

Análisis y caracterización de una mezcla asfáltica, obtenida con mecanismos diferentes de compactación, a través de la técnica de tomografía computarizada CT.

Analysis and characterization of an asphalt mixture obtained by different mechanisms through the technique of computed tomography ct

Fecha de Recepción Artículo: JUNIO 11 DE 2015

Fecha de Aceptación Artículo: JULIO 10 DE 2015

VANESSA SENIOR

Estudiante Doctorado en Ingeniería Civil
Universidad Nacional de Colombia
Medellín - Colombia
vseniora@unal.edu.co

CARLOS GRACIANO

Profesor Asociado,
PhD en Ingeniería Estructural
Universidad Nacional de Colombia
Medellín - Colombia

CARLOS A. VEGA-POSADA

Profesor Asistente
Departamento de Ing. Civil y Ambiental
Universidad de Antioquia
Medellín - Colombia

ADRIANA LAMMARDO

Grupo de Investigación Biomecánica
Universidad Simón Bolívar
Caracas, Venezuela



Este artículo presenta un estudio experimental sobre la compactación de una mezcla asfáltica caliente a través del estudio de imágenes obtenidas mediante tomografía computarizada de rayos X (TC). La mezcla asfáltica atiende las especificaciones de la FAA P-401 (*Federal Aviation Administration*); la cual ha sido producida con un cemento asfáltico normalizado AC 20 con agregados pétreos propios de la región del Valle de Aburrá y del occidente antioqueño. Las briquetas se elaboraron bajo la metodología Marshall, empleando una fórmula de trabajo con un contenido óptimo de asfalto de 5,9 %.

La investigación realizada se aborda desde los enfoques experimental y micromecánico y pretende satisfacer la premisa de que una mezcla asfáltica compactada en laboratorio, con la energía de compactación que le confiere la masa del martillo, el número de golpes, la temperatura de compactación y empleando el mecanismo de impacto; exhibe unas características de acomodamiento de partículas, patrones de permeabilidad, porosidad y densidad diferentes si se le compara con una mezcla asfáltica producida con los mismos materiales pétreos y cemento asfáltico, que ha sido compactada bajo las condiciones de intemperismo propias de la región, con equipos vibratorios y neumáticos, cada uno de ellos con un peso respectivo y un control de la temperatura de compactación disímiles a las que ofrecen las condiciones del laboratorio.

La fase de evaluación de la investigación, inicia con la caracterización de las muestras por el comportamiento de su interfaz asfalto-agregado. Esto se logra, empleando la técnica de tomografía computarizada de rayos X sobre especímenes que han sido compactados en el laboratorio y núcleos obtenidos directamente del sitio de colocación de la mezcla. Empleando un software especializado, se logra la reconstrucción de los cortes en un sólido que permite la evaluación de los parámetros de la microestructura de la mezcla asfáltica para ambas técnicas de compactación. La técnica de imágenes diagnósticas por tomografía computarizada de rayos X se viene implementando desde hace cuatro décadas para el análisis de materiales en varias disciplinas de investigación tales como la paleontología, petrología, geotecnia, entre otros. Otros estudios a escala real realizados sobre mezclas asfálticas de gradación abierta, emplearon TC de rayos X, antes y después de que la mezcla asfáltica estuviera en servicio con solicitaciones de tráfico determinadas.

Palabras clave: Ingeniería de pavimentos, tomografía computarizada, mezcla asfáltica, mecanismo de compactación, pavimentos flexibles.

This article presents an experimental investigation on the compaction of hot asphalt mixture through the study of images obtained by X-ray computed tomography (X-ray CT). The asphalt mix complies asphalt specification P-401 FAA (Federal Aviation Administration); which they have been produced with a standard AC 20 asphalt cement and stone aggregates own the Aburrá Valley region and western Antioquia. The samples were produced under the Marshall method using a compacting temperature thereof in the range of 136 °C to 141 °C. A job formula was obtained with an optimum asphalt content of 5,9 %.

The research is conducted using experimental and micromechanical approaches, aims to satisfy the premise that an asphalt mixture compacted in the laboratory, with the compaction energy that gives the mass of the hammer, the number of strokes, the compaction temperature and using the impact mechanism; exhibits characteristics of particles

accommodation, permeability and porosity patterns and density different; if they are compared with an asphalt mixture produced with the same stone aggregates and asphalt cement, which has been compacted under the weathering conditions of the region, vibratory and pneumatic equipment, each with a respective weight and a temperature control dissimilar to compaction provided in the laboratory environment.

The assessment of research begins with the characterization of the samples through the behavior of the asphalt-aggregate interface. This is accomplished using computed tomography X-ray technique on specimens which were compacted in the laboratory and cores obtained directly from the field of placement of the mixture. Using specialized software, reconstruction of the slices is achieved in a solid which allows the evaluation of the parameters of the microstructure of the asphalt mix for both compaction techniques. The technique of diagnostic imaging X-ray CT has been implemented since four decades for the analysis of materials research in various disciplines such as paleontology, petrology, geotechnics, among other causes; according to which states. Other research projects were conducted on full-scale open graded asphalt mixtures, X-ray CT used before and after the asphalt were operated with specific traffic requests.

Keywords: Pavement engineering, computed tomography, asphalt mixes, compaction mechanism, asphalt pavements.

Introducción

Las metodologías de diseño para el pre-dimensionamiento de estructuras de pavimento flexible han recorrido un largo camino, desde el enfoque exclusivamente empírico hasta el empleo de programas computacionales robustos acompañados de modelos de predicción del comportamiento de los materiales; siendo estos últimos capaces de determinar con una menor incertidumbre el deterioro en el tiempo de la estructura. Esa línea de tiempo ha permitido que algunas técnicas, procedimientos y/o mecanismos pertenecientes a otras disciplinas, desempeñen un papel transversal a la hora de comprender el fenómeno de deterioro de cada una de las capas que constituyen la estructura de pavimento flexible.

Los pavimentos flexibles son estructuras compuestas por capas de materiales no tratados (base y sub - base granulares) y una capa asfáltica dispuestas en forma relativamente horizontal, apoyadas finalmente sobre una subrasante; cuya función principal radica en brindar una superficie de rodamiento segura y confortable para los vehículos livianos y pesados.

Una de sus principales características es que al poseer mejores materiales en las capas superiores, la disipación de los esfuerzos generados por las cargas de servicio sobre la superficie de rodamiento o rasante, se realiza en forma paulatina desde la carpeta asfáltica hasta alcanzar la sub-rasante.

Dentro de los factores que intervienen en el comportamiento de las mezclas asfálticas, una propiedad fundamental es su porcentaje de vacíos; este afecta la densidad asociada a un tipo de mezcla en particular. Un pavimento que no se haya compactado correctamente durante la construcción, presentará huellas o surcos a causa de la canalización del tráfico. Adicionalmente, la cantidad de vacíos presente debe ser la adecuada, con el fin de evitar exudación del asfalto o película de material bituminoso en la superficie del pavimento que crea una superficie brillante y muy lisa y para no permitir su inestabilidad debido a la reducción del contenido de vacíos causada por el tránsito vehicular y por la expansión térmica del asfalto.

Los procesos de carga, descarga y recarga que sufre la estructura, los cuales son el reflejo del patrón de velocidad y circulación del tránsito urbano de vehículos con magnitud, tipo y configuración de ejes diferentes, y las condiciones de intemperismo, en ocasiones, críticas; permiten desarrollar al interior de las capas granulares y asfálticas un microdaño (microfisuras) que sólo cobra importancia cuando es notorio en la rasante a través de deterioros tales como: pieles de cocodrilo (fatiga), ahuellamientos (deformación permanente), fisuras longitudinales y transversales por temperatura; principalmente [1].

Sin embargo, este tipo de estructuras, adquieren un tratamiento especial en lo relacionado con las propiedades de cada uno de los componentes de las capas granulares y asfálticas (asfalto y agregados pétreos); al tratarse de una superficie que servirá para la circulación, decolaje y aterrizaje de las aeronaves en las terminales aeroportuarias.

Consideraciones especiales tales como la magnitud de las cargas de las aeronaves, geometría de su tren de aterrizaje, volumen esperado de tránsito y características de los suelos de subrasante, los materiales

con que se construye la estructura; son tomadas en cuenta para el pre-dimensionamiento de los espesores de la estructura de pavimento flexible.

La normatividad que rige y vela por el diseño y caracterización de los materiales, para estas condiciones particulares, es la FAA P-401/P-403 (*Federal Aviation Administration*) [2].

En forma transversal, desde el descubrimiento de un nuevo tipo de radiación por Wilhelm Röntgen, los rayos X han sido usados masivamente en varios campos de investigación: petrología, geotecnia, petrografía; entre otros [3]. Los pavimentos pertenecientes a la disciplina de la geotecnia, no han sido ajenos a su implementación para apoyar áreas de su estudio, que desde hace algunos años e incluso en la actualidad continúan siendo dejados en manos de correlaciones empíricas. La tomografía computarizada de rayos X, como técnica no destructiva, ha permitido una eficiente caracterización de la estructura interna de las mezclas asfálticas en materia de: fabricación de especímenes de laboratorio, comparación de mezclas compactadas en campo y en laboratorio, comparación entre mezclas asfálticas en caliente y mezclas tibias, efectos de aditivos, temperatura y compactación, contacto agregado -agregado y la relación entre la estructura interna y el desempeño y aplicaciones de modelación [4].

En este trabajo se realiza una comparación del efecto que producen las técnicas de compactación: impacto y el efecto combinado de los mecanismos vibración-presión estática-amasado (compactador de llantas) sobre la microestructura de mezclas asfálticas caliente empleando la técnica de tomografía computarizada (TC). En primer lugar, se elaboran probetas bajo condiciones de laboratorio, posteriormente se toman núcleos en campo de la misma mezcla. Tanto a las probetas de laboratorio como los núcleos se les realiza un barrido por TC. Posteriormente, usando un software especializado se reconstruyen los cortes obtenidos en el procedimiento TC en sólidos que permiten el estudio de las propiedades internas. Finalmente, los resultados son comparados en términos de la compactación de la mezcla asfáltica, evaluando el acomodamiento de los componentes pétreos y la correspondiente interconexión con los vacíos de aire.

18 Materiales y métodos

Los materiales (agregados pétreos y asfalto tipo AC-20) fueron suministrados por la Compañía Procopal S.A. [5]. De la misma forma, la caracterización de las principales propiedades para el agregado grueso, fino, llenante mineral y de cemento asfáltico.

Las tablas 1 a 3 muestran la caracterización para los materiales pétreos y asfálticos, la distribución granulométrica conforme a la gradación 3 de la FAA P/401/P-403 y las propiedades de la mezcla asfáltica diseñada, con su respectiva norma de ensayo [7-14]; se presentan a continuación:

Tabla 1.

Caracterización del agregado grueso

Ensayo	Norma de ensayo	Resultados	Especificación FAA P-401/P-403
Gravedad específica	ASTM C 127-07	2,702	-
Gravedad específica S.S.S.*		2,742	-
Gravedad específica aparente		2,815	-
% Absorción		1,49	-
Desgaste en la máquina de los Ángeles	ASTM C 131-06	15%	≤ 40 %
Solidez en sulfato de magnesio	ASTM C 88-05	2%	≤ 18 %
Partículas planas y alargadas (Relación 5:1)	ASTM D 4791-10	2,90%	≤ 8 %
Caras fracturadas	ASTM D 5821-01	Una cara: 88 % Dos caras: 79 %	Una cara ≥ 85 % Dos caras ≥ 75 %
Terrones de arcilla y partículas deleznales (friables)	ASTM C 142-10	0,44%	≤ 1 %

*Saturado con superficie seca

Tabla 2.

Caracterización del agregado fino

Ensayo	Norma de ensayo	Resultados	Especificación FAA P-401
Gravedad específica	ASTM C 127-07	2,661	-
Gravedad específica S.S.S.		2,713	-
Gravedad específica aparente		2,807	-
% Absorción		1,96	-
Solidez en sulfato de magnesio	ASTM C 88-05	9,8 %	≤ 15 %
Terrones de arcilla y partículas deleznales (friables)	ASTM C 142-10	1,00%	≤ 1 %
Índice de plasticidad	ASTM D 4318-10	NP	≤ 6 %
Equivalente de arena	ASTM D 2419-09	51%	≥ 45 %
Gravedad específica del llenante mineral	ASTM D 854-10	2,745	-

Tabla 3.

Gradación de diseño. Mezcla asfáltica en caliente tipo FAA P-401/P403 - Gradación 3.

Abertura del tamiz (in.)	Abertura del tamiz (mm)	% que pasa		
		FAA P-401/P-403 Límite inferior	FAA P-401/P-403 Límite superior	Gradación de diseño
1"	25	100	100	100
3/4"	19	100	100	100
1/2"	12	100	100	100
3/8"	9	79	99	98
No. 4	4,75	58	78	63
No. 8	2,36	39	59	45
No. 16	1,18	26	46	34
No. 30	0,600	19	35	24
No. 50	0,300	12	24	15
No. 100	0,150	7	17	9
No. 200	0,075	3	6	5,1

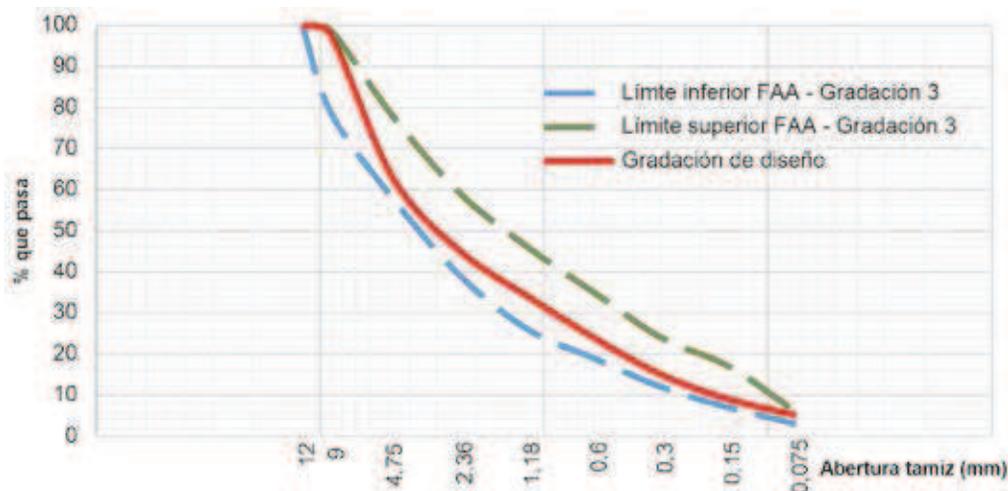


Figura 1.

Gradación de diseño para una mezcla asfáltica en caliente tipo FAA P-401/P-403 con asfalto AC-20

La *Tabla 3*. Gradación de diseño. *Mezcla asfáltica en caliente tipo FAA P-401/P-403 - Gradación 3*, describe las principales propiedades de la mezcla asfáltica empleada para la elaboración de las briquetas en el laboratorio que es la misma colocada y compactada en las instalaciones del aeropuerto José María Córdova en la ciudad de Medellín; cuyos núcleos fueron extraídos para chequeos rutinarios de densidad y son empleados para este estudio.

La *Tabla 4*. *Caracterización del cemento asfáltico Tipo AC-20* presenta la caracterización del cemento asfáltico en sus principales propiedades, las cuales determinan su comportamiento como ligante bituminoso dentro de la mezcla asfáltica [16-21]. Adicionalmente, las temperaturas de producción y compactación dependen de la viscosidad del cemento asfáltico [15].

Tabla 4.

Caracterización del cemento asfáltico Tipo AC-20

Propiedad	Norma de ensayo	Reporte de control de calidad
Penetración a 25 °C	ASTM D 5	63
Punto de ablandamiento, (°C)	ASTM D 36	49,8
Índice de penetración (IP)	NLT 181/99	-0,71
Viscosidad Brookfield a 60 °C	ASTM D 4402	2200
Viscosidad Brookfield a 135 °C	ASTM D 4402	3,5
Viscosidad Brookfield a 165 °C	ASTM D 4402	N.A.
Ductilidad a 25 °C	ASTM D 113	136,5
Peso específico a 25 °C	ASTM D 70	1,011
Punto de chispa (°C)	ASTM D 92	300
Solubilidad en tricloroeteno (%)	ASTM D 2042	99,47
Contenido de agua (%)	ASTM D 95	0
Pérdida por calentamiento película delgada en movimiento a 163 °C	ASTM D 2872	0,37
Penetración del residuo después de la pérdida por calentamiento (% de la penetración original)	ASTM D 5	60,3
Incremento en el punto de ablandamiento después de pérdida por calentamiento en película delgada (°C)	ASTM D 36	5,8
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades Brookfield (60 °C) del asfalto residual y el asfalto original	ASTM D 4402	3,1

20 Descripción de las muestras y procedimiento

El muestreo para el estudio consiste, en primer lugar, de 3 briquetas de una mezcla asfáltica tipo FAA P- 401/ P-403 con un contenido óptimo de asfalto de 5,9 % y una distribución granulométrica que satisface la gradación 3 de la misma especificación, preparadas y compactadas en el laboratorio bajo la metodología Marshall. Los moldes cilíndricos para la elaboración de los especímenes de laboratorio tenían un diámetro interior de 101,6 mm (4 in) y una altura interna de 63,5 mm (2 ½ in). La energía de compactación por impacto es proveída por el método Marshall y consiste básicamente en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98,4 mm (3-7/8 in) de diámetro y un pisón deslizante de 4.536 ± 9 g ($10 \pm 0,02$ lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de $457,2 \pm 1,524$ mm ($18 \pm 0,06$ in), que golpea sobre la mezcla confinada en el molde 75 veces por cada cara de la briqueta, a una temperatura que depende de la viscosidad del cemento asfáltico [15].

En segundo lugar, 3 núcleos extraídos in-situ correspondientes al mismo tipo de mezcla FAA P-401/P-403, que fue instalada en el aeropuerto internacional José María Córdova de la ciudad de Medellín. Esta mezcla fue colocada con la energía de compactación que le provee un equipo que emplea la combinación de los mecanismos: vibración-presión estática-amasado (compactador de llantas), con un peso

superior a 9 toneladas y que depende directamente del número de pasadas del mismo y del espesor de la capa asfáltica.

Las seis muestras de ensayo, fueron sometidas a radiación electromagnética mediante tomografía computarizada de rayos X. Este procedimiento fue realizado en el tomógrafo Biograph mCT Definition AS 64 marca Siemens del Hospital Pablo Tobón Uribe de la ciudad de Medellín. Se realizaron cortes de 0,6 mm de espesor sobre los especímenes en dirección transversal a su diámetro. Posteriormente, mediante software especializado, se logró la reconstrucción de los cortes en un sólido 3D, siendo posible la identificación de los tres dominios presentes en la muestra: agregados pétreos, vacíos con aire y mástico (llenante mineral y cemento asfáltico), los cuales pueden visualizarse en el capítulo correspondiente de resultados y discusión.

Descripción de los mecanismos de compactación

El objetivo principal de la compactación en las capas asfálticas es la reducción de los vacíos con aire de la mezcla para aumentar su densidad, de tal manera que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a lo largo de la vida útil de la obra. Las propiedades requeridas pueden variar de caso a caso, pero la resistencia, la compresibilidad y una adecuada relación esfuerzo-deformación figuran entre aquellas cuyo mejoramiento se busca siempre.

Tabla 5.

Equipos y características de los mecanismos de compactación.

Equipo	Mecanismo	Características	Principales aplicaciones	Desventajas
Cilindros con rueda metálica	Presión estática	El proceso de compactación se realiza al apretar el material de arriba hacia abajo y ejercer una presión estática, básicamente.	Acabado de capas asfálticas	Operación lenta
Compactadores de llantas	Amasado y presión estática	El proceso de compactación combina la acción de amasado con presión estática que se aplica de arriba hacia abajo, lo cual hace que el mejor efecto de la compactación se logre en la superficie.	Suelos finos no cohesivos (limos) Suelos granulares limosos Pavimentos asfálticos	No es posible compactar capas de espesor mayor de 10 o 20 cm. Esta condición está sujeta a la especificación y al peso del equipo
Cilindros "pata de cabra"	Presión estática	La acción del rodillo con los vástagos hace progresivo el proceso de compactación de la capa de suelo de abajo hacia arriba; lo que permite que la mayor presión se ejerza en el lecho inferior de la capa por compactar.	Suelos arcillosos (arcilla)	Se requiere un compactador de llantas para dar un mejor acabado, por el material que queda suelto en la superficie
Vibrocompactadores	Vibración y presión estática o amasado	Con el movimiento vibratorio se produce una orientación de las partículas en el momento en que tienden a separarse y una fuga de las partículas más finas hacia los huecos que quedan entre las partículas más grandes.	Suelos granulares limosos Suelos granulares muy puros	Si el suelo posee una cantidad apreciable de finos, la compactación por vibración puede dificultarse.
Compactadores de impacto	Impacto	Conviene destacar que el ensayo Proctor, es un ensayo de impacto; por consiguiente, es una base válida cuando se compacta por impacto en el terreno [22].	Todos los tipos de suelo	-

Los equipos usados en compactación aplican su energía mediante cualquiera de las cuatro formas que se enumeran a continuación:

- Presión estática
- Amasado
- Vibración (frecuencia y amplitud de onda)
- Impacto
- Mixtos

Se entiende por energía específica de compactación a la energía que entrega el equipo al suelo por unidad de volumen. En los procesos de colocación de la mezcla asfáltica *in-situ*, la energía de compactación depende principalmente de la presión y el área de contacto entre el rodillo y la capa, de su espesor y del número de pasadas del equipo.

Resultados y discusión

En primer lugar, se realizó el proceso de reconstrucción de los sólidos 3D a partir de 1016 elementos o cortes para las 6 muestras ensayadas, siendo posible definir el rango de densidad en unidades *Hounsfield* para los tres dominios. Para los agregados pétreos, valores entre 2053 y 3071 HU, para el *mástic* (llenante mineral y cemento asfáltico), valores entre 1254 y 2053 HU y para los vacíos con aire valores entre -143 y 1254 HU. La escala de unidades *Hounsfield* (símbolo HU del inglés "Hounsfield Units") es el resultado de la transformación de la escala de coeficientes de atenuación lineal de rayos X en una nueva

escala en la cual el valor de atenuación del agua destilada en condiciones normales de presión y temperatura, se define como 0 unidades de Hounsfield (HU), mientras que la radiodensidad del aire en condiciones normales de presión y temperatura se define como -1000 HU, extendiéndose más allá de las 1000 HU asignadas al nivel de absorción del hueso compacto.

Adicionalmente, considerando el objetivo de la investigación, fue posible evidenciar que sí existe una diferencia significativa para los parámetros de porosidad y permeabilidad o conductividad hidráulica para mezclas asfálticas que han sido compactadas a través de diferentes mecanismos; para el caso en particular, impacto y acción combinada de vibración-presión estática-amasado (compactador de llantas).

Esta diferencia puede evidenciarse, principalmente, en los dominios aire y mástic, cuya presencia es mayor para mezclas asfálticas que fueron compactadas *in-situ*, empleando un mecanismo combinado de vibración- presión estática-amasado (compactador de llantas). Esta diferencia puede apreciarse claramente en las *Figura 2. (a) Núcleos extraídos de la mezcla asfáltica tipo FAA P-401/P-403. (b) Caracterización de los dominios aire y mástic en software especializado. (c) Caracterización de los tres dominios: esqueleto mineral (verde), aire y mástic (azul y Figura 3. (a) Briquetas preparadas en el laboratorio con la mezcla asfáltica tipo FAA P-401/P-403. (b) Caracterización de los dominios aire y mástic en software especializado. (c) Caracterización de los tres dominios: esqueleto mineral (verde), aire y mástic (amarillo).*

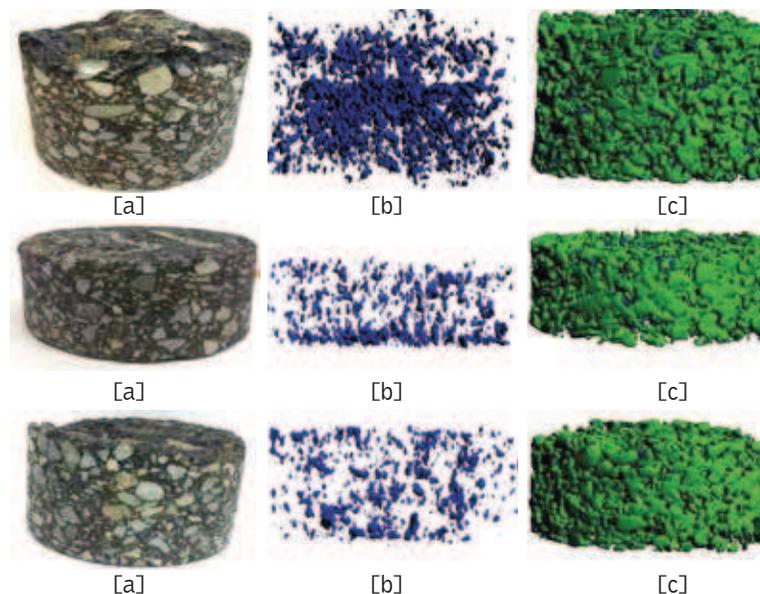


Figura 2.

(a) Núcleos extraídos de la mezcla asfáltica tipo FAA P-401/P-403. (b) Caracterización de los dominios aire y mástic en software especializado. (c) Caracterización de los tres dominios; esqueleto mineral (verde), aire y mástic (azul).

Inicialmente, podría afirmarse que el dominio de mástic, ejerce un peso significativo sobre la valoración del parámetro de porosidad. Sin embargo, ésta teoría se descarta, pues las mezclas corresponden a un mismo lote; es decir, se trata de un muestreo realizado de una mezcla asfáltica que fue producida el mismo día y en la misma bachada, de la cual se prepararon briquetas tipo Marshall y se compactó *in-situ*.

De la comparación de ambos mecanismos, se determina un grado de compactación a partir de las densidades teórica (medida en laboratorio) y práctica (medida *in-*

situ). El cociente entre estas dos densidades determina el grado de compactación o el valor de ajuste de la densidad obtenida *in-situ* con respecto a la máxima acomodación de la mezcla en términos de masa por unidad de volumen.

El procedimiento para corroborar la densidad *in-situ* posee una parte experimental en laboratorio, en la que a través de pesos sumergidos es posible determinar la relación de vacíos y su influencia en la densidad. Sin embargo, este procedimiento está asociado con el tiempo en que permanecen sumergidos los especímenes para saturar los vacíos con aire. Por demás, un procedimiento indirecto.

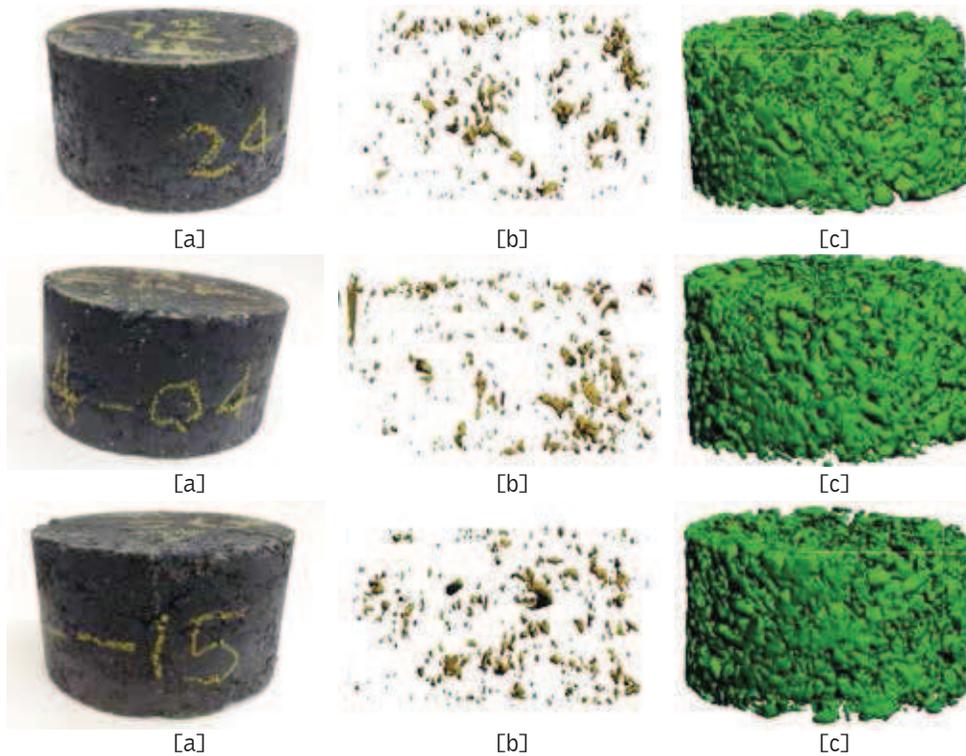


Figura 3.

(a) Briquetas preparadas en el laboratorio con la mezcla asfáltica tipo FAA P-401/P-403.

(b) Caracterización de los dominios aire y mástic en software especializado. (c) Caracterización de los tres dominios; esqueleto mineral (verde), aire y mástic (amarillo).

Técnicamente y mediante procedimiento con menor incertidumbre en su ejecución no es posible corroborar el grado de compactación de una mezcla asfáltica; mucho más si la base de comparación es a partir de un mecanismo que produce menor cantidad de vacíos con aire, pues queda demostrado que la energía de compactación que provee el mecanismo de impacto es más alta que aquella que provee la acción combinada de presión estática-amasado (compactador de llantas) y vibración.

El procedimiento realizado con la tomografía computarizada de rayos X, permite ver que la

compactación en laboratorio es mucho más efectiva en términos de reducción de vacíos con aire, logrando una mayor densidad. Lo que ocurre al compactar en la obra es que la reducción de la temperatura de la mezcla en un período de tiempo tan corto, no permite que el *mástic* haga un mejor trabajo reacomodándose en los intersticios dejados por el material pétreo de mayor tamaño. Adicionalmente, los moldes cilíndricos y herméticos para preparar las briquetas en el laboratorio ayudan a que sea muy poca la cantidad de aire que ingresa a la mezcla, situación que no ocurre al momento de compactar las mezclas en la obra.

Otro aspecto que merece la pena destacar es la pérdida de temperatura de la mezcla, cuando se compacta en obra, que depende del espesor de la capa asfáltica. La situación es más crítica cuando se trata de espesores bajos (capas de nivelación). Otra razón por la cual, no es comparable la relación que se establece entre ambos mecanismos de compactación.

Conclusiones y recomendaciones

- Las técnicas de compactación empleadas para obtener las respectivas densidades de la mezcla asfáltica en el laboratorio e *in-situ*, permiten la formación de un patrón de acomodamiento de la matriz granular-*mástic* que depende directamente del mecanismo y de la temperatura de compactación empleados.
- La tomografía computarizada de rayos X, para visualización de la microestructura de las mezclas asfálticas, permite, como técnica no destructiva, un análisis cualitativo que permite visualizar, entre otros aspectos, que la comparación de densidades obtenidas en campo y en laboratorio dista considerablemente una de la otra, en el dominio de vacíos con aire.
- Sin duda alguna, el esqueleto granular le confiere a la mezcla asfáltica la rigidez requerida y aporta un valor significativo para aumentar la masa por unidad de volumen. Sin embargo, para la evaluación de % vacíos con aire en la medición de importantes parámetros como la permeabilidad o el coeficiente de conductividad hidráulico, los ensayos realizados a nivel de laboratorio para determinar este parámetro; no permiten estimar la interconexión real de las oquedades, la eficiencia de la mezcla para permitir el paso de agua a su través, para un caso especial de mezclas asfálticas drenantes.
- Un factor que es de vital importancia para garantizar la densidad de la mezcla, es la temperatura a la cual se realiza la compactación. El rango adecuado, es función directa de la viscosidad del cemento asfáltico [23].
- Los diferentes mecanismos de compactación: estático (mecanismo empleado en el laboratorio) y dinámico (equipos amasado (compactador de llantas) y vibratorio *in-situ*) le confieren a la mezcla asfáltica propiedades inherentes de densidad y % vacíos con aire. Sin duda alguna, la magnitud de las anteriores depende del número de pasadas del equipo que ejerza las funciones de compactación, del equipo propiamente (frecuencia y amplitud

de la onda), de las condiciones ambientales y del espesor de la carpeta asfáltica.

- Un factor que sin duda contribuye a lograr patrones muy diferentes de permeabilidad en mezclas compactadas en campo y en laboratorio; es que para la primera situación ocurren inevitables pérdidas de temperatura. La primera ocurre en la etapa de transporte de la mezcla asfáltica al sitio de colocación, una segunda en el momento de trasladarla desde el volcá a la finisher y finalmente en su extensión.

Agradecimientos

La realización de esta investigación ha sido posible gracias al apoyo que brindaron la Compañía Procopal S.A., con sede principal en el Municipio de Girardota, Antioquia, con el suministro de briquetas tipo Marshall de la mezcla asfáltica con especificaciones de la FAA P-401/P-403 y núcleos extraídos con las mismas especificaciones *in-situ*, además de la caracterización de las principales propiedades de agregados pétreos (grueso y fino), asfalto y mezclas asfálticas en caliente. Además agradecemos al Hospital Pablo Tobón Uribe y su centro de Investigación por ofrecer su recurso humano, técnico y de equipos para la realización de las tomografías computarizadas sobre las muestras de ensayo.

Referencias

- [1]. Y. H. Huang, "Pavement performance," in *Pavement Analysis and Design*, Pearson Pr., Upper Saddle River, New Jersey, 2004, p. 775.
- [2]. F. A. Administration and U. S. D. of Transportation, FAA-AC_150-5370-10G AERONAUTICA Standards for Specifying Construction of Airports. United States, 2014.
- [3]. V. Cnudde and M. N. Boone, "High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications," *Earth-Science Rev.*, vol. 123, pp. 1–17, 2013.
- [4]. A. E. Alvarez-lugo and J. S. Carvajal-muñoz, "Practical lessons learnt from the application of X-ray computed tomography to evaluate the internal structure of asphalt mixtures Lecciones prácticas aprendidas a partir de la aplicación de la tomografía computarizada de rayos-x para evaluar la estructura," vol. 81, no. 188, pp. 52–59, 2014.
- [5]. "Procopal S.A. Ingenieros Contratistas." [Online]. Available: <http://www.procopal.com/Sitio/index.asp>.
- [6]. ASTM C 127-07, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate," Test, pp. 1–6, 2007.
- [7]. ASTM C 131-03, "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine," Annu. B. ASTM Stand., p. 4, 2003.

- [8]. ASTM C 88-05, "Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate," Annu. B. ASTM Stand., vol. i, pp. 1-5, 2005.
- [9]. ASTM D 4791, "Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate," pp. 6-11, 2011.
- [10]. ASTM D5821, "Standard Test Method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate," vol. 64, no. Reapproved, pp. 3-5, 1996.
- [11]. ASTM C 142/C142M-10, "Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates," vol. 97, no. Reapproved, pp. 1-2, 2004.
- [12]. ASTM D 4318, "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils," Report, vol. 04, pp. 1-14, 2005.
- [13]. ASTM D 2419-09, "Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate," Annu. B. ASTM Stand., pp. 1-9, 2009.
- [14]. ASTM D 854-10, "Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer," Annu. B. ASTM Stand., pp. 1-8, 2010.
- [15]. ASTM D 6927-15, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures, vol. i. United States, 2010, pp. 1-7.
- [16]. ASTM D 5, "Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials," pp. 5-8, 2013.
- [17]. ASTM D 36, "Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)," vol. 95, no. Reapproved, pp. 8-11, 2000.
- [18]. ASTM D 4402, "Standard Test Method for Measuring the Viscosity of Mold Powders Above Their Melting Point Using a Rotational Viscometer," Control, vol. 94, no. Reapproved, pp. 5-7, 1999.
- [19]. ASTM D 113-07, "Standard Test Method for Ductility of bituminous materials," vol. 03, pp. 6-8, 2002. [20]
- [20]. ASTM D 70, "Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer)," pp. 1-4, 2014.
- [21]. ASTM D 92, "Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester," Annu. B. ASTM Stand., pp. 1-10, 2007.
- [22]. P. Morales, "Construcción y conservación de vías," Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008.
- [23]. ASTM D 6926, "Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall," vol. i, pp. 1-6, 2014.

MODIFIQUE SU ASFALTO

con grano de caucho reciclado de llanta





RECICLAIR

Granulo de Caucho
Reciclado GCR en
diferentes
granulometrías,
desde malla 1
hasta malla 100



Barrio Lucero Carrera 2 #3-14
Mosquera-Colombia



info@recyclair.com



(57+1) 829 5553
(57+1) 829 5558
(57+1) 829 5560
(57+1) 317 657 5197

www.recyclair.com

SURTIMOS HACIA TODO EL PAÍS