

# Estudio sobre el efecto de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas

## The effect of granulometry on the resistance to rutting of asphalt mixtures

Para citar este artículo / To reference this article  
/ Para citar este artículo: Parra Bohórquez, L. A. y  
Pedroza Soler, J. (2015). Estudio sobre el efecto de  
la granulometría en la resistencia al ahuellamiento  
de mezclas asfálticas. *Ingenio Magno*, 6, pp. 112-  
127.

### **Luis Alberto Parra-Bohórquez**

Universidad Pedagógica y Tecnológica  
de Colombia, Facultad de Ingeniería,  
Grupo de Investigación y Desarrollo en  
Infraestructura Vial (Ginfravial)  
[luis.parra@uptc.edu.co](mailto:luis.parra@uptc.edu.co)

### **Jaime Pedroza-Soler**

Universidad Pedagógica y Tecnológica  
de Colombia, Facultad de Ingeniería,  
Grupo de Investigación y Desarrollo en  
Infraestructura Vial (Ginfravial)  
[jaime.pedroza@uptc.edu.co](mailto:jaime.pedroza@uptc.edu.co)

Recepción: 13 de Abril de 2015

Aceptación: 23 de Septiembre de 2015

## Resumen

**E**n este artículo se analiza el comportamiento de la resistencia a la acumulación de deformaciones permanentes (ahuellamiento) en mezclas asfálticas. Para ello se estudian los agregados de tres canteras de la región de Tunja, para evaluar el efecto que estos tienen, según diferente granulometría, en la resistencia al ahuellamiento. En ese sentido, se presentan los conceptos relevantes dentro del marco de la resistencia a la deformación plástica y las causas de este mecanismo de falla. La etapa preexperimental comprende el origen y la caracterización de los componentes de la mezcla asfáltica (agregados pétreos y asfalto), de acuerdo con las normas de ensayo de materiales para carreteras del Instituto Nacional de Vías (Invias) del 2013. La fase experimental evalúa la resistencia a la deformación plástica o el ahuellamiento mediante la prueba de pista de ensayo de laboratorio, bajo la norma Europea UNE-EN 12697:2208+A1, en mezclas asfálticas preparadas en laboratorio. Los resultados obtenidos indican que la deformación permanente ocurrió tal como se plantea en las hipótesis de la investigación: se presenta mayor resistencia al ahuellamiento el límite inferior de la franja granulométrica, donde los agregados pétreos tienen mayor concentración de gruesos. Las mezclas elaboradas presentaron un valor superior al límite especificado, donde se establece una pendiente de deformación de 0,1 mm/10<sup>3</sup> ciclos de carga, a excepción de la cantera de Samacá, en el límite inferior de la franja granulométrica, la cual presenta buen desempeño en las deformaciones después de 10000 ciclos de carga.

**Palabras clave:** deformación plástica, ensayo Marshall acelerado, granulometría, pavimento flexible.

## Abstract

**T**he main goal of this research is to analyze the behavior of the resistance to the accumulation of permanent deformations (rutting) in asphalt mixtures of aggregates from three mines in the region of Tunja in order to evaluate the effect of the aggregates with different granulometry in the resistance to rutting. The relevant concepts about the plastic deformation are presented as well as the mechanisms that cause their failures. In the pre-experimental stage, the origin and characterization of asphalt mixtures (aggregates and asphalt) are reported according to the tests of materials for roads of INVIAS, 2013 (National Institute of Colombian Roads). The experimental stage assesses the plastic deformation resistance or rutting by means of a laboratory test following the European Standard guidelines UNE-EN 12697:2208+A1 in asphalt mixtures prepared in the laboratory. As expected, the results showed that the highest rutting resistance was obtained when the aggregates had a higher concentration of coarse aggregates. The mixtures produced exceeded the higher rutting limit accepted by the standard (0.1 mm/10<sup>3</sup> load cycles). Only the mixtures prepared with aggregates from Samacá mines, in the lower limit of the gradation range, showed a good performance after 10,000 load cycles.

**Keywords:** plastic deformation, Marshall stability test, flexible pavement, granulometry,

## 1. Introducción

El ahuellamiento es uno de los deterioros funcionales y estructurales más frecuentes que se presentan en

las vías de pavimento flexible. Las investigaciones de este problema se iniciaron en los años setenta, y desde

entonces se ha incorporado entre los parámetros de evaluación de los métodos de diseño de pavimentos.

Este deterioro se origina por la acumulación de deformaciones plásticas o permanentes (no recuperables) en las capas de la estructura, debido a la baja estabilidad en la mezcla de asfalto. Esto significa que en las franjas de circulación (huellas) de las llantas de los vehículos aparece una depresión continua que afecta la comodidad y seguridad para los usuarios de las carreteras (Angelome y Martínez, 2006). El ahuellamiento tiene aplicación directa en los procesos de diseño de mezclas asfálticas, en la fabricación y construcción de capas de pavimento flexible y como factor de control de aceptación y recepción de estas obras. Se garantiza la durabilidad de las estructuras viales cuando se reduce el efecto de este deterioro que causa con mayor frecuencia los fallos en las capas de asfalto por el efecto continuo de aplicación de cargas del tránsito.

Uno de los principales defectos de las mezclas asfálticas en caliente durante su vida útil es la deformación permanente o el ahuellamiento, el cual se incrementa por el aumento del volumen y la velocidad del tránsito (Caro *et al.*, 2003), la presión de inflado en las llantas, el aumento de la carga transmitida al pavimento por los vehículos (Morea, 2011) y la frecuencia de esta.

Para garantizar el correcto desempeño de la estructura en las carreteras, se puede mejorar la calidad de los agregados pétreos y su dosificación, ya que constituyen entre el 80% y el 90% del volumen total, o entre el 94% y el 95% de la masa de una mezcla asfáltica en caliente (HMA, por su sigla en inglés). La calidad de los agregados se especifica por la dureza, la solidez (durabilidad), la limpieza, la forma de las partículas, la angulosidad, la textura de la superficie y la absorción, que son, entre otras, recomendaciones que han surgido a través de la investigación en el método Superpave

(Prowell, Jingna y Brown, 2005), desarrollado en el programa estratégico de investigación en carreteras y que involucra el ahuellamiento como un criterio de control de la mezcla asfáltica en los diferentes niveles de análisis del método (Tung-Wen, Wen-Kai y Jian-Xun, 2013).

Los agregados deben tener origen, gradación y forma apropiada (angular) para diseñar mezclas asfálticas con largas y satisfactorias vidas de servicio. El agregado fino es otro componente importante de las mezclas asfálticas; su cantidad y la angulosidad son factores importantes que afectan el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente (Topal y Sengoz, 2004). Sin embargo, se espera que las gradaciones más gruesas obtengan un mejor desempeño que la gradación más fina.

En la investigación sobre el impacto del tipo y la gradación de los agregados en mezcla asfáltica en caliente (Ahmed y Attia, 2013) se encontró, como principal conclusión, que la gradación gruesa en una mezcla asfáltica presenta menor deformación permanente determinada en pruebas de laboratorio en las que se utilizan diferentes tipos de agregados, mientras que mezclas con gradación abierta presentan mayor ahuellamiento.

Se ha analizado la influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas del Instituto Nacional de Vías (Invías) con sus especificaciones técnicas del 2007, así como las del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) (Reyes y Camacho, 2008). Este análisis utilizó un equipo de deformación permanente en mezclas asfálticas, donde se manejaron probetas de forma rectangular alargada.

Entre los resultados encontrados se determinó que la deformación permanente está directamente relacionada con las franjas granulométricas y la energía de compactación; además, según la normativa, la velocidad

de deformación solo la cumple la granulometría MD10 del IDU.

La experimentación con diferentes tipos de agregados ha demostrado que con granulometrías en la zona del límite inferior (mayor concentración de agregados gruesos) de franjas granulométricas se tienen mezclas asfálticas más resistentes a la deformación plástica (Xiao *et al.*, 2015). Asimismo, el origen, el tamaño y la textura de los agregados tienen influencia directa en la resistencia al ahuellamiento (skender, 2013). Así, agregados más gruesos, de gradación continua, con textura rugosa y angulares garantizan el contacto partícula a partícula y, por ende, incrementarán la resistencia a la deformación permanente (Chun *et al.*, 2013).

En la documentación previa se establece el ahuellamiento como un defecto estructural y funcional de los pavimentos flexibles y se convierte en un parámetro de aceptación o rechazo en el diseño de la mezcla asfáltica; lo anterior compromete a seguir estudiando este fenómeno y motiva a la investigación con agregados de una zona en particular para establecer correlaciones que contribuyan al incremento de la resistencia a la deformación permanente.

## 2. Materiales y métodos

Se inició la investigación de laboratorio con la selección del material para la preparación de la mezcla asfáltica. Los agregados pétreos utilizados fueron obtenidos de tres canteras de la región de Tunja (figura 1): cantera Metrópolis (pizarra o *shale*), cantera Agregados Santa Lucía (arenisca) y Agregados Nobsa (caliza), localizadas en los municipios de Moniquirá, Samacá y Nobsa, respectivamente. Estos materiales han sido caracterizados en estudios anteriores (Aranda y Prieto, 2014), que concluyen que son aptos para mezclas asfálticas densas y semidensas según las *Especificaciones generales de construcción* (Invías, 2013a).

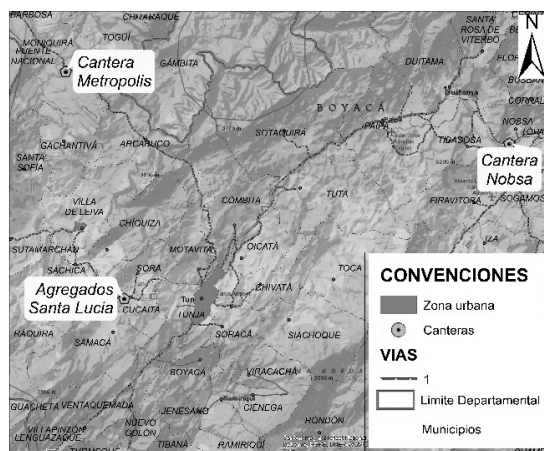


Figura 1. Mapa de localización de canteras para el estudio

Fuente: Autores.

Se realizó una consulta de la geología regional, con base en la información disponible de las bases de datos del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas), a fin de identificar las condiciones geológicas y geomorfológicas del sitio de estudio y determinar la distribución espacial de las diferentes formaciones, depósitos o materiales existentes en las áreas de las canteras.

Posteriormente se realizó la caracterización del material granular y el asfalto, así como la determinación del contenido óptimo de asfalto para la granulometría estudiada.

### 2.1. Caracterización del material granular

De la tabla 1 a la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de agregados pétreos de las tres canteras seleccionadas, según las *Normas de ensayo para carreteras* (Invías, 2013b) para mezclas asfálticas en caliente tipo MDC-19.

**Tabla 1. Ensayos de caracterización de material granular, cantera Metrópolis (Moniquirá)**

Norma Invías	Ensayo	Resultado	Especificación
E-133-13	Equivalente de arena	84%	50% mín.
E-218-13	Desgaste máquina de los ángeles	18,66%	25% máx.
E-227-13	Caras fracturadas	100%	70% mín.
E-230-13	Índice de aplanamiento	17,19%	8-20
E-230-13	Índice de alargamiento	19,62%	--
E-220-13	Pérdida en ensayo de solidez con sulfato de sodio	Finos	5,54%
		Gruesos	5,0%
			18% máx.
E-223-13	Gravedad específica de agregados gruesos	2,668	--
E-222-13	Gravedad específica de agregados finos	2,630	--
E-237-13	Contenido de impurezas	0,27%	0,50%
E-214-13	Cantidad de material que pasa el tamiz 200 mediante lavado	5,21%	--

Fuente: Autores.

**Tabla 2. Ensayos de caracterización de material granular, cantera Agregados Santa Lucía (Samacá)**

Norma Invías	Ensayo	Resultado	Especificación
E-133-13	Equivalente de arena	82%	50% mín.
E-218-13	Desgaste en máquina de los ángeles	22,47%	25% máx.
E-227-13	Caras fracturadas	100%	70% mín.
E-230-13	Índice de aplanamiento	12,66%	8-20
E-230-13	Índice de alargamiento	19,94%	-
E-220-13	Pérdida en ensayo de solidez con sulfato de sodio	Finos	10,81%
		Gruesos	9,19%
			18% máx.
E-223-13	Gravedad específica de agregados gruesos	2,43	-
E-222-13	Gravedad específica de agregados finos	2,39	-
E-237-13	Contenido de impurezas	0,32%	0,50%
E-214-13	Cantidad de material que pasa el tamiz 200 mediante lavado	17,98 %	-

Fuente: Autores.

**Tabla 3. Ensayos de caracterización de material granular, cantera Agregados Nobsa**

Norma Invías	Ensayo	Resultado	Especificación
E-133-13	Equivalente de arena	81%	50% mín.
E-218-13	Desgaste en máquina de los ángeles	24,23%	25% máx.
E-227-13	Caras fracturadas	100%	70% mín.
E-230-13	Índice de aplanamiento	17,67	8-20
E-230-13	Índice de alargamiento	18,19%	-
E-220-13	Pérdida en ensayo de solidez con sulfato de sodio	Finos	13,09%
		Gruesos	12,98%
E-223-13	Gravedad específica de agregados gruesos	2,601	-
E-222-13	Gravedad específica de agregados finos	2,583	-
E-237-13	Contenido de impurezas	0,48%	0,50%
E-214-13	Cantidad de material que pasa el tamiz 200 mediante lavado	26,02%	-

Fuente: Autores.

## 2.2. Caracterización del cemento asfáltico

Se obtuvo cemento asfáltico con un grado de penetración 60-70 (refinería de Barrancabermeja), procedente de Industria Colombiana de Asfaltos (IncoAsfaltos S.A.), que funciona actualmente en el municipio de Chía (Cundinamarca). Sus características se relacionan en la tabla 4.

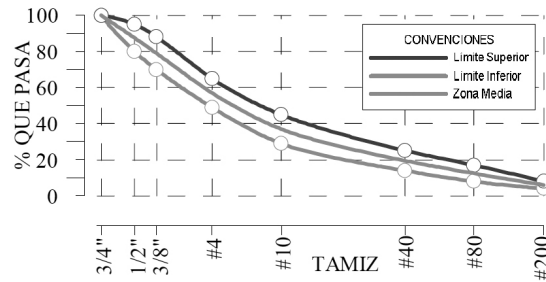
**Tabla 4. Ensayos de caracterización de cemento asfáltico**

Norma Inviás	Ensayo	Resultado	Especificación
E-709-13	Punto de ignición y llama	240 °C 258 °C	230 °C, mín.
E-712-13	Punto de ablandamiento	49,5 °C	48-54 °C
E-706-13	Penetración	66	60-70 mm
E-724-13	Índice de penetración de cementos asfálticos	-0,6	-1,2 a +0,6
E-717-13	Viscosidad rotacional Brookfield a 60 °C	1845 (Poise)	1500 Poise, mín.
E-707-13	Gravedad específica	1,017	No especificado
E-702-13	Ductilidad de los materiales asfálticos	> 100 cm	100 mín.

Fuente: Autores.

### 2.3. Curvas granulométricas

Se realizó el análisis granulométrico de los agregados de las tres canteras seleccionadas, con el fin de obtener sus franjas granulométricas y realizar la comparación con la especificación para mezclas asfálticas de gradación continua de tipo denso en caliente (MDC-19), la cual tiene agregados con tamaño máximo nominal de 19 mm (3/4 de pulgada). En la figura 2 se presenta la franja granulométrica para este tipo de mezcla, con sus límites inferior y superior.

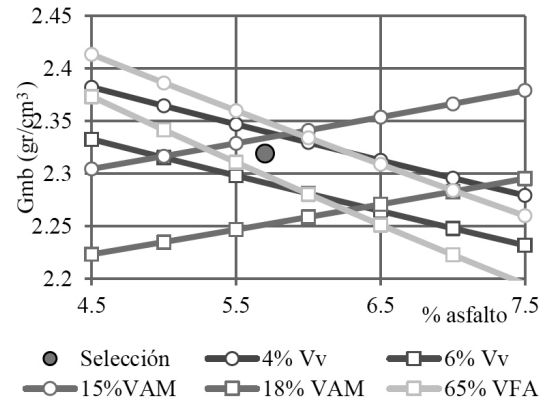


**Figura 2. Franja granulométrica MDC-19**

Fuente: Autores con base en el artículo INV-A-450-13.

### 2.4. Porcentaje óptimo de asfalto

En la figura 3 se presentan, como ejemplo, los criterios considerados en la selección del porcentaje óptimo de asfalto para la granulometría de franja superior (NFS) en la cantera Nobsa. Se indican los rangos de porcentaje de vacíos minerales en la mezcla compacta (VAM), el porcentaje de vacíos con aire (Vv) y el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA).



**Figura 3. Diseño Marshall acelerado, cantera Nobsa franja superior (NFS)**

Fuente: Autores.

La metodología Ramcodes, llamada Marshall Acelerado (o RAM, por sus siglas en inglés), es un método que está basado en el polígono de vacíos, que se define como la región máxima donde se cumplen

simultáneamente todas las especificaciones de vacíos (Vv, VAM, VFA). En consecuencia, el contenido de asfalto seleccionado garantizó tal condición y se obtuvo con la formulación matemática del método a partir de dichas especificaciones y las gravedades específicas de los agregados (Sánchez, 2009).

De acuerdo con lo anterior, se realizó el diseño de mezcla asfáltica tipo MDC-19-Invías para cada tipo de granulometría. A partir del diseño obtenido indicado en la tabla 5, se fabricaron tres probetas, que se ensayaron en el equipo de pista de laboratorio de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

**Tabla 5. Dosificación de diseño**

Cantera	Franja granulométrica	Porcentaje óptimo de asfalto
Cantera Metrópoli (Moniquirá)	Límite superior (MFS)	5,20
	Parte media (MFM)	5,10
	Límite inferior (MFI)	5,00
Agregados Santa Lucía (Samacá)	Límite superior (CUFS)	6,50
	Parte media (CUFM)	6,40
	Límite inferior (CUFI)	6,20
Cantera Nobsa	Límite superior (NFS)	5,70
	Parte media (NFM)	5,60
	Límite inferior (NFI)	5,50

Fuente: Autores.

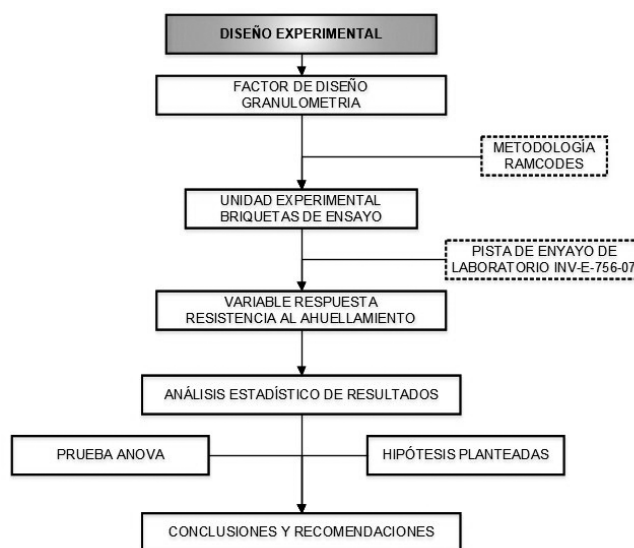
### 3. Desarrollo del trabajo

Una vez establecido el contenido óptimo de asfalto, se fabricaron las muestras (seis por cantera, dieciocho en total para las tres canteras en estudio) para analizar la deformación permanente de las franjas superior, media e inferior, así como la ejecución de los respectivos ensayos

de ahuellamiento.

### 3.1. Diseño experimental

El diseño experimental implementado (figura 4) se fundamentó como un modelo de un solo factor, con variación de diferentes niveles de tratamiento. En todas las pruebas se utilizó el cemento asfáltico comercial (previamente caracterizado) con las mismas propiedades mecánicas y físicas. Se realizó una prueba formal de hipótesis, para determinar si existieron o no diferencias significativas en las medias de los tratamientos, mediante el análisis de varianza.



**Figura 4. Estructura del diseño experimental**

Fuente: Autores.

El diseño experimental se realizó en forma independiente para cada cantera estudiada (tabla 6).



**Tabla 6. Diseño experimental planteado**

Aspecto	Diseño experimental
Factor de tratamiento	Granulometría de la mezcla asfáltica MDC-19
Niveles de tratamiento (%)	Límite superior, zona media y límite inferior de la franja granulométrica para mezclas asfálticas MDC-19
Unidad experimental	Briquetas de ensayo de pista de laboratorio
Repeticiones	Dos por tratamiento (número de muestras mínimo recomendado según la norma UNE-EN 12697:2208+A1)
Variable de respuesta (Y)	Resistencia al ahuellamiento
Variable independiente (X)	Granulometría de la mezcla asfáltica MDC-19

Fuente: Autores.

### 3.2. Ensayo de ahuellamiento

Para cada una de las tres canteras, se construyeron las briquetas de ensayo para las tres zonas de la franja granulométrica (superior, media e inferior). Para cada condición estudiada se fabricaron dos briquetas, es decir, dos réplicas por cada ensayo, con el objetivo de cumplir con la repetibilidad y confiabilidad en el experimento, de acuerdo con la recomendación de la norma Europea UNE-EN 12697:2208+A1 para este tipo de ensayo.

Las muestras fueron ensayadas mediante la aplicación de una carga a la rueda bajo condiciones estándar de 700 N, medida al nivel superior de la probeta. La temperatura de prueba fue de 60 °C. El ensayo se

ejecutó durante aproximadamente 6 horas y 10 minutos en cada briqueta, equivalente a 10.000 ciclos de carga. En la figura 5 se presenta el equipo utilizado para el ensayo, que se ubica en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Facultad de Ingeniería de la UPTC.

**Figura 5. Ensayo de ahuellamiento de mezclas asfálticas**

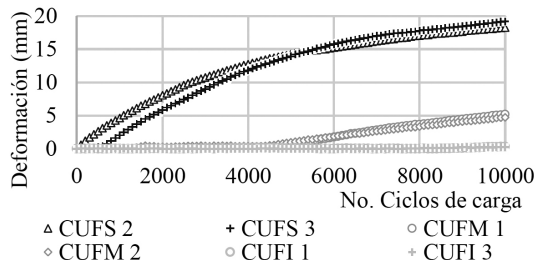
Fuente: Autores.

## 4. Resultados

Los especímenes de prueba con contenido óptimo de asfalto para las tres canteras en estudio se ensayaron según la norma UNE-EN 12697-22:2008+A1:2008 (Comité Europeo de Normalización [CEN], 2008), con el objeto de analizar la influencia de la granulometría en la resistencia a la deformación plástica en mezclas asfálticas tipo MDC-19.

### 4.1. Curvas de resistencia al ahuellamiento

En la figura 6 se presentan los resultados de ahuellamiento para la cantera localizada en el municipio de Samacá (Agregados Santa Lucía). En ella se aprecia que el mayor valor de deformación lo presenta la zona o el límite superior de la franja granulométrica MDC-19, seguido por la zona media de la franja. Por último, los menores valores de deformación lo presenta el límite inferior de la franja, donde los agregados pétreos tienen mayor concentración de gruesos en la mezcla asfáltica.

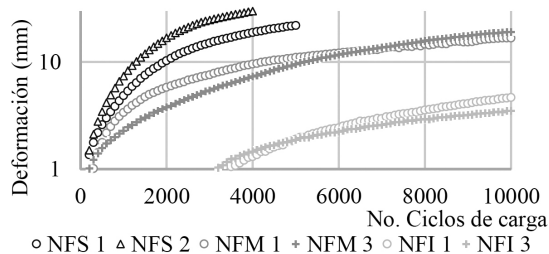


**Figura 6. Resultados de prueba de ahuellamiento, Agregados Santa Lucía (Samacá)**

Fuente: Autores.

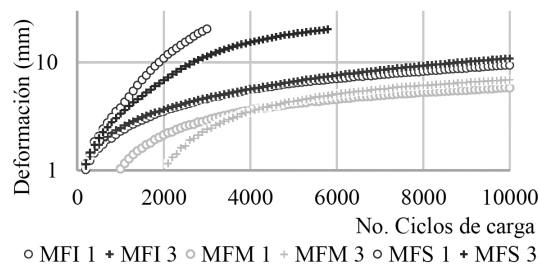
En la figura 7 se presentan los resultados de ahuellamiento para la cantera del municipio de Nobsa. La tendencia de presentar mayores deformaciones permanentes se mantiene en el límite superior de la franja granulométrica, donde los agregados presentan una mayor concentración de finos. Los ensayos finalizaron en el ciclo de carga 2100, 4200 y 5000. La gradación media presenta una tendencia sobre los 18 mm de deformación luego de 10000 ciclos de carga. Para el límite inferior se alcanzaron deformaciones entre 2 y 4 mm.

En la figura 8 se presentan los resultados de ahuellamiento para la cantera Metrópolis del municipio de Moniquirá, donde se observó que las mayores deformaciones permanentes se presentaron en el límite superior de la franja granulométrica, y las menores deformaciones se evidenciaron en la zona media. Las probetas fabricadas con la gradación del límite superior de la franja superaron los 20 mm de deformación entre el ciclo de carga 2900 y 5800, de los 10.000 ciclos que dura el ensayo.



**Figura 7. Resultados de prueba de ahuellamiento, cantera Nobsa**

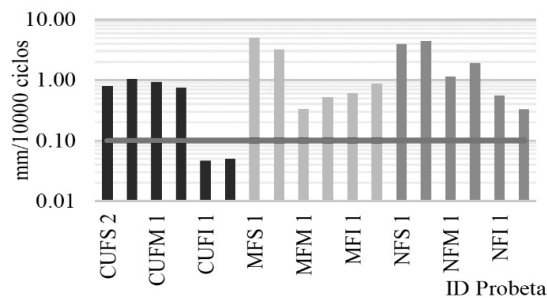
Fuente: Autores.



**Figura 8. Resultados de prueba de ahuellamiento, cantera Moniquirá**

Fuente: Autores.

En la figura 9 se muestran los resultados de la pendiente de deformación para cada cantera y franja granulométrica evaluada. En color azul se presentan las mezclas de la cantera de Samacá, en color verde se presentan las mezclas de la cantera de Moniquirá y en color naranja se representan las mezclas de la cantera de Nobsa.



**Figura 9. Pendiente de deformación**

Fuente: Autores.

En la tabla 7 se presentan los resultados de la prueba de ahuellamiento.

**Tabla 7. Resultados prueba de ahuellamiento**

ID	Muestra	WTS AIRE (mm/10 <sup>3</sup> ciclos)	RDAIRE, 10000 ciclos (mm)	RDAIRE media	PRD AIRE, 10 000 ciclos	PRDAIRE, Media
1	CUFS 2	0,796	18,220	18,685	30,80	33,06%
2	CUFS 3	1,044	19,150		35,32%	
3	CUFM 1	0,930	5,180	4,940	9,59%	9,45%
4	CUFM 2	0,744	4,700		9,31%	
5	CUFI 1	0,046	0,330	0,295	0,60%	0,53%
6	CUFI 3	0,050	0,260		0,46%	
7	MFS 1	4,920	20,360	20,770	45,24%	44,50%
8	MFS 3	3,200	21,180		43,76%	
9	MFM 1	0,332	5,790	6,350	11,52%	12,57%
10	MFM 3	0,510	6,910		13,63%	
11	MFI 1	0,602	9,390	10,150	19,44%	20,78%
12	MFI 3	0,856	10,910		22,12%	
13	NFS 1	3,905	21,930	21,200	44,98%	44,94%
14	NFS 2	4,425	20,470		44,89%	
15	NFM 1	1,136	16,710	17,935	32,20%	36,69%
16	NFM 3	1,918	19,160		41,18%	
17	NFI 1	0,554	4,670	4,085	8,51%	7,72%
18	NFI 3	0,324	3,500		6,94%	

Fuente: Autores.

#### 4.2. Prueba de hipótesis

Se evaluó si existe una diferencia significativa en los resultados de la variable respuesta (resistencia al ahuellamiento) mediante un método estadístico de comprobación de hipótesis. Para ello se compararon los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio para los diferentes niveles de tratamiento: a) límite superior, b) zona media y c) límite inferior de la franja granulométrica.

#### 4.3. Prueba de normalidad

Debido a que en este método estadístico se deben cumplir los supuestos de normalidad y linealidad de los datos, se realizó una prueba de normalidad a la variable *profundidad de la huella* (RD, por sus siglas en inglés), donde se encontró que los datos no muestran ningún patrón de comportamiento, sino que se disponen de manera dispersa. Con ello se comprueba la normalidad existente, como se presenta en la figura 10.

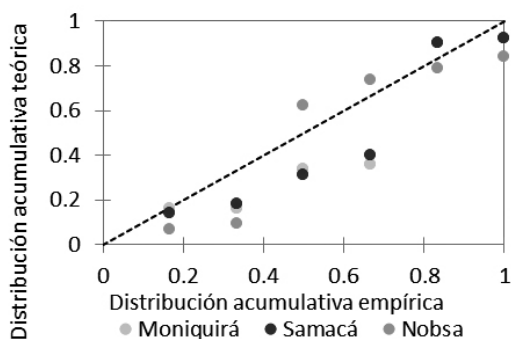


Figura 10. Resultados de prueba de normalidad RD

Fuente: Autores.

De manera análoga se realizó la prueba de normalidad para la variable *pendiente de deformación* (WTS, por sus siglas en inglés), en el que los datos de profundidad de huella en las canteras de Samacá y Nobsa siguen una distribución normal, mientras que para la cantera de Moniquirá los datos no siguen esta misma tendencia.

#### 4.4. Análisis de varianza

Una vez realizada la prueba de normalidad, se desarrolló un análisis de varianza (Anova) con el cual es posible comparar varias medias muestrales y comprobar matemáticamente las diferencias observadas gráficamente en la sección IV-1. Se parte de la hipótesis de que no existían diferencias entre medias de tratamientos señaladas en (1) y (2):

$$H_0 = \mu_{FS} = \mu_{FM} = \mu_{FI} = \mu \quad (1)$$

$$H_1 = \mu_{FS} \neq \mu_{FM} \neq \mu_{FI} \neq \mu \quad (2)$$

En el Anova se plantearon las siguientes hipótesis (nula y alternativa) para cada una de las canteras de la investigación:

*Hipótesis nula, H0.* Las varianzas son idénticas, es decir, no existe diferencia significativa en la resistencia al ahuellamiento en mezclas asfálticas fabricadas con agregados de cada cantera, en particular, al usar los

límites superior, medio o inferior de la granulometría Invías tipo MDC-19.

*Hipótesis alternativa, Ha.* Al menos una de las varianzas es diferente de otra, es decir, existe diferencia significativa en la resistencia al ahuellamiento en mezclas asfálticas fabricadas con agregados de cada cantera, en particular, al usar los límites superior, medio o inferior de la granulometría Invías tipo MDC-19.

#### 4.4.1. Cantera Samacá

De acuerdo con el análisis de varianza realizado para la cantera Samacá (tabla 8), el *F* calculado es mayor que el *F* teórico; por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula *H0*, se aceptó la hipótesis alternativa *Ha* y se concluyó que los tratamientos presentaron diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 8. Anova en cantera Samacá, nivel de significancia: 5%

Fuente	GDL	Suma de los cuadrados	Media de los cuadrados	F Calculado	F teórico
Modelo	2	0,9265	0,4633	28,9191	9,5521
Error	3	0,0481	0,0160		
Total corregido	5	0,9746			

Fuente: Autores.

#### 4.4.2. Cantera Nobsa

De acuerdo con la tabla 9, el *F* calculado es mayor que el *F* teórico; por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que los tratamientos presentaron diferencias estadísticamente significativas.

**Tabla 9. Anova cantera Nobsa Nivel de significancia 5%**

Fuente	GDL	Suma de los cuadrados	Media de los cuadrados	F Calculado	F teórico
Modelo	2	10,7317	5,3659	44,5307	9,5521
Error	3	0,3615	0,1205		
Total corregido	5	11,0932			

Fuente: Autores.

#### 4.4.3. Cantera Moniquirá

De la prueba de normalidad realizada a los datos de pendiente de deformación (WTS) se identificó que los resultados para la cantera Metrópolis (Moniquirá) no siguen una distribución normal; por tanto, para este tipo de distribuciones se recomienda realizar pruebas no paramétricas como los modelos de Friedman y Kruskal-Wallis, donde se determina el parámetro denominado *p-valor*, el cual se compara con el nivel de significancia de la prueba ( $\alpha = 0,05$ ), y se evalúa si los niveles de tratamiento (granulometría de la mezcla) son idénticos o no.

A partir de los resultados de las pruebas no paramétricas para la cantera de Moniquirá (tabla 10), se descartan las hipótesis nulas de los modelos y se aceptan las hipótesis alternativas. Se concluye que los tratamientos no presentan diferencias estadísticamente significativas.

**Tabla 10. Prueba no paramétrica en cantera Metrópolis (Moniquirá), nivel de significancia: 5%**

	Prueba de Friedman		Prueba de Kruskal-Wallis
Q (valor observado)	4,0000	K	4,5714
Q (valor crítico)	5,9915	p-valor (bilateral)	0,0667
GDL	2	alfa	0,05
p-valor (bilateral)	0,1353		

Interpretación de la prueba:

H0: Los tratamientos son idénticos.  
Ha: Los tratamientos son diferentes.

Como el p-valor calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha = 0,05$ , no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

Interpretación de la prueba:

H0: Las muestras vienen de la misma población.  
Ha: Las muestras no vienen de la misma población.

Como el p-valor calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha = 0,05$ , no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

Fuente: Autores.

## 5. Discusión

La deformación permanente ocurrió como se esperaba: presentó mayor resistencia al ahuellamiento en mezclas con agregados más gruesos, a excepción de la cantera de Moniquirá, que presentó mayor resistencia al ahuellamiento en la zona media de la franja granulométrica.

Para la cantera localizada en el municipio de Samacá (Agregados Santa Lucía) se aprecia que el mayor valor de deformación lo presenta la zona o el límite superior de la franja granulométrica MDC-19, seguido por la zona media de la franja. Por último, los menores valores de deformación lo presenta el límite inferior de la franja, donde los agregados pétreos tienen mayor concentración de gruesos en la mezcla asfáltica.

Para las mezclas preparadas con agregados provenientes de la cantera Nobsa, los valores de deformación máxima se presentaron en el límite inferior. Para estas mezclas con la gradación más fina el ensayo finalizó en el ciclo de carga 2100, 4200 y 5000. La gradación media presenta una tendencia sobre los 18 mm de deformación luego de 10.000 ciclos de carga. Para el límite inferior se alcanzaron deformaciones de 2 a 4 mm.

En el caso de la cantera Metrópolis (Moniquirá) las mezclas fabricadas con la combinación de agregados de la parte media de la franja granulométrica presentan menor deformación permanente, seguido de las mezclas fabricadas con la combinación de agregados de la parte inferior de la franja granulométrica. Las probetas fabricadas con la gradación del límite superior de la franja superaron los 20 mm de deformación entre el ciclo 2900 y 5200, de los 10.000 ciclos que dura el ensayo.

En cuanto a los resultados de la pendiente de deformación presentados en la figura 8 de la sección IV-1, se evidencia que la única mezcla que cumple con esta especificación es la que corresponde a la cantera de agregados Santa Lucía (Samacá), con una pendiente de  $0,048 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$ , correspondiente al límite inferior de la franja granulométrica. Las mezclas restantes superan el valor límite de la especificación ( $0,1 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$ ).

Las curvas de resistencia al ahuellamiento obtenidas siguen la tendencia usual de resultados obtenidos por otros investigadores (Morea, 2011; Golalipour *et al.*, 2012; Ahmed y Attia, 2013). Así, se presenta una primera fase que corresponde a los primeros ciclos de carga, donde se evidencia una mayor pendiente debido al acomodamiento de las partículas y se da un cambio en el volumen de la mezcla. Por su parte, en la segunda fase hay deformaciones permanentes, que son producidas por las propiedades de resistencia del material. En esta

fase, estas tienden a estabilizarse, y se experimentan en la mezcla pocos cambios de volumen. Se hace una excepción a la conclusión en las curvas para el límite superior para las canteras de Moniquirá y Nobsa, que excedieron el valor límite de 20 mm y, por tanto, no siguen la tendencia típica.

Se realizó una consulta de la geología regional, con base en la información disponible de las bases de datos del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas), para identificar las condiciones geológicas y geomorfológicas del sitio de estudio, como también para determinar la distribución espacial de las diferentes formaciones, depósitos o materiales existentes en las áreas de las canteras.

De acuerdo con la consulta de información secundaria de la clasificación geológica de los estratos (petrografía) de material de cada cantera (caliza para la cantera Nobsa, arenisca para la cantera Samacá y pizarra o *shale* para la cantera de Moniquirá), se realizó una comparación preliminar con los resultados de las curvas de deformación permanente. Se identificó que los agregados de bancos de arenisca presentan mejor desempeño en la resistencia al ahuellamiento, seguido de los agregados provenientes de estratos de roca caliza. Los agregados provenientes de *shales* presentaron un bajo desempeño en esta resistencia, lo cual se aprecia en las curvas de deformación permanente de la cantera de Moniquirá, con los valores más altos de pendiente de deformación. Esto se comprueba con el análisis de varianza para esta cantera.

## 6. Conclusiones

Las conclusiones que se presentan a continuación se centran en las curvas de deformación obtenidas para cada cantera de materiales pétreos estudiada:

- Con el ensayo de ahuellamiento se obtuvieron las curvas de deformación plástica por cantera de

materiales y por zona de la franja granulométrica. Presentaron mayores deformaciones las mezclas fabricadas con la cantera de Nobsa, seguidas por las canteras de Moniquirá y Samacá.

- La profundidad de la huella de las diferentes mezclas asfálticas en general no superaron el valor límite de 20 mm de deformación, excepto por las fabricadas con la granulometría del límite superior para las canteras de Moniquirá y Nobsa.
- Con la variación de la granulometría en las mezclas asfálticas de las canteras de Samacá y Nobsa se comprobó, mediante un análisis de varianza, que existen diferencias estadísticamente significativas en los resultados de pendiente de deformación.
- A partir de las curvas de deformación se observó que las mezclas fabricadas con combinación de agregados del límite inferior de la franja granulométrica presentan mayor resistencia a la deformación plástica que los agregados con gradaciones del límite superior, para el caso de las canteras de Nobsa y Samacá.
- A partir de las pruebas de hipótesis realizadas a los tratamientos de la cantera de Moniquirá, se concluyó que los resultados de ahuellamiento para esta no presentaban diferencias significativas con la variación de la granulometría. Con cualquier granulometría ceñida a la banda MDC-19 para esta cantera, los valores de ahuellamiento exceden los límites para una mezcla estable y que responda a las sollicitaciones de carga para el periodo de diseño.
- La pendiente de deformación se estableció en un valor límite de  $0,1 \text{ m} / 10^3$  ciclos de carga, de acuerdo con las especificaciones para este ensayo. Para ello se observó que solamente las mezclas fabricadas con los agregados del límite inferior de la franja granulométrica de la cantera de Samacá cumplen con esta especificación.
- A continuación se indican las recomendaciones del estudio a partir de los resultados obtenidos:
- En el diseño de mezclas asfálticas en caliente tipo MDC-19 con agregados de la región de Tunja para reducir las deformaciones permanentes, se recomienda utilizar una combinación de agregados cercanos al límite inferior de la franja granulométrica, ya que según esta investigación, presentaron un mejor comportamiento frente al ahuellamiento, en términos de menor pendiente de deformación.
- Se recomienda la continuación del estudio teniendo en cuenta el efecto de la temperatura en la resistencia al ahuellamiento en mezclas asfálticas para la región de Tunja, ya que la temperatura de referencia del estudio (  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  ) difícilmente se alcanza en este sector. Tal temperatura sí tiene un efecto significativo en la resistencia al ahuellamiento, más aún cuando se determina esta propiedad en un ensayo que tiene una duración de 6 horas expuesto a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura.
- Asimismo, se recomienda el estudio de mezclas asfálticas con un asfalto diferente al de grado de penetración 60-70, para evaluar la resistencia al ahuellamiento en la región de Tunja y determinar el efecto de un cemento asfáltico con viscosidad mayor o menor.
- Se plantea evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas en la respuesta al ahuellamiento fabricadas con las granulometrías especificadas en el método Superpave, dado que está constituido por lineamientos y ensayos que se consideran más

representativos de las condiciones reales de las mezclas asfálticas.

## Referencias

- Ahmed, M. A. y Attia, M. (2013). Impact of aggregate gradation and type on hot mix asphalt rutting in Egypt. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3(4), 2249-2258.
- Angelome, S. y Martínez, F. (2006). *Deformación permanente de mezclas asfálticas*. Santa Fe: Universidad Nacional de Rosario.
- Aranda, J. E. y Prieto, J. A. (2014). *Caracterización de mezclas asfálticas semidensas con agregados de la región de Tunja* (trabajo de grado). Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Caro Spinel, S., Coral Triviño, L. y Caicedo Hormaza, B. (2003). Modelación del ahuellamiento en mezclas asfálticas de pavimentos. *Revista de Ingeniería*, 18, 41-47.
- Comité Europeo de Normlización (CEN) (2008). *Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 22: Ensayo de rodadura*. Autotor.
- Chun, S., Lee, H. S., Greene, J., Upshaw, P., y Choubane, B. (2013). *Effect of segregation on coarse aggregate structure and rutting potential of asphalt mixtures* (D. o. Transportation, Trans.). Florida State Materials Office.
- Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., Afsharikia, Z. y Khadem, M. (2012). Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53(0), 440-449. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.895>
- Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013a). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá: Autor.
- Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013b). *Normas de Ensayo para Carreteras*. Bogotá: Autor.
- Iskender, E. (2013). Rutting evaluation of stone mastic asphalt for basalt and basalt–limestone aggregate combinations. *Composites Part B: Engineering*, 54(0), 255-264. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.019>
- Morea, F. (2011). *Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
- Prowell, B. D., Jingna, Z. y Brown, E. R. (2005). *Aggregate properties and the performance of superpave-designed hot mix asphalt* (report 539). Washington, D.C.: NCHRP.
- Reyes Ortiz, O. J. y Camacho Tauta, J. (2008). Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas. *Ingeniería y Desarrollo*, 23, 26-48.
- Sánchez Leal, F. J. (2009). *RAMCODES, metodología de análisis y diseño de geomateriales compactados. Manual de aplicación*. Venezuela: Solestudios, C.A., Ingeniería de Consulta.
- Topal, A. y Sengoz, B. (2004). *Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt*. Izmir, Turquía: Dokuz Eylul University, .
- Tung-Wen, H., Wen-Kai, Y. y Jian-Xun, W. (2013). Mechanical Characterization of Superpave Gradation between Passing through and below Restriction Zone. *International Journal of Pavement Research & Technology*, 6(5), 539-546. Doi: [10.6135/ijprt.org.tw/2013.6\(5\).539](http://dx.doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(5).539)
- Xiao, F., Herndon, D. A., Amirghanian, S. y He, L. (2015). Aggregate gradations on moisture and rutting resistances of open graded friction course mixtures. *Construction and Building Materials*, 85, 127-135. Doi: [10.1016/j.conbuildmat.2015.03.095](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.095)