimentales de carga aplicada y porcentaje de finos obtenido se ajustaron a una línea recta, lográndose coeficientes R2 prácticamente iguales a la unidad.
- Se encontró una relación lógica entre la carga para producir el 10% de finos y las pérdidas en el ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles; a medida que aumenta la carga disminuyen las pérdidas, como era de esperarse. Sin embargo, no se obtuvo una buena correlación entre los resultados de estos dos ensayos.
- De manera particular, para el caso colombiano se concluye que la norma de ensayo INV E224 requiere revisarse, para que adicionalmente a la ecuación

$Q_{10} = 14 Q_x / (\%f_x + 4)$, la determinación de la carga para producir el 10% de finos se realice a partir de un gráfico de carga aplicada contra porcentaje de finos producido, y debe ampliarse para incluir el procedimiento de ensayo que se debe seguir sobre el material en condición húmeda, así como aspectos relacionados con la precisión del ensayo, tal como está establecido en los estándares británicos, Surafricanos y del estado de Queensland que se consultaron.

- Como ya se ha insistido en otros estudios, es importante que las agencias viales de Colombia, entre ellas el IDU y el INV, promuevan estudios para el inventario de las características y propiedades de las fuentes de agregados, estableciendo niveles de calidad asociados con su comportamiento en servicio. Se recomienda que dichos estudios tengan en cuenta diferentes zonas climáticas del país, al igual que diversas condiciones de aplicación y solicitudes de tránsito.
- Finalmente, se recomienda seguir recopilando información sobre el ensayo y resultados sobre fuentes de materiales propios, con el propósito de conformar una base de datos que permita conocer más nuestros materiales y así mismo ajustar las especificaciones a las condiciones imperantes en el país.

REFERENCIAS

1. República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías (2007). *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo*.
2. Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) (2005). *Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos*

de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá, D.C. - IDU ET 2005.

3. República de Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías (1996). *Normas de ensayo de materiales*.
4. National Cooperative Highway Research Program (2003). *Aggregates Test for Portland Cement Concrete Pavements: Review and Recommendations. Research Results Digest*, No. 281. September.
5. Turk, N. & Dearman, W.R. (1989). An investigation of the relation between ten percent fines and crushing value test of aggregates (U.K.). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 39. Paris.
6. British Standard BS 812 (1990). Part 111: *Methods for determination of ten percent fines value (TFV)*.
7. South African Standard (1994). *Standard Method. Fact value (10% fines aggregates crushing value) of coarse aggregates. SABS method 842. First Revision*.
8. Queensland Standards Q205A, Q205B y Q205C (1986). *Determination of the ten percent fines value dry, wet y wet/dry strength variation*.
9. Turk, N. & Dearman, W.R. (1988). An investigation into the influence of size on the mechanical properties of aggregates. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 38. Paris.
10. Montaña, L.C. (2009). *Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10% de finos INV E 224*. Trabajo dirigido. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.

Agradecimientos

A Laura Catalina Montaña, estudiante de ingeniería civil, por la realización de los ensayos y el suministro de los datos presentados en este artículo. Igualmente, a Cortázar y Gutiérrez, Sistema Integrado de Pavimentos de Colombia S.A., Compañía de Trabajos Urbanos, Icein S.A., Conca y S.A. y MHC, empresas que colaboraron con el estudio suministrando las muestras de agregado.