

276-03-2013
**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE VARIABLES INFLUYENTES EN LA
COMPACTACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CON EL EQUIPO
COMPACTADOR GIRATORIO**
**ESTUDO E ANÁLISE DAS VARIÁVEIS INFLUENTES NA MISTURA DE
ASFALTO COMPACTOR COMPACTADORES COM EQUIPAMENTOS
ROTATIVOS**

Diana Hernández Barrera
Ingeniera Civil
Bogotá, Colombia
diheba@gmail.com

Loreto Araya Zamorano
Ingeniero Civil OCCC
Santiago, Chile
loretoarayazamorano@yahoo.com

Félix Pérez Jiménez
Catedrático de Caminos Universitat Politècnica de Catalunya
Barcelona, España
edmund.perez@upc.edu

Resumen

La fabricación de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica se efectúa utilizando la Prensa Compactadora Giratoria, en adelante PCG. La compactación se consigue por la acción simultánea de una fuerza de compresión vertical aplicada en forma axial y el deslizamiento giratorio mediante la inclinación del eje de la probeta. La investigación pretende evaluar la influencia de la presión aplicada y el ángulo de giro al compactar mezclas tipo AC16S y BBTM11B, según normativa europea; el árido procedente de cantera es de origen calcáreo y el betún asfáltico es del tipo B50/70. La compactación se realiza relacionando 9 variables, obteniendo 27 combinaciones. Las variables corresponden a tres niveles de presión (0,45 MPa, 0,60 MPa y 0,75 MPa); tres ángulos de giro (0,82°, 1° y 1,25°); en probetas de 1200 g, 1800 g y 2500 g. Como resultados preliminares, se verifica que el esfuerzo de corte aumenta a medida que aumenta el número de giros, hasta llegar a un punto en donde tiende a estabilizarse. El punto de inflexión se observa alrededor del giro 100. Por otro lado, se concluye que es posible llegar a una misma curva de densidad, combinando valores de presión y ángulo de giro, es decir, se puede combinar mayor ángulo de giro con menor presión, o bien, menor ángulo de giro y mayor presión.

Resumo

A fabricação de provetas cilíndricas de mistura asfáltica se realiza utilizando a prensa Compactadora Giratória (PCG). A compactação se consegue pela ação simultânea de uma força de compressão vertical aplicada em forma axial e com o deslizamento giratório mediante a inclinação do eixo da proveta. A pesquisa pretende avaliar a influência da pressão aplicada e o ângulo de giro ao compactar misturas tipo AC16S e BBTM11B, segundo a norma europeia, o árido procedente da pedreira é de origem calcário e o piche asfáltico é do tipo B50/70. A compactação se realiza relacionando 9 variáveis, obtendo 27 combinações. As variáveis correspondem a três níveis de pressão (0,45 MPa, 0,60 MPa e 0,75 MPa); três ângulos de giro (0,82°, 1° e 1,25°); em provetas de 1.200 g, 1800 g e 2500 g. Como resultados preliminares, verifica-se que o esforço de corte aumenta à medida que aumenta o número de giros, até chegar a um ponto onde tende a estabilizar-se. O ponto de inflexão se observa ao redor do giro 100. Por outro lado, pode-se concluir que é possível chegar a uma mesma curva de densidade, combinando valores de pressão e ângulo de giro, isto é, para conseguir uma mesma densidade se pode combinar maior ângulo de giro com menor pressão, ou ainda, menor ângulo de giro e maior pressão.

INTRODUCCIÓN

La fabricación de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica puede realizarse utilizando la Prensa Compactadora Giratoria (PCG). La PCG ofrece para cada giro el esfuerzo cortante aplicado y la densidad geométrica de la probeta. Con la densidad máxima de la mezcla, se obtiene el porcentaje de vacíos para cada giro.

El estudio de las variables influyentes en la compactación con la PCG, se desarrolla en el Laboratorio de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya. La investigación pretende evaluar la influencia de la masa de la probeta, la presión aplicada y el ángulo de giro, al compactar briquetas de diámetro de 10 cm. Para ello, se diseñan dos mezclas del tipo AC16S y BBTM11B, el árido procedente de cantera es de origen calcáreo y el betún asfáltico es del tipo B50/70. El betún se añade en un porcentaje de 5 % para la mezcla AC16S y 4.8 % para la mezcla BBTM11B, con respecto a la masa total.

Al revisar la normativa referente a la compactación por medio de la PCG, se detecta que la norma ASTM D 6925-06 propone un ángulo de giro de 1.25° y una presión de compactación de 0.60 MPa; por otra parte, la norma europea EN-12697-31:2008 indica que el ángulo de giro deber ser de 0.82° y la presión de 0.60MPa. Por consiguiente, la compactación en el presente estudio se realiza con tres niveles de presión (0.45 MPa, 0.60 MPa y 0.75 MPa), tres ángulos de giro (0.82°, 1° y 1.25°), en probetas de 1200 g, 1800 g y 2400 g. De lo anterior resultan 9 variables y 27 combinaciones para cada tipo de mezcla. Se elige compactar las probetas con 250 giros cada una y de esta manera se construyen las curvas de esfuerzo cortante, densidad y porcentaje de vacíos versus el número de giros, para las nueve variables consideradas, denominadas en adelante, *variables de entrada*.

VARIABLES INFLUYENTES EN LA COMPACTACIÓN

Para determinar la influencia de las variables de entrada en la compactación empleando la PCG se evalúa la respuesta obtenida en cuanto al esfuerzo cortante, en la Figura 1 se observa que para ambas mezclas, hay un incremento del esfuerzo cortante en los primeros giros, y posteriormente, éste se mantiene prácticamente constante. En la gráfica se representan los tres niveles de presión 0.75 MPa, 0.60 MPa y 0.45 MPa. En relación al análisis de las variables de entrada en función del esfuerzo cortante, se aprecia que la relación existente entre presión de compactación y esfuerzo cortante es positiva y directa, es decir, que a medida que aumenta la presión, se incrementa el esfuerzo. En la Figura 1 los menores valores de esfuerzo cortante corresponden a las presiones de 0.45 MPa, mientras que aplicar 0.75 MPa la respuesta del esfuerzo cortante es mayor. También se observa que para las mismas condiciones de presión y ángulo, el esfuerzo que requiere la máquina para la compactación de las probetas, es mayor en el caso de la mezcla semidensa (AC16S) que en la discontinua (BBTM11B).

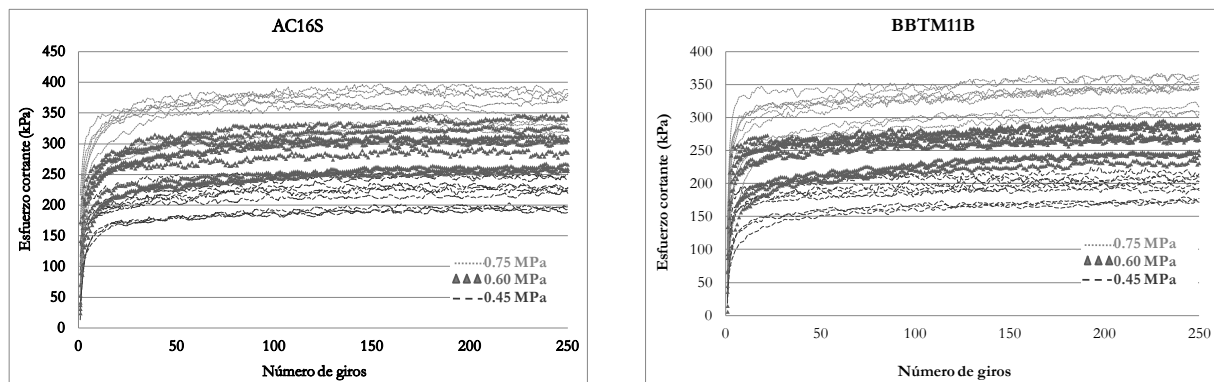


Figura 1: Variación del esfuerzo cortante en función del número de giros

Una de las variables de entrada que marca el comportamiento de la densidad es la presión de compactación. Al comparar las curvas de densidad en función de la presión ejercida, se observa para las dos mezclas evaluadas, una relación directa entre ambas variables, que indica que a menor presión, se alcanzan menores densidades. Se representan las curvas de densidad generadas con la menor presión (0.45 MPa) y aquellas con mayores presiones (0.6 y 1.25 MPa) (Figura 2).

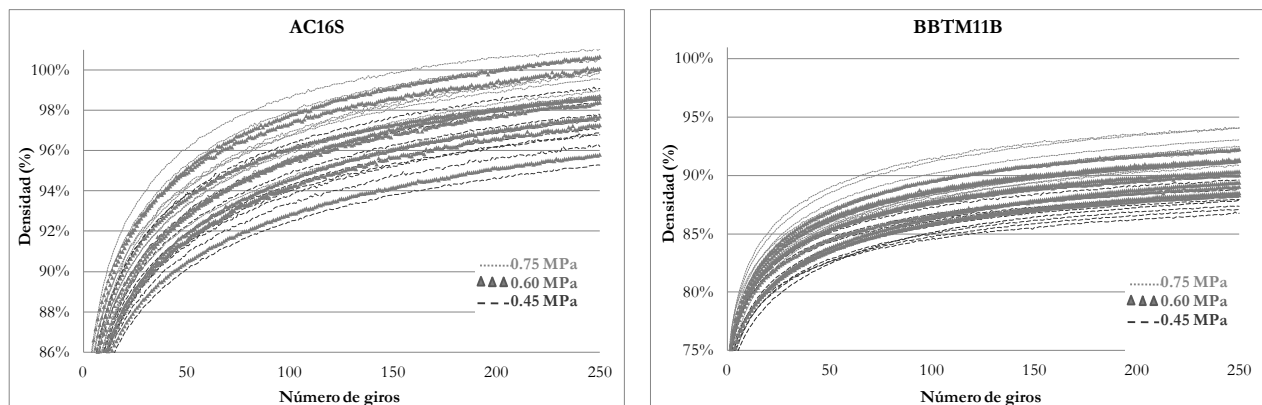


Figura 2: Variación de la densidad en función del número de giros para diferentes presiones de compactación

Otra variable que influye en la densidad es el ángulo de giro, ya que la compactación con el menor ángulo (0.82°), responde a curvas con menores densidades, mientras que en la compactación con los ángulos de 1° y 1.25° se obtienen curvas de mayores densidades. Esta tendencia se presenta en ambas mezclas.

La forma de las curvas de densidad versus número de giros es similar para todos los casos evaluados, esto es, que la densidad aumenta con el número de giros. El incremento es acelerado en los primeros giros y luego continua en menor grado. Se presume que la densidad seguiría en aumento después de los 250 giros.

Recapitulando, se deduce que el esfuerzo cortante está influenciado principalmente por la presión de compactación. En cuanto a la densidad de la probeta, quien domina su comportamiento es la presión de compactación y el ángulo de giro. En la Figura 3 se observa la interacción entre la presión, el ángulo y la densidad alcanzada con la PCG.

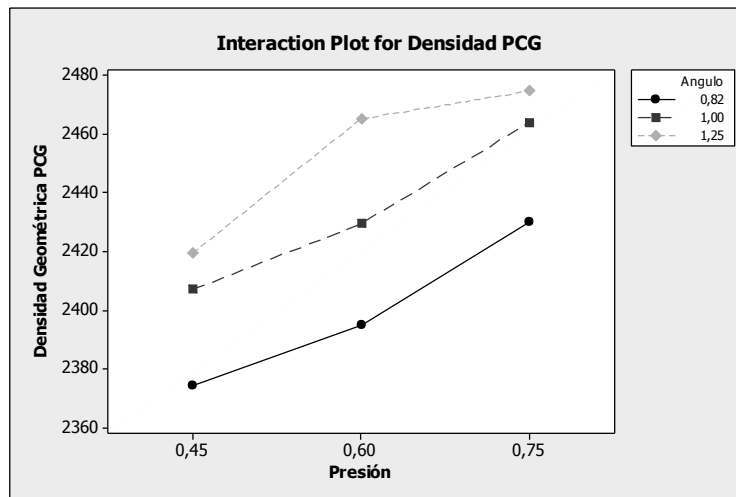


Figura 3: Interacción entre densidad PCG, presión y ángulo

SIMILITUD DE CURVAS DE DENSIDAD

Las curvas de densidades constituidas por la compactación con la PCG presentan similitudes en su forma cuando se generan con diferentes variables de entrada. Dicha similitud se evidencia prácticamente en toda la curva. En la Figura 2 se observa la superposición de curvas con diferentes presiones y diferentes ángulos, alcanzando a los 250 giros un mismo valor de densidad; por lo cual, es posible obtener dos curvas similares de densidad vs número de giros, combinando valores de presión y ángulo. A continuación se presentan tres pares de curvas similares para cada mezcla, cuyos datos de presión, ángulo y densidad a 250 giros se resumen en la Tabla 1 y Figura 4.

Tabla 1: Similitud de densidades para diferentes condiciones de presión y ángulo de giro

Par	Presión (MPa)	Ángulo de giro (°)	Densidad a 250 giros (kg/m ³)
MEZCLA AC16S			
1	0.45	1.25	2435
	0.75	0.82	2433
2	0.6	1.25	2473
	0.75	1	2468
3	0.6	1.25	2487
	0.75	1	2484
MEZCLA BBTM11B			
1	0.45	1.25	2236
	0.6	1	2240
2	0.6	1.25	2277
	0.75	1	2273
3	0.6	1.25	2302
	0.75	1	2308

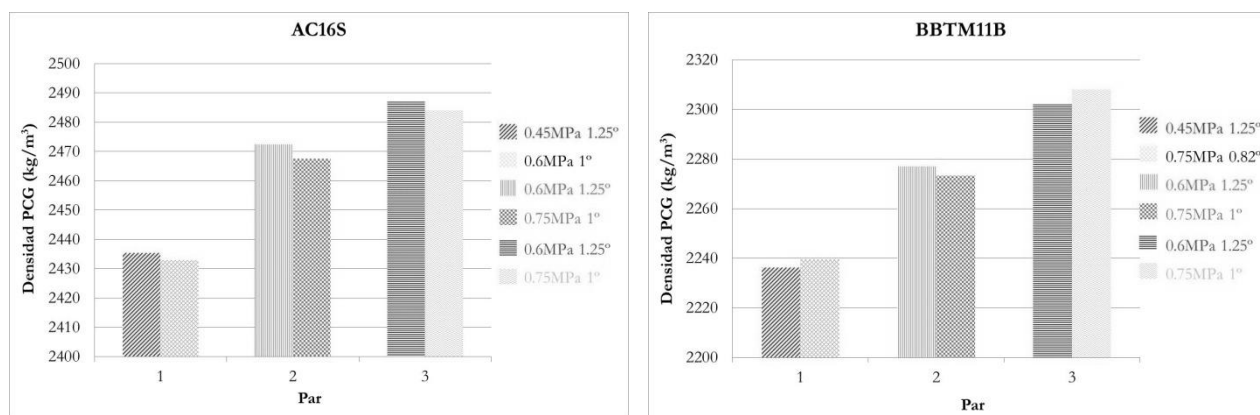


Figura 4: Valores de densidad geométrica a 250 giros, para tres pares similares en mezcla AC16S y BBTM11B

Por ejemplo, para la mezcla AC16S, la densidad alcanzada a los 250 giros, con una presión de 0.60 MPa y ángulo de 1.25° (2487 kg/m³) es similar a la obtenida con una presión de 0.75 MPa y ángulo de 1° (2484 kg/m³). En la mezcla BBTM11B, se puede resaltar la similitud de los valores de densidad de la curva de 0.60 MPa y 1° (2240 kg/m³) con la curva de 0.45 MPa y 1.25° (2236 kg/m³). Los datos se encuentran en la Tabla 1.

La densidad máxima de la mezcla AC16S es 2495 kg/m³, que corresponde al 100 % de densidad en la Figura 5, también se dibujan el rango de porcentaje de vacíos exigido por la normativa europea correspondiente a 4 % y 6 %. Para las dos energías de compactación presentadas (0.60 MPa-1.25° y 0.75 MPa-1°) se logra una densidad entre 94 % y 96 % al compactar entre 40 y 60 giros. En este rango la densidad aumenta 2 % cada 25 giros, este parámetro se podría tomar como referencia para evaluar la densidad de compactación en campo.

De manera similar, la mezcla BBTM11B representada en la Figura 6, alcanza un valor de densidad máxima de 2495 kg/m³, y la exigencia del porcentaje de vacíos es 12 % como mínimo. Para las dos energías de compactación presentadas (0.60 MPa-1° y 0.45 MPa-1.25°) se logra una

densidad de 88 % aproximadamente en el giro 120. En este rango la densidad aumenta 2 % cada 50 giros.

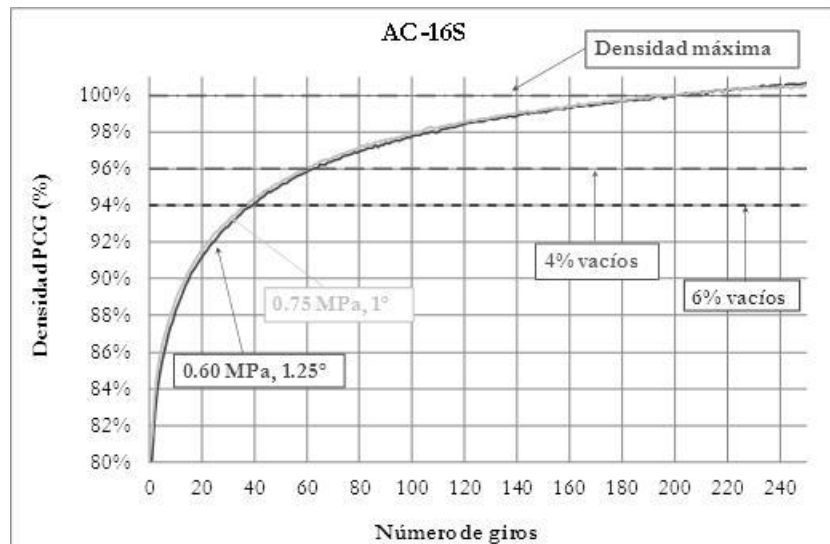


Figura 5: Similitud de densidades PCG para diferentes condiciones de presión y ángulo de giro en mezcla AC16S

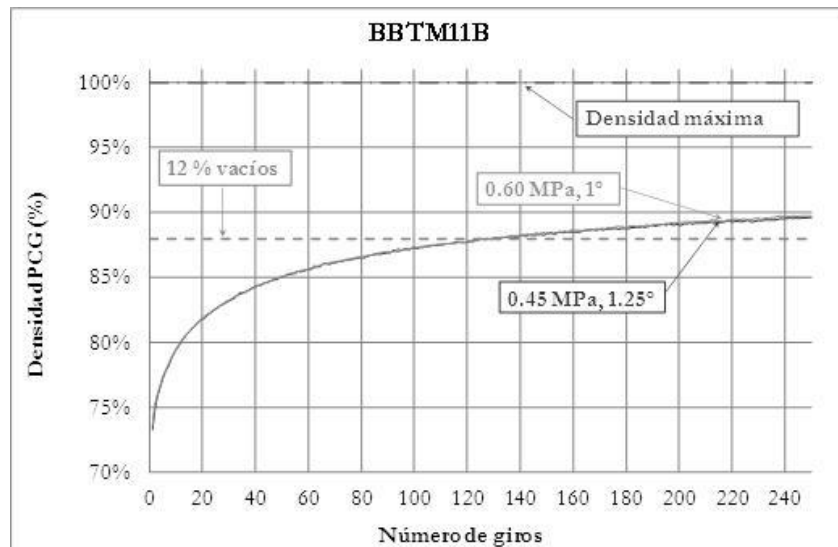


Figura 6: Similitud de densidades PCG para diferentes condiciones de presión y ángulo de giro en mezcla BBTM11B

CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES

Desarrollando el análisis estadístico, se determina el coeficiente de correlación de Pearson para las tres variables de entrada: masa, ángulo de giro y presión de compactación. Existe una correlación lineal positiva fuerte entre la densidad obtenida y la presión ejercida, y entre la densidad y el ángulo de giro. Según el análisis realizado se ha observado que las variables de entrada que marcan el comportamiento del esfuerzo cortante y la densidad son la presión de

compactación y el ángulo de giro; en consecuencia, los análisis numéricos se enfocan en estas dos variables de entrada (presión y ángulo). Para cada mezcla se determina la ecuación que relaciona la densidad geométrica con las dos variables más influyentes, estos son, presión de compactación y ángulo de giro. Con el método de mínimos cuadrados lineal se calcularon las ecuaciones siguientes:

Ecuación mezcla AC16S

$$\text{Densidad PCG} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 2195,04 + 189,21 * \text{Presión (MPa)} + 117,97 * \text{Ángulo (}^\circ\text{)} \quad (1)$$

Ecuación mezcla BBTM11B

$$\text{Densidad PCG} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 1935,57 + 273,18 * \text{Presión (MPa)} + 145,37 * \text{Ángulo (}^\circ\text{)} \quad (2)$$

Para ambas mezclas se corroboran los datos de densidad obtenidos con las ecuaciones anteriores, comparados con los valores de densidad del PCG (Figura 7). Para la mezcla AC16S la desviación es de 20.4996 y el r^2 es 65%, en la mezcla BBTM11B la desviación es 30.2181 y el r^2 es 65.4 %. La respuesta encontrada desencadena el análisis profundo de la técnica existente en cuanto a compactación de mezclas asfálticas, extrapolando la investigación a la compactación de firmes en terreno. En la Figura 7 se presenta la dispersión de los valores de densidad obtenidos por el procedimiento de compactación con la PCG y aquellos valores calculados mediante las ecuaciones de regresión lineal. Para ambas mezclas, el 65% de los datos obtenidos con la PCG se ajustan a las ecuaciones planteadas. La dispersión de los valores de densidad al compactar con la PCG comparados con las resultantes del método hidrostático, para la mezcla AC16S el valor de r^2 es 62%, mientras que para la BBTM11B es 93 %.

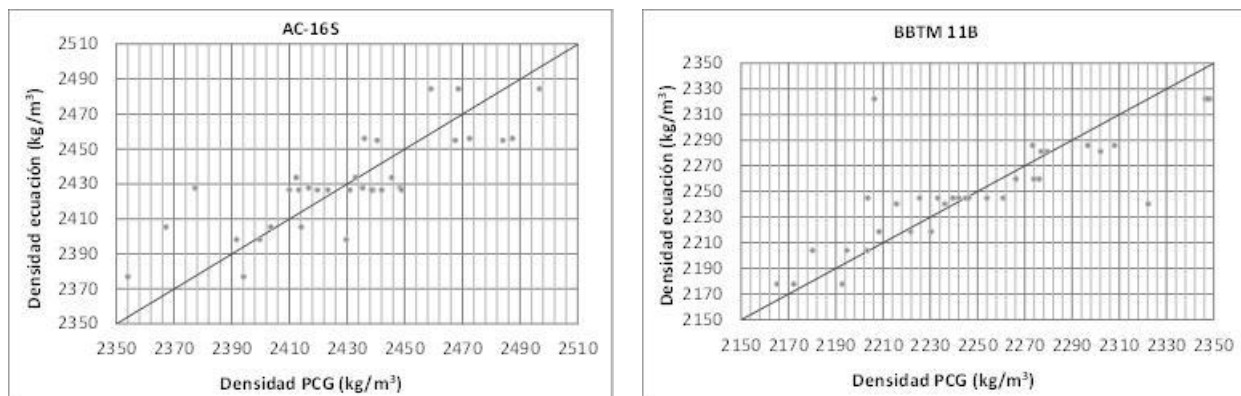


Figura 7: Dispersión de densidades resultantes de ecuación y ensayo PCG

APLICACIÓN DEL COMPACTADOR GIRATORIO AL ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

En la dosificación de las mezclas bituminosas se considera conjuntamente sus características volumétricas (densidad, huecos) y propiedades mecánicas. El preparar en laboratorio probetas

con características volumétricas similares a las que se van a conseguir en obra es muy importante a la hora de ensayar la mezcla y evaluar sus propiedades. Al aplicar el método Marshall las probetas se compactan a 75 golpes por cara para las mezclas tipo AC (gruesas, densas y semidensas) y con 50 golpes las mezclas discontinuas y porosas. La experiencia ha puesto de manifiesto que esa metodología de compactación proporciona probetas de densidades similares a las conseguidas en obra.

Al analizar los resultados del estudio y comparar las densidades obtenidas respecto a la Marshall, sorprende que solo aplicando las condiciones más enérgicas de compactación (mayor presión y mayor ángulo) y después de aplicar un gran número de giros, se llega a alcanzar la densidad Marshall. Sin embargo, en principio ambas mezclas deberían compactarse con facilidad, ya que la AC16S está fabricada con un alto contenido de betún (5%) y la otra es una mezcla tipo discontinua que en principio requiere menor energía. Además, es precisamente este tipo de mezcla, la que mayor diferencia presenta entre la densidad Marshall (a 50 golpes) y la conseguida con el compactador giratorio.

Esto lleva a comparar la densidad proporcionada por la PCG (densidad geométrica) con la densidad obtenida en probetas Marshall (densidad hidrostática). El procedimiento con el cual se determina la densidad manifiesta diferencias, ya que la densidad PCG se calcula en forma geométrica y la metodología para obtener la densidad de probetas fabricadas con el compactador Marshall es hidrostático. En ambas mezclas la densidad Marshall (hidrostática) es mayor que la PCG (geométrica), en especial, en el caso de la mezcla discontinua, que presenta mayores huecos y macrotextura, y al medir el estado saturado superficialmente seco es difícil que no pierdan agua.

En la Figura 8 y Figura 9 se corrigen las densidades PCG para aproximarse a las hidrostáticas. En el caso de las mezclas densas se ha aumentado en un 1,19 % la densidad (Figura 8), y 3 % en el caso de la discontinua (Figura 9). En las correspondientes gráficas se ve que con estas correcciones se consigue llegar a las densidades Marshall de referencia con facilidad, a partir de 100 a 120 giros.

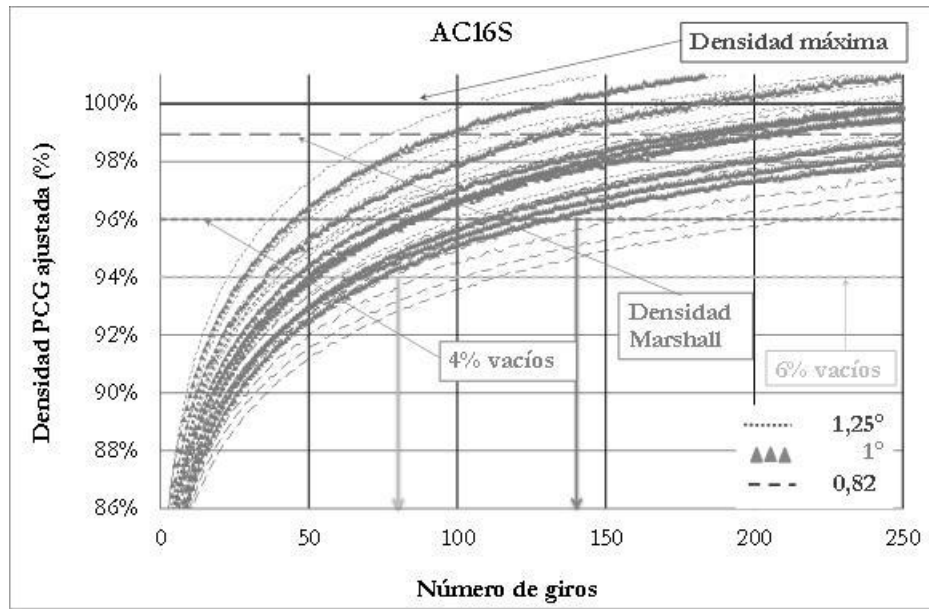


Figura 8: Densidad máxima, Marshall y PCG con ajuste para la mezcla AC16S

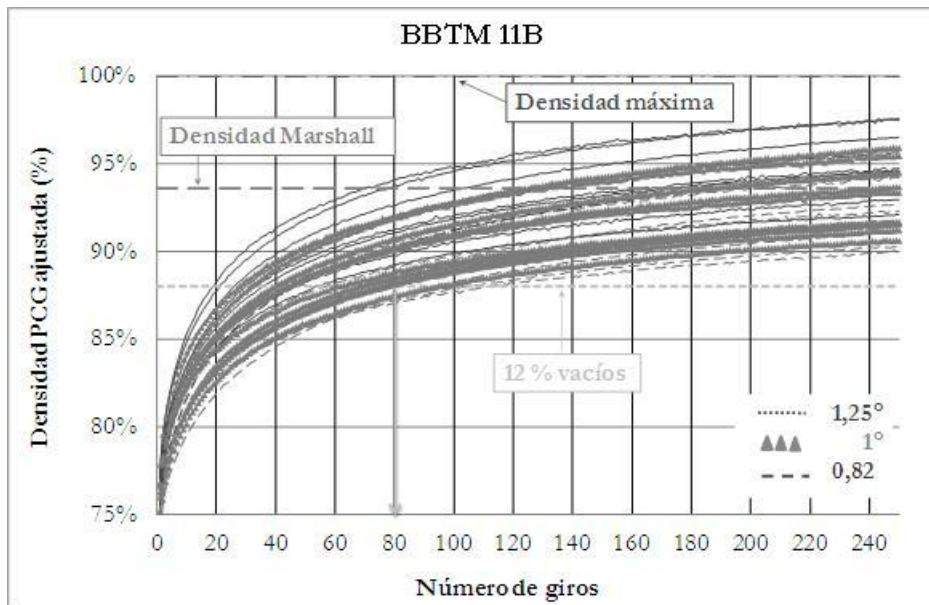


Figura 9: Densidad máxima, Marshall y PCG con ajuste para la mezcla BBTM11B

CONCLUSIONES

En el presente estudio se consideran tres variables de entrada, presión, masa y ángulo de giro y se determina su incidencia en las denominadas variables resultantes que son densidad y esfuerzo cortante, las cuales son medidas por la PCG en todos los ciclos de compactación. Mediante la investigación se concluye que la presión de compactación y el ángulo de giro son las variables que determinan el comportamiento de la curva de densidad. La presión de compactación

determina el esfuerzo cortante presentando una correlación positiva, esto es, a medida que aumenta el valor de la presión, se incrementa el esfuerzo.

Con respecto a la densidad que se obtiene al compactar con la PCG, se observa que las variables que influyen son el ángulo de giro y la presión de compactación, esto es que a medida que aumenta el ángulo se obtienen mayores valores de densidad, asimismo, aumentar la presión conlleva a densidades mayores. Por el contrario, al disminuir tanto la presión como el ángulo, se obtienen menores densidades. Considerando que las características de las mezclas analizadas son distintas (mezcla semidensa y discontinua), se observa la misma tendencia de respuesta.

Durante el proceso de compactación se observan curvas similares de densidad vs número de giros para distintas variables de entrada, es decir, para una combinación de alta presión y bajo ángulo de giro, se presenta una curva muy similar a aquella compactada con baja presión y alto ángulo. De esta manera, se corrobora la influencia de dos de las variables de entrada (presión y ángulo de giro), que al ser combinadas adecuadamente, se logra una misma densidad. Para validar esta afirmación, se determina una ecuación de regresión por mínimos cuadrados para cada mezcla evaluada. Con estas ecuaciones es posible generar dos caminos de compactación para llegar a una misma densidad de la mezcla asfáltica. La aplicación de este análisis en la práctica, permitiría disminuir el gasto energético, al poder compactar con menores presiones obteniendo valores de densidad similares.

Al comparar los resultados de la máquina giratoria con los de la compactación con probetas Marshall es importante tener en cuenta los procedimientos usados en la evaluación de las densidades geométrica (PCG) y sumergida (Marshall).

Si bien se debe continuar con la investigación al respecto, y dado que este comportamiento se observa en dos mezclas asfálticas de diferentes características, se considera que es posible extrapolar dicho comportamiento a otros tipos de mezclas e incluso a su aplicación en la compactación en terreno.

REFERENCIAS

American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor. ASTM D 6925-06. 2006.

Barral, M., Romera, R., Miranda, L., Bravo, F. Berbis, J., Felipe, J., Carmona, M., Izquierdo, S., Gil, S., Suárez, F. J., Cervantes, R., Loma, J., Royo, C., Potti, J. (2012). Estudio Comparativo de la Metodología de Compactación Giratoria-Impacto, Parte III. *Revista Asfalto y Pavimentación*, Vol. II, No. 6, p. 9-20.

Norma Europea EN-12697-6:2003. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático. 2003.

Norma Europea EN-12697-31:2008. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 31: Preparación de la muestra mediante compactador giratorio. 2008.