

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS DE ENSAYO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

J. Grgich, E. Quagliata

Laboratorio Tecnológico del Uruguay Av. Italia 6201 - CP 11500 - Montevideo - Uruguay

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo consiste en analizar desde el punto de vista estadístico, distintos resultados de ensayos de probetas de carpetas y bases asfálticas obtenidas en sitio con un equipo extractor de pavimentos.

Los ensayos objeto del presente estudio fueron densidad, estabilidad Marshall, fluencia y porcentaje de asfalto de acuerdo al Método Marshall. Los ensayos se realizaron sobre muestras testigo de carpetas y bases asfálticas extraídas de nueve rutas nacionales.

El análisis estadístico de los resultados de ensayo indica que el Método Marshall no es adecuado para correlacionar valores de diseño de una mezcla asfáltica de laboratorio con el comportamiento de la mezcla asfáltica puesta en servicio.

Este resultado sugiere la importancia de realizar medidas sobre variables basadas en el comportamiento de los pavimentos.

Palabras clave: Marshall, fluencia, estabilidad, mezcla asfáltica, pavimento

SUMMARY

The aim of the present paper is to analyze from a statistical point of view, different test results of bituminous specimens sampled on site with a drilling machine.

The tests performed for this paper are density, stability, flow and asphalt content according to the Marshall Method. The tests were performed on samples of pavement core specimens drilled from nine different national highways.

The statistical analysis of the test results show that the Marshall Method is not suitable for correlating design values of laboratory asphalt mixtures with the on field performance of the mixture.

This result suggests the relevance of performing tests that are based on pavement performance.

Keywords: Marshall, flow, stability, asphalt mixture, pavement

INTRODUCCIÓN

Método Marshall

El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento. Los dos datos más importantes del diseño de mezclas del Método Marshall son: un análisis de vacíos - densidad, y una prueba de estabilidad – fluencia de las muestras compactadas.

Obtenidas las curvas Peso unitario – Contenido de asfalto, Vacíos – Contenido de asfalto, Estabilidad – Contenido de asfalto, Fluencia -Contenido de asfalto, VMA – Contenido de asfalto, es posible seleccionar para cada una de las curvas el valor de porcentaje de asfalto más adecuado.. El valor óptimo del porcentaje de asfalto para se mezcla se calcula como el promedio de los valores seleccionados.

De esta forma el método correlaciona los parámetros densidad, estabilidad y fluencia, determinados en laboratorio, cuando se está proyectando la mezcla o controlando la producción.

Si la mezcla es preparada y compactada a las temperaturas apropiadas, la verificación de la resistencia por medio de probetas extraídas podría considerarse innecesaria.

Es importante comprender que el Método Marshall, como procedimiento empírico, requiere que se cumplan algunas condiciones constructivas y de procedimiento para que el mismo produzca una carpeta asfáltica de calidad aceptable.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Equipos utilizados

El equipo utilizado para los ensayos de Estabilidad – Fluencia es una Máquina Universal de Ensayos Schenck RM500 que permite obtener las curvas Estabilidad - Fluencia tal como lo indica la norma ASTM D 6927 – 04¹. La termostatación de las probetas se realiza por inmersión de las mismas en baño de agua por treinta minutos.

Metodología aplicada

El sistema objeto de estudio comprende nueve Rutas Nacionales que fueron identificadas como A – B – C – D (Tramos 1 y 2) – E – F (Tramos 1 y 2) – G – H – I – I (repetida).

De dichas Rutas se extrajeron muestras testigo de carpetas asfálticas para el posterior ensayo de las mismas.

Se realizan un número de repeticiones de ensayos de estabilidad para verificar la precisión lograda teniendo en cuenta el rango aceptable de dos resultados de acuerdo a la norma ASTM D 6927 – 04.

Posteriormente se determina la media, la desviación estándar y la desviación estándar relativa para cada uno de los parámetros medidos de las carpetas asfálticas de cada ruta.

Luego se correlacionan los resultados obtenidos de los ensayos de carpetas asfálticas para cada ruta.

Por ultimo se estudian las correlaciones recíprocas entre las siguientes variables: densidad, estabilidad, porcentaje de asfalto y fluencia.

RESULTADOS

Como primer paso del trabajo experimental se procede a evaluar la incertidumbre del método de medida empleado a través de la determinación de la repetibilidad obtenida. Con anterioridad a la publicación de la Norma ASTM D 6927 – 04, no existían datos normalizados al respecto. En la bibliografía técnica en general existen pocos trabajos que contemplen el tema. Cabe destacar dentro de estos últimos el trabajo realizado por J.P. Zaniewsky y M. Hughes² sobre determinación de variabilidad del Método Marshall en ensayos interlaboratorios, realizado para el West Virginia Division of Highway. En este programa intervinieron 14 laboratorios y se determinó la repetibilidad y la reproducibilidad de los ensayos de estabilidad, fluencia y densidad.

La Norma ASTM D 1559 – 89³, la cuál fue eliminada y sustituida por la ASTM D 6927-04, no presentaba ninguna referencia a la incertidumbre del método. Con la edición de la Norma ASTM D 6927 – 94, se hace referencia por primera vez en una norma ASTM a la repetibilidad y reproducibilidad del método Marshall, (ver Tabla 1).

Estabilidad ASTM D 6927 - 04	Coefficiente de variación (% de la media)	Rango aceptable de dos determinaciones (% de la media)
Repetibilidad	6	16
Reproducibilidad	16	43

Fluencia ASTM D 6927 - 04	Coefficiente de variación (% de la media)	Rango aceptable de dos determinaciones (% de la media)
Repetibilidad	9	26
Reproducibilidad	20	58

Tabla 1. Criterios de aceptación de resultados según ASTM D 6927 - 04

Dos ediciones posteriores de esta norma, realizadas en julio de 2005 y agosto de 2005⁴, no presentan cambios en los valores de la repetibilidad y reproducibilidad, respecto a la edición del 2004. Sí presentan modificaciones en cambio, en lo que respecta a la determinación de la estabilidad y fluencia Marshall a partir del gráfico de carga en función de la deformación de la muestra. En la Norma ASTM D 1559 – 89, no se hace mención a la posibilidad de obtener el gráfico de carga – desplazamiento en el ensayo Marshall. Los valores de estabilidad y fluencia son determinados por la medida directa de la carga máxima en un dinamómetro de anillo (u otro equipo equivalente) y la medida de la deformación de la muestra con un comparador micrométrico en el momento en que la carga comienza a disminuir. En la Norma ASTM D 6927 – 04 se establece como procedimiento alternativo para la medida de la fluencia el uso del gráfico de carga – deformación. Se determina la fluencia como la distancia medida en el gráfico a partir del punto en que la carga comienza a subir, hasta el punto en que comienza a bajar.

En las ediciones de julio y agosto 2005 de esta Norma se cambia el procedimiento para la determinación de la fluencia y la estabilidad a partir del gráfico carga – deformación. En la edición 2005 se determina el punto inicial para la medida de la fluencia como el corte con el eje de carga igual a cero, de la recta que mejor represente la zona ascendente lineal de la curva carga – deformación. El punto final se determina trazando una recta paralela a la recta anterior, desplazada 1,5 mm de la misma y determinando el punto de corte con la curva de carga – deformación.

En el presente trabajo se siguen los lineamientos de la Norma ASTM D 6927 -04 para determinar la fluencia y estabilidad Marshall.

Para validar la implantación del método de medida de la estabilidad y fluencia Marshall, se realizan determinaciones en probetas extraídas por duplicado en 14 puntos diferentes. Se calcula el rango promedio para la estabilidad y la fluencia Marshall y se comparan estos valores con los considerados aceptables en la Norma ASTM D 6927- 04, ver Tabla 2.

	Repetibilidad Obtenida	Valor de Aceptación según ASTM D6927-04
Estabilidad	10,8 %	16 %
Fluencia	21,0 %	26 %

Tabla 2. Repetibilidad obtenida a partir de la medida de 14 muestras duplicadas.

Dado que la repetibilidad promedio obtenida al medir los duplicados tiene un valor inferior al que figura en la Norma ASTM de referencia, se considera que la incertidumbre de los datos experimentales empleados en el presente trabajo es aceptable.

Establecida la validación del procedimiento de medida, se calculan los valores medios y desviación estándar relativa de la estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de asfalto para las muestras extraídas en cada uno de los tramos de carretera estudiados. Los valores correspondientes a densidad y estabilidad se muestran en la Tabla 3.

Ruta	Densidad		Estabilidad	
	Media	Desviación Estándar %	Media	Desviación Estándar %
A	2,356	0,9	517	17
B	2,246	0,9	762	19
C	2,594	2,2	866	25
D	2,520	1,8	691	23
D1	2,480	0,8	850	11
E	2,319	0,6	557	17
F	2,300	1,1	760	16
F1	2,300	1,6	733	15
G	2,356	1,4	967	23
H	2,353	1,3	512	19
I	2,368	1,1	691	22
I R	2,362	0,8	624	21

Tabla 3. Valor medio y desviación estándar de densidad y estabilidad.

Para realizar una primera evaluación de los resultados se estudia la estabilidad y la densidad en función de la progresiva en cada tramo de carretera estudiado. No se observa ningún patrón especial en el comportamiento de estas variables a lo largo de la progresiva de cada tramo.

A los efectos de buscar una posible relación entre los distintos parámetros medidos (densidad, estabilidad, fluencia y porcentaje de asfalto) se determina la matriz de correlación entre estas variables.

Un valor absoluto de coeficiente de correlación próximo a 1 implica una dependencia lineal entre las magnitudes correlacionadas (el signo de la correlación está asociado al comportamiento relativo de las variables: crecen ambas en el mismo sentido o no). Si las magnitudes no están correlacionadas linealmente el valor es menor que uno, tendiendo a cero a medida que la correlación se hace más débil. Cabe recalcar que en una mezcla de laboratorio se espera una fuerte correlación entre las variables involucradas como resultado del procedimiento empleado para su elaboración. Los valores de los coeficientes de correlación obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Ruta	Densidad/Estabilidad	Densidad/Fluencia	Densidad/% asfalto
A	0,5142	-0,3784	0,8235
B	0,8980	-0,1991	-0,5433
C	0,8299	-0,3901	0,0383
D1	0,6429	-0,1546	0,5441
D2	0,2755	-0,3392	-0,4579
E	0,5245	0,4312	0,8701
F1	0,4937	-0,3036	-0,9687
F2	0,8105	0,6698	-0,9796
G	0,9756	-0,6640	-0,0552
H	0,6989	0,3934	-0,0528
I	0,9180	-0,1858	-0,3807
I Repetición	0,9914	-0,3742	-----

Ruta	Estabilidad/ Fluencia	Estabilidad/% Asfalto	Fluencia/% Asfalto
A	-0,5652	0,8100	-0,7885
B	-0,1634	-0,4601	0,4966
C	-0,2503	-0,0469	-0,2749
D1	-0,0863	0,0419	-0,3390
D2	-0,2364	0,2314	-0,0959
E	0,8990	0,2698	0,3940
F1	-0,2156	-0,3057	0,4849
F2	0,8714	-0,8923	-0,6967
G	-0,6036	-0,1370	0,3572
H	0,6766	-0,6439	-0,5878
I	-0,4925	-0,2349	0,3220
I Repetición	-0,3042	-----	-----

Tabla 4. Correlaciones entre las magnitudes medidas.

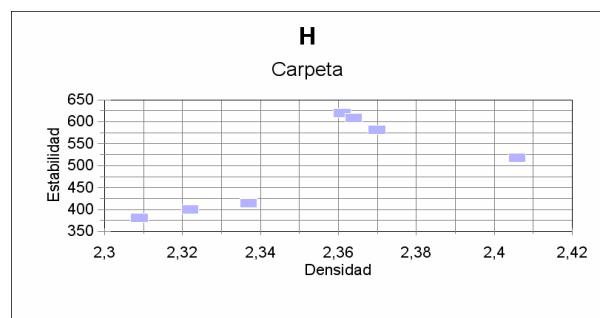
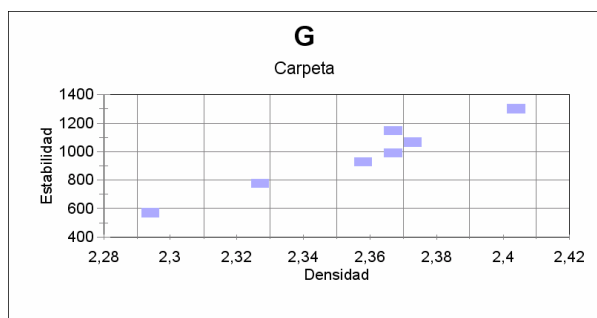
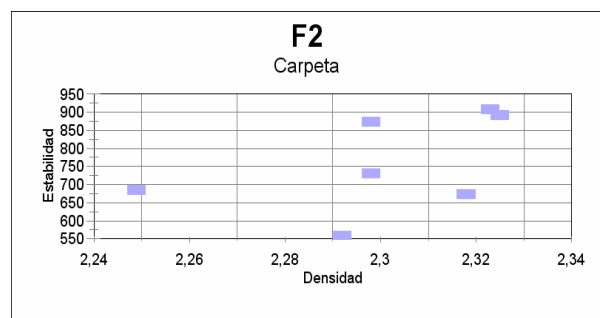
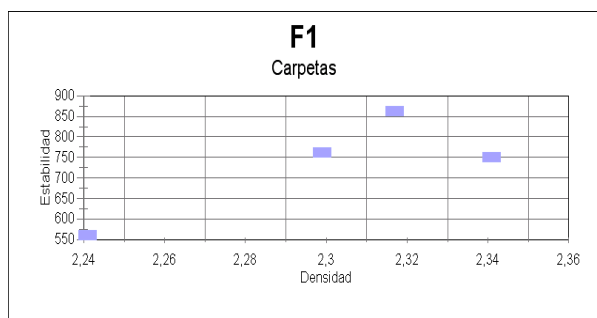
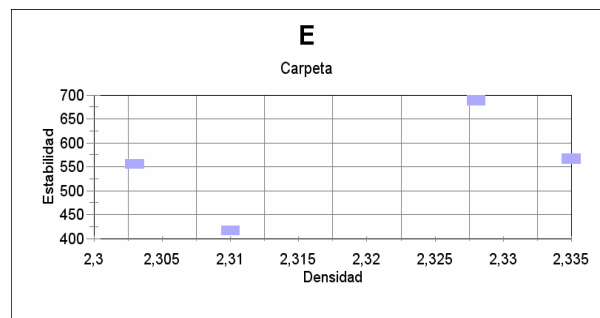
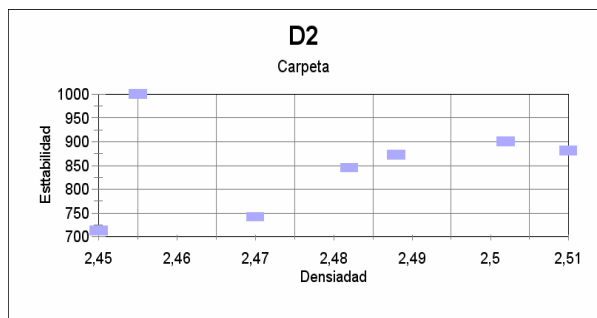
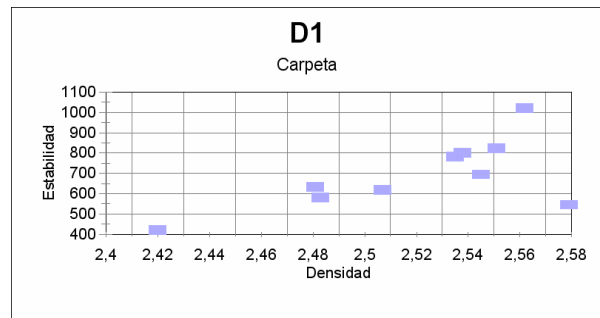
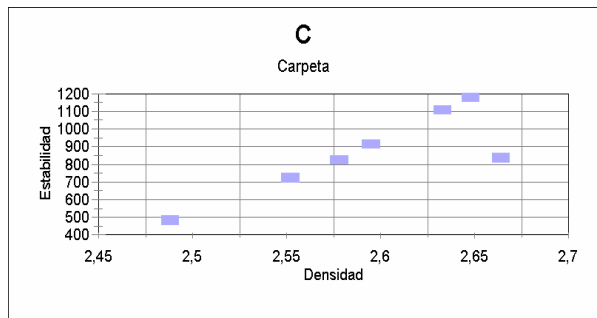
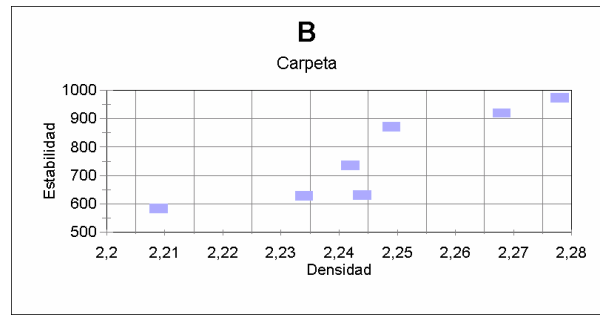
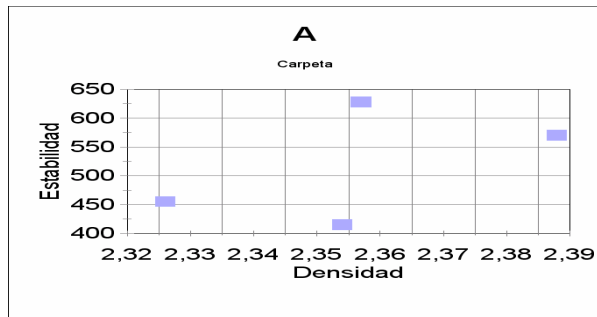


Figura 1: Correlación Estabilidad - Densidad

A partir de estos datos se observa que en general no se detectan correlaciones fuertes entre las variables estudiadas. Los valores más grandes corresponden a la correlación entre densidad – estabilidad, pero esta correlación presenta de cualquier modo una gran variabilidad de tramo a tramo de carretera.

Para ilustrar gráficamente el comportamiento de las variables estudiadas se grafica estabilidad en función de densidad para cada tramo de carretera (ver figura 1). La forma de estas gráficas está asociada al valor de la correlación densidad – estabilidad. En los casos que la correlación es alta (valor próximo a 1) las variables involucradas presentan un comportamiento lineal. En algunos casos en que el valor del coeficiente de correlación es numéricamente bajo, las medidas están muy dispersas en toda la gráfica. En otros casos de baja correlación, se observa un comportamiento lineal en la mayor parte de la gráfica, pero se advierte la presencia de uno o más puntos que se apartan fuertemente de la recta, lo que se traduce en una disminución del valor numérico del coeficiente de correlación.

De este comportamiento general se concluye que no es posible predecir el valor de una de las variables a partir de la medida de las otras. La medida de una sola variable como representativa del conjunto de las mismas sólo es viable cuando dichas variables están fuertemente correlacionadas.

Conclusiones

El Método Marshall, como procedimiento empírico, requiere que se cumplan determinadas condiciones constructivas y de procedimiento para producir una carpeta de calidad aceptable.

Una mezcla compactada adecuadamente puede producir que los agregados se encuentren lo más próximo posible entre sí (alta densidad), pero que exista una muy pobre adherencia, lo cual se vería reflejado en la baja estabilidad de la misma.

Si la mezcla hubiera sido preparada y compactada a las temperaturas apropiadas, la verificación de la resistencia por medio de probetas extraídas podría considerarse innecesaria.

Los valores de los coeficientes de correlación obtenidos entre las distintas propiedades medidas (estabilidad, fluencia, densidad y % de asfalto) a partir de la evaluación de los datos experimentales correspondientes a probetas extraídas en distintos tramos de las rutas evaluadas son bajos. Esto indica que los resultados experimentales de cada una de las propiedades medidas no guarda una relación estadística con los demás. Debido a ello no es posible inferir el valor de alguna de estas propiedades conociendo el valor de otra.

El resultado obtenido indica que el Método Marshall no es adecuado para correlacionar valores de diseño de una mezcla asfáltica de laboratorio con el comportamiento de la mezcla asfáltica puesta en servicio.

Es necesario tener en cuenta que el Método Marshall no es originalmente un procedimiento diseñado para correlacionar ensayos de laboratorio con el comportamiento de una carpeta asfáltica⁵, sino que consiste en un grupo de recomendaciones que permiten de una manera empírica – estadística, producir carpetas que muestren un comportamiento aceptable, si se construyen siguiendo estrictamente las reglas estipuladas en los pliegos de especificaciones.

Si bien el equipamiento del método lo hace accesible por su costo y portabilidad, podemos concluir en base a los resultados obtenidos, que el mismo no simula la densificación de la mezcla que ocurre bajo tránsito en un pavimento real y la resistencia a la estabilidad no estima en forma

adecuada la resistencia al corte de la mezcla asfáltica. Esto se puede observar en mezclas asfálticas propensas al ahuellamiento.

Estos resultados sugieren la importancia de realizar medidas sobre variables basadas en el comportamiento de los pavimentos.

El desarrollo de especificaciones de ligantes asfálticos y mezclas asfálticas basadas en el comportamiento de los pavimentos y el diseño de nuevos ensayos para ser aplicados en un modelo para la predicción del comportamiento de las carreteras, es el desafío que se tiene por delante y que ya en el mundo se ha iniciado.

REFERENCIAS

1. ASTM D 6927 – 04 “Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures”, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
2. J.P. Zaniewski, M. Hughes, “Inter Laboratory Variability of the Marshall Test Method for Asphalt Concrete”, WVDOH RP #137.
3. ASTM D 1559 – 89 “Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus”, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
4. ASTM D 6927 – 05 “Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures”, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States
5. J.A. Rodríguez Deras, “Incidencia de los Agregados en el Comportamiento de las Carpetas Asfálticas”, Ministerio de Obras Pública, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano, República de El Salvador.