

Tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados

X-ray computed tomography and aggregate image system (AIMS) for studying hot mix asphalt and aggregates

Alex E. Alvarez Lugo¹, Edith Arámbula Mercado² y Silvia Caro Spinel⁵

RESUMEN

La caracterización de las propiedades de los materiales empleados en ingeniería de pavimentos es fundamental para garantizar diseños confiables, estructuras durables y planes de mantenimiento y rehabilitación efectivos. Este artículo describe dos técnicas no destructivas basadas en la toma y procesamiento de imágenes que han sido exitosamente empleadas para caracterizar materiales de pavimentos: 1) tomografía computarizada con rayos-X, y 2) Sistema de Imágenes de Agregados. La primera técnica permite caracterizar la estructura interna de mezclas asfálticas con el fin de analizar y modelar su desempeño. En particular, esta técnica ha permitido estudiar el contenido, tamaño, distribución y conectividad de los vacíos y la relación de estas variables con la susceptibilidad al deterioro por la presencia de humedad, la capilaridad y la permeabilidad de las mezclas. El Sistema de Imágenes de Agregados fue desarrollado para caracterizar las propiedades morfológicas de los agregados (i.e., forma, angularidad y textura), técnica que proporciona importantes ventajas con respecto a los ensayos estándar ya que las mediciones son objetivas, de rápida ejecución, repetibles y reproducibles. El objetivo de este documento es describir los aspectos teóricos básicos y algunas aplicaciones recientes de estas técnicas que representan nuevas herramientas para mejorar los procesos de caracterización de los materiales empleados en ingeniería de pavimentos.

Palabras clave: caracterización de materiales, tomografía computarizada con rayos X, sistema de imágenes de agregados, mezcla asfáltica, agregados, pavimentos.

ABSTRACT

Achieving reliable pavement design, durable roadway structures and effective maintenance and rehabilitation plans requires the suitable characterisation of the materials used in pavement construction. This paper describes two non-destructive techniques based on image acquisition and analysis and their successful application in pavement engineering: X-ray computed tomography (X-ray CT) and aggregate imaging system (AIMS). The former has been used for characterising the internal structure of asphalt mixes to analyse and model their performance; it has been particularly used for studying the content, size, distribution and connectivity of air-voids and these variables' relationship with moisture damage susceptibility, capillarity and permeability within the mixes. AIMS was intended for characterising aggregates' morphological properties (i.e., form, angularity and texture). This technique provides important advantages regarding the standard methods used for obtaining the same aggregate properties: it is objective, reliable, reproducible and can be carried out quickly. This paper was aimed at describing these two techniques' theoretical backgrounds, mention some recent applications and provide insight into how existing characterisation of materials used in pavement construction can be improved.

Keywords: materials characterisation, X-ray computed tomography, aggregate imaging system, asphalt mixture, aggregate, pavement.

Recibido: febrero 6 de 2008

Aceptado: junio 23 de 2008

¹ Ingeniero civil, Universidad Nacional de Colombia. M.Sc., Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Colombia. Candidato a Doctor, Texas A&M University, Estado Unidos. Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Magdalena, Colombia. aalvarez@neo.tamu.edu

² Ingeniera civil, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México. Magíster, Ingeniería Civil, Texas A&M University, Estados Unidos. Ph.D., Texas A&M University, Estados Unidos. Pos-doctorado, Federal Highway Administration, Estados Unidos. Senior Engineer, Applied Research Associates, Inc., Estados Unidos. editham@exatec.itesm.mx

³ Ingeniera civil, Universidad de los Andes, Colombia. M.Sc., Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Colombia. Estudiante Ph.D., Texas A&M University, Estados Unidos. scaro@neo.tamu.edu

Introducción

Un pavimento es una estructura de múltiples capas, diseñado para soportar los esfuerzos y deformaciones que se generan por el paso repetido de vehículos y por las condiciones climáticas del lugar donde se encuentra construido (Papagiannakis y Masad, 2008). La principal dificultad en el diseño y análisis de estas estructuras es que se encuentran sometidas a cargas dinámicas de difícil caracterización y a condiciones climáticas cambiantes que alteran las propiedades mecánicas, químicas y termodinámicas de los materiales que las componen.

Los materiales que se emplean en estructuras de pavimento incluyen, principalmente:

- materiales granulares (i.e., agregados) no estabilizados o estabilizados mediante adición de cenizas volantes, cemento, cal, etcétera,

- mezclas asfálticas compuestas por la combinación de agregados y asfalto, y

- concreto hidráulico, conformado básicamente por agregados y cemento Portland.

La caracterización de estos materiales es fundamental para el diseño y construcción de estructuras confiables y durables. El proceso de caracterización de materiales abarca la determinación de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas e hidráulicas, así como también la evaluación de su durabilidad y funcionalidad. Algunos de los resultados esperados de este proceso incluyen la cuantificación de: 1) permeabilidad, 2) módulo de rigidez, 3) resistencia a la fractura por la aplicación de carga repetida (i.e., fatiga en materiales ligados), 4) resistencia a la deformación permanente (i.e., flujo o ahuellamiento en materiales viscoelásticos, viscoelastoplásticos o elastoplásticos), 5) resistencia a la fractura por cambios extremos de temperatura (i.e., agrietamiento a bajas temperaturas en materiales viscoelásticos), 6) resistencia al daño por humedad, y 7) características físicas y morfológicas de las partículas granulares, entre otros.

En la actualidad, las metodologías de caracterización se basan en procedimientos de ensayo estandarizados desarrollados por organizaciones como la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la American Society for Testing and Materials (ASTM). Para el caso colombiano, tales procedimientos se encuentran regulados fundamentalmente por el Instituto Nacional de Vías (Invías) y por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec). Sin embargo, el mejoramiento de las técnicas de caracterización de materiales es un proceso continuo, motivado principalmente por el creciente desarrollo de nueva tecnología, la necesidad de reevaluar la validez de métodos existentes y el mejor conocimiento sobre los factores y mecanismos que afectan el comportamiento y respuesta de los materiales.

Las técnicas de captura y procesamiento de imágenes constituyen un ejemplo de tecnologías innovadoras para la ca-

racterización de materiales utilizados en la construcción de pavimentos, especialmente agregados y mezclas asfálticas. Estas técnicas hacen parte de un extenso grupo de metodologías no destructivas que proporcionan información única sobre la estructura interna de materiales porosos (i.e., microestructura) y sobre las características geométricas de materiales granulares. Algunas de las técnicas de captura de imágenes bidimensionales disponibles para la caracterización de materiales porosos incluyen el uso de microscopios electrónicos (SEM, por sus siglas en inglés: *scanning electron microscopy*), técnicas de espectroscopia de imágenes (EDX y XPS, por sus siglas en inglés: *energy dispersive X-ray* y *X-ray photoelectron spectroscopy*, respectivamente) y microscopios de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés: *atomic force microscopy*) (Kosek et al., 2005). Así mismo, técnicas de reconstrucción tridimensional de medios porosos incluyen visualización mediante resonancia magnética nuclear (NMR por sus siglas en inglés: *nuclear magnetic resonance*) (Barrie, 2000), visualización mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM por sus siglas en inglés: *transmission electron microscopy*) y reconstrucción de imágenes obtenidas mediante tomografía computarizada con rayos-X (X-Ray CT, por su terminología en inglés: *X-ray computed tomography*) (Kosek et al., 2005).

En relación con la evaluación de las características geométricas de materiales granulares, los más recientes avances incluyen el uso de cámaras y de dispositivos láser para la obtención de imágenes de partículas de agregado y el desarrollo de técnicas de procesamiento de dichas imágenes. Dentro de estos dispositivos se encuentran: 1) VDG-40 Videograder, 2) Micrometrics OptiSizer tipo PSDA, 3) UIAIA (por sus siglas en inglés: *University of Illinois Aggregate Image Analyzer*), y 4) Sistema de Imágenes de Agregados (AIMS por su terminología en inglés: *Aggregate Imaging System*) (Masad et al., 2005).

Este artículo tiene como objetivo presentar el avance internacional reciente en la aplicación de tomografía computarizada con rayos-X para la caracterización de la estructura interna de mezclas asfálticas y del Sistema de Imágenes de Agregados, para la determinación de propiedades morfológicas de los agregados. A continuación se describe la técnica de tomografía computarizada con rayos-X así como su aplicación en la caracterización de vacíos en mezclas asfálticas y el estudio del flujo de agua en el interior de las mismas. Luego, se discuten los principios de la caracterización morfológica de agregados y se describe el sistema AIMS. Por último, se ofrece un breve resumen de ambas técnicas y se hace mención de sus principales ventajas y desventajas.

Tomografía computarizada con rayos-X

La tomografía computarizada con rayos-X se basa en la adquisición de imágenes usando rayos-X y su posterior análisis empleando algoritmos computacionales. Esta técnica ha ganado amplia aceptación en los últimos años y ha sido empleada exitosamente para analizar la microestructura de di-

versos medios porosos, tales como textiles, materiales biológicos (Kosek *et al.*, 2005), suelos (Otani y Obara, 2004) y mezclas asfálticas (Masad, 2004). La importancia de la tomografía computarizada con rayos-X en mezclas asfálticas radica en que ha permitido contar con información confiable de su estructura interna para:

- determinar las características de sus vacíos (i.e., tamaño, distribución y conectividad: Masad *et al.*, 2002, Álvarez *et al.*, 2007),
- analizar el daño potencial por humedad (Arámbula *et al.*, 2007a),
- modelar el flujo de agua en su interior (Masad *et al.*, 2004; Al-Omari y Masad, 2004; Masad *et al.*, 2007),
- caracterizar aspectos relacionados con su compactación (Watson *et al.*, 2004), e
- identificar la degradación de los agregados que componen estos materiales (Gatchalian *et al.*, 2006), entre otros.

Descripción de la técnica de rayos-X para caracterizar mezclas asfálticas

Los sistemas de rayos-X empleados en el análisis de mezclas asfálticas son similares a los utilizados en el ámbito médico. Sin embargo, a diferencia de estos, en el área de ingeniería de pavimentos la intensidad de los rayos-X y el tiempo de exposición empleados son normalmente mayores, lo que produce imágenes de mayor resolución. La resolución de una imagen, R , puede definirse como la razón entre la dimensión del objeto analizado, $L_{x,y}$, y el número de píxeles, $\# p$. Por lo tanto, una misma imagen puede tener diferentes resoluciones, R_x o R_y , a lo largo de sus ejes, si las dimensiones del objeto son distintas:

$$R_{x,y} = \frac{L_{x,y}}{\# p} \quad (1)$$

En general, es deseable contar con la mayor resolución posible, lo que se traduce en menores valores de R , es decir, una menor cantidad de material representada por cada píxel.

Existen diferentes equipos de rayos-X de uso industrial cuya clasificación depende del tamaño del objeto a observar y de su resolución: 1) convencional, 2) alta resolución, 3) ultra alta resolución, y 4) microtomografía (Ketcham y Carlson, 2001). Los equipos comúnmente utilizados en el análisis de mezclas asfálticas son los de alta resolución y ultra alta resolución, capaces de estudiar objetos con una resolución máxima de 100 μ m y 10 μ m, respectivamente (Ketcham y Carlson, 2001).

Los elementos básicos que conforman un equipo de rayos-X son una fuente y un detector. La geometría de los rayos-X y del detector varía dependiendo del equipo. Para el estudio de mezclas asfálticas típicamente se emplean rayos colimados que cubren en su totalidad el ancho del objeto y una serie de detectores en línea (Figura 1a). El objeto a escanear se ubica entre la fuente y el detector (figura 1b) y se envía una descarga de rayos-X desde la fuente hacia el objeto,

midiendo la intensidad de la radiación que llega al detector. La densidad del objeto determina la intensidad de los rayos-X que llegan al detector. Entre mayor es la densidad del objeto menor es la intensidad de radiación detectada, puesto que los rayos-X son absorbidos por el objeto o reflejados hacia la fuente.

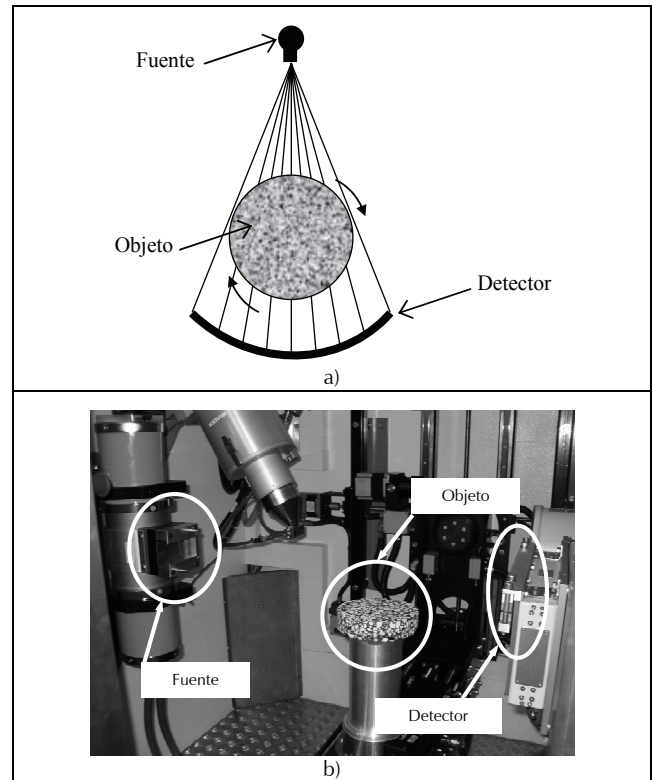


Figura 1. Sistema de rayos-X: (a) vista en planta de los principales componentes, (b) equipo típico de rayos-X (Texas A&M University)

Cada una de las mediciones antes descritas se denomina *vista*. Es común que la fuente y el detector, o serie de detectores, sean fijos, y que el objeto se ubique sobre una mesa giratoria (flechas curvas en diagrama de la Figura 1a). De esta manera, mientras el objeto rota alrededor de su propio eje se adquieren múltiples vistas en todas sus posibles orientaciones, las cuales permiten la reconstrucción posterior de imágenes bidimensionales. Dichas imágenes se denominan *secciones*, ya que muestran la sección interior del objeto como si este hubiera sido cortado en un plano horizontal. Después de adquirir una *sección*, la posición del objeto en el sentido vertical se modifica con base en una distancia fija predeterminada y los pasos anteriores se repiten nuevamente. Al finalizar el proceso, es posible visualizar y reconstruir el volumen completo utilizando el conjunto de *secciones* del espécimen obtenidas a diferentes alturas. Dependiendo del tamaño del objeto y la precisión deseada, las distancias verticales típicas para tomar secciones varían entre 0,5 mm y 1 mm (Masad *et al.*, 2007). La Figura 2 presenta ejemplos de *secciones* adquiridas en mezclas asfálticas. Estas imágenes permiten identificar los diferentes elementos que conforman la mezcla (agregados, matriz asfáltica y vacíos) y su distribu-

ción real, así como las diferencias que existen en términos de tamaño y proporción de agregados y vacíos en dos tipos diferentes de mezclas asfálticas.

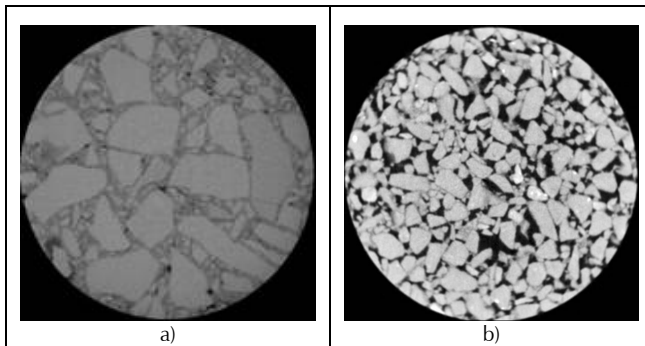


Figura 2. Ejemplos de secciones de mezclas asfálticas: (a) de gradación densa, (b) de gradación abierta

Caracterización de la estructura de vacíos y del flujo de agua en mezclas asfálticas mediante el análisis de imágenes de rayos-X

La estructura de vacíos de las mezclas asfálticas determina en gran medida el desempeño del material en la obra. El parámetro que comúnmente se ha empleado para caracterizar los vacíos de mezclas asfálticas es el contenido total de vacíos, el cual constituye uno de los principales parámetros de control dentro de los procesos de diseño (e.g., método Marshall o Superpave) y construcción de estas mezclas (Instituto del Asfalto, 2001). Sin embargo, el contenido total de vacíos no permite cuantificar el tamaño, distribución o conectividad de los vacíos individuales que existen en el interior de la mezcla. Dicha cuantificación ha cobrado importancia en la medida en que investigaciones recientes, desarrolladas aplicando técnicas de rayos-X, han demostrado que mezclas asfálticas compuestas por los mismos materiales, en las mismas proporciones y con el mismo contenido total de vacíos, presentan diferentes desempeños y susceptibilidades al daño por humedad (Masad et al., 2006; Arámbula et al., 2007b; Masad et al., 2007). En estos estudios, las imágenes obtenidas a través de técnicas de rayos-X se procesaron usando algoritmos computacionales para:

- realizar análisis probabilísticos del tamaño de vacíos en la muestra,
- determinar las posibles rutas disponibles para el transporte de agua al interior de la mezcla (i.e., conectividad),
- con base en los resultados de conectividad, analizar los mecanismos de transporte de agua en la mezcla (e.g., permeabilidad y capilaridad), y
- cuantificar la tortuosidad de las potenciales rutas de transporte de agua (i.e., la razón entre la longitud real de una ruta de vacíos conectados y la longitud de una línea recta entre sus dos extremos).

La identificación de los vacíos al interior de la mezcla se basa en la escala de grises de las secciones obtenidas durante el

escaneo con rayos-X (Figura 3a). Como se mencionó previamente, el color de cada partícula en la imagen está directamente relacionado con la densidad del material que representa, siendo los objetos más oscuros los de menor densidad (i.e., vacíos) y los más claros los de mayor densidad (i.e., agregados). De esta manera, a la graduación de grises se le asigna una escala numérica, que por lo general va desde cero (representando el color negro) hasta 255 (representando el color blanco). Para obtener la cantidad, tamaño y posición de los vacíos se utilizan algoritmos computacionales de procesamiento de imágenes que, con base en un valor límite dentro de la escala numérica de grises, transforman la imagen (i.e., sección) en una composición binaria (blanco y negro) con el fin de diferenciar el material sólido de los vacíos, tal como se muestra en la Figura 3b.

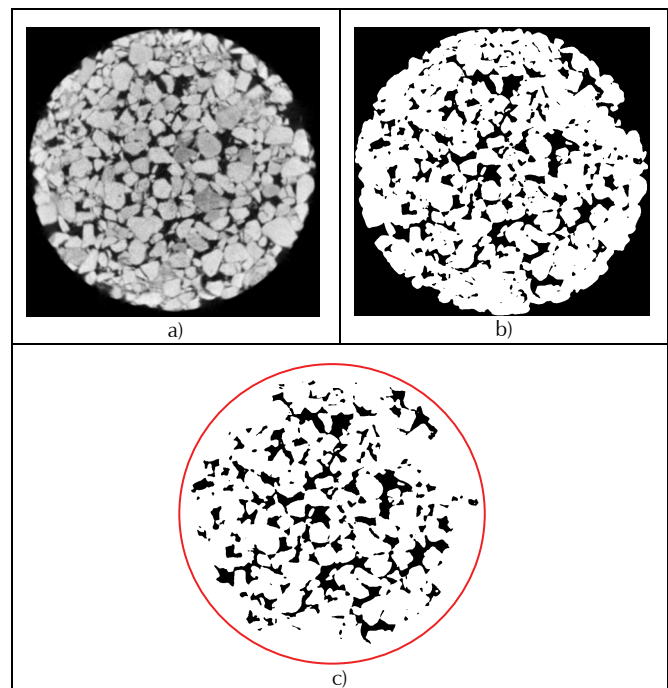


Figura 3. Sección de una mezcla asfáltica de gradación abierta: (a) imagen en escala de grises, (b) imagen binaria de contenido total de vacíos, (c) imagen binaria de vacíos efectivos (tomado de: Álvarez et al., 2007)

El porcentaje de vacíos en cada imagen binaria, P_i , y el total para un espécimen (i.e., contenido total de vacíos), P_{Total} , se calculan como:

$$P_i = \frac{Av_i}{AT_i} \quad (2)$$

$$P_{Total} = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{N} \quad (3)$$

Donde Av_i corresponde al área de vacíos en cada imagen, A_{Ti} es el área de la sección transversal del espécimen y N es el número de imágenes. El tamaño promedio (i.e., radio) de los vacíos en cada imagen se estima de la siguiente forma:

$$\bar{r}_i = \sqrt{\frac{A_{vi}}{\pi M_i}} \quad (4)$$

Donde M_i es el número o cantidad de vacíos en cada imagen.

El proceso de selección del color correspondiente al valor límite es iterativo. Después de asignar al grupo de imágenes un cierto valor límite en escala de grises, se efectúa el cálculo del contenido total de vacíos utilizando las imágenes binarias resultantes (P_{Total}). El valor obtenido de este análisis se compara con el contenido total de vacíos obtenido mediante ensayos de laboratorio. Este proceso se repite hasta que los dos contenidos de vacíos (i.e., calculado y de laboratorio) coinciden.

La figura 4 presenta los resultados obtenidos tras analizar imágenes de rayos-X pertenecientes a dos mezclas asfálticas de gradación densa fabricadas con granito y caliza (Masad et al., 2006). En la Figura 4a se observa la frecuencia de la distribución del tamaño de vacíos dentro de cada mezcla, y la figura 4b ilustra la reconstrucción tridimensional de los vacíos al interior de las muestras. Este análisis sugiere que para las mezclas asfálticas de gradación densa la mayoría de vacíos tiene un tamaño inferior a los 3 mm de diámetro, que la distribución de vacíos no es uniforme al interior de la mezcla, y que no todos los vacíos se encuentran conectados. De acuerdo con la nomenclatura propuesta por Chen et al. (2004), estos vacíos aislados se conocen como *impermeables*, contrario a los vacíos conectados, que se denominan *efectivos*.

Los vacíos efectivos de una mezcla asfáltica se pueden identificar mediante el empleo de algoritmos computacionales que hacen uso de las imágenes binarias resultantes del procesamiento de imágenes antes descrito (Figura 3b) (Masad et al., 2007). Estas imágenes se procesan utilizando un *software* especializado que recorre una a una las secciones del objeto para determinar las rutas de vacíos de aire conectadas al interior de la mezcla. La Figura 3c presenta un ejemplo de la imagen binaria de vacíos efectivos obtenida a partir del análisis de la imagen binaria presentada en la figura 3b. El análisis de conectividad ha permitido modelar y cuantificar procesos de flujo de agua en la microestructura (e.g., permeabilidad y capilaridad), los cuales proveen las condiciones propicias para el desarrollo de daño por humedad (usualmente denominado *stripping*). Este tipo de daño ha sido reconocido en las últimas tres décadas como una de las principales causas de deterioro temprano de las carpetas de rodadura asfáltica (Caro et al., 2008a y 2008b).

En relación con los procesos de flujo de agua en la microestructura, simulaciones numéricas de este fenómeno en mezclas asfálticas reconstruidas mediante tecnología de imágenes (Figura 5) sugieren que la permeabilidad en estos materiales es altamente anisotrópica (Kutay et al., 2007; Masad y Al-Omari, 2007). De hecho, los resultados de tales modelaciones demostraron que la permeabilidad horizontal puede llegar a ser hasta dos órdenes de magnitud mayor que la per-

meabilidad vertical, lo que se ha atribuido principalmente a la poca uniformidad de la distribución de vacíos y a la orientación de las partículas de agregado al interior del material. Estas simulaciones también permitieron concluir que las regiones con bajas concentraciones de vacíos funcionan como cuellos de botella para el flujo vertical y que el flujo horizontal es predominante en las zonas con gran porcentaje de vacíos efectivos.

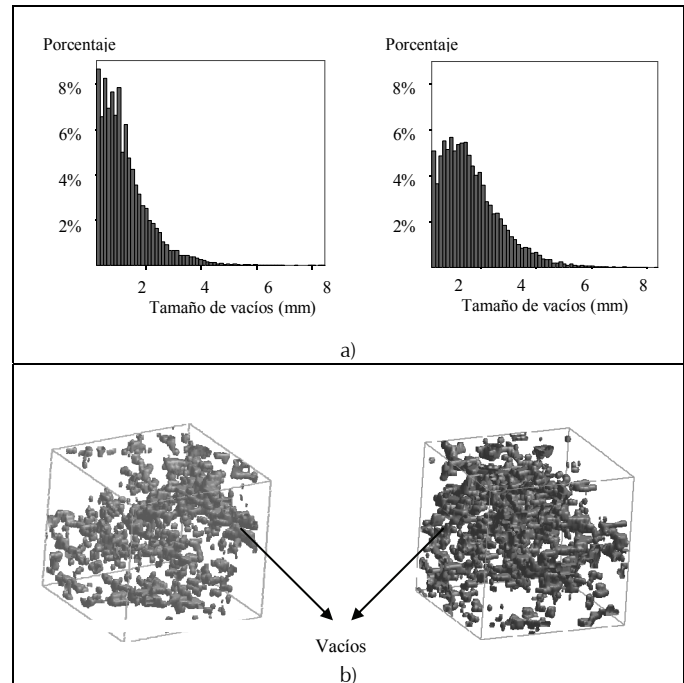


Figura 4. (a) Frecuencia de la distribución de vacíos para mezclas densas fabricadas con caliza (izquierda) y granito (derecha), (b) visualización de la estructura interna de vacíos (adaptado de: Masad et al., 2006)

Adicionalmente, un estudio reciente basado en una combinación de trabajo experimental y el uso de técnicas de procesamiento de imágenes obtenidas empleando tomografía computarizada con rayos-X permitió demostrar que la capilaridad no es un fenómeno asociado exclusivamente a los suelos, sino que también se presenta en mezclas asfálticas, y que, bajo condiciones favorables, puede constituir un importante medio de transporte de humedad a la mezcla (Masad et al., 2007). A pesar del hecho de que el asfalto repele el agua, Masad et al., (2007) sugieren que la capilaridad existe porque el agua no está en contacto directo con el asfalto sino con una matriz conformada por la mezcla del asfalto y la fracción fina de los agregados y porque el tamaño de los vacíos conectados en mezclas de gradación densa es suficientemente pequeño para hacer que las rutas de vacíos conectados actúen como tubos capilares.

Los avances descritos muestran cómo la técnica de tomografía computarizada con rayos-X, en combinación con las de procesamiento de imágenes, permiten una caracterización detallada de las mezclas asfálticas. Este tipo de análisis, acompañado de pruebas de laboratorio y de simulaciones nu-

méricas, constituye un enfoque novedoso que ha permitido ampliar el conocimiento sobre los factores micromecánicos que determinan el desempeño y la durabilidad de los pavimentos.

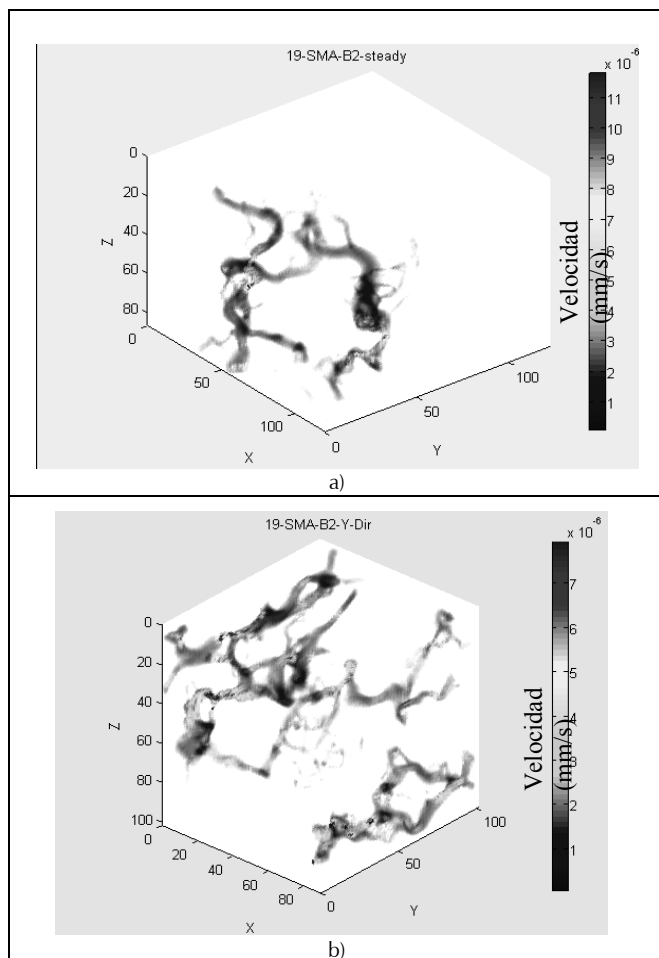


Figura 5. Distribución de velocidades en una mezcla asfáltica abierta en condiciones de flujo estacionario: (a) en la dirección del eje z, (b) en la dirección del eje y (adaptado de: Kutay et al., 2007)

Técnicas basadas en imágenes para la cuantificación de la morfología de los agregados

Los agregados constituyen el componente mayoritario (tanto en peso como en volumen) de todas las capas de un pavimento. Por esta razón, la respuesta mecánica y el desempeño de las estructuras de pavimento están influenciadas directamente por las características de estos materiales. En particular, las propiedades físicas superficiales o morfológicas están relacionadas con la compactabilidad, trabajabilidad, rigidez (i.e., módulo resiliente) y resistencia ante deformaciones permanentes de las diferentes capas que incluyen estos materiales, ya sea en estado simple o ligado (e.g., mezcla de agregados con asfalto, cemento hidráulico, cal, cenizas volantes, etc.) (Masad et al., 2003; Masad, 2007). Adicionalmente, se ha demostrado que en el caso de materiales liga-

dos las características morfológicas de los agregados juegan un papel primordial en la resistencia a los procesos de deterioro por fatiga (Kandhal y Parker 1998; Lekarp et al., 2000a y 2000b; Hanna, 2003; White et al., 2006) y en las características hidráulicas del compuesto.

Caracterización morfológica de agregados

Las características geométricas de los agregados incluyen forma, angularidad y textura superficial. Estas propiedades se pueden definir considerando diferentes escalas con relación al tamaño de la partícula. Mientras la *forma* se refiere a los cambios de las proporciones de la partícula, la *angularidad* refleja modificaciones en las esquinas que se superponen a la forma, tal como se ilustra en las partes a) y b) de la figura 6. La *textura*, por su parte, abarca las irregularidades superficiales definidas a una escala mucho menor, de tal manera que estas no determinan directamente ni la forma ni la angularidad (figuras 6a y 6c) (Masad et al., 2005). En general, aquellos agregados de formas cercanas a la cúbica, angulares, de textura rugosa y con capacidad para mantener estas propiedades a lo largo de la vida útil de las estructuras, son preferidos para aplicaciones en pavimentos.

En la actualidad existen diversos ensayos para determinar las características geométricas de los agregados basados en:

- evaluación del acomodamiento de partículas vertidas por flujo libre en recipientes,
- inspección visual,
- medición de dimensiones usando plantillas y calibradores,
- evaluación del acomodamiento de partículas compactadas en recipientes,
- aplicación de esfuerzos cortantes en muestras compactadas,
- uso de cámaras para el registro de imágenes, y
- uso de dispositivos láser (Masad et al., 2005).

Sin embargo, la práctica actual de diseño y control de calidad de agregados se limita a ensayos básicos pertenecientes a los primeros tres grupos mencionados, de los cuales sólo es posible obtener mediciones indirectas de la morfología de los agregados. Este es el caso de los ensayos estándar incluidos en la metodología de diseño de mezclas asfálticas Superpave (Instituto del Asfalto, 2001), y de los ensayos sugeridos por el Invías para la evaluación de la calidad de agregados empleados en bases de pavimentos (tabla 1).

A nivel general, las principales limitaciones y desventajas de dichos ensayos son (Masad et al., 2005):

- limitada repetibilidad y reproducibilidad,
- dificultad para independizar las evaluaciones en términos de forma, angularidad y textura superficial (dada la medición indirecta de las propiedades),

- largos tiempos de ensayo,
- subjetividad de la evaluación debido a la intervención del operario,
- dificultad para incorporar directamente los resultados en métodos analíticos de predicción del desempeño de las estructuras, y
- obtención de valores promedios como resultado de los ensayos (en lugar de distribuciones).

Estas limitaciones han promovido el desarrollo e implementación de métodos más eficaces, tales como el uso de cámaras y dispositivos láser para capturar y procesar imágenes de partículas de agregado. A continuación se describe la técnica de caracterización de agregados mediante imágenes AIMS, una de las más recientes y con mayor proyección en el futuro cercano (Masad, 2005).

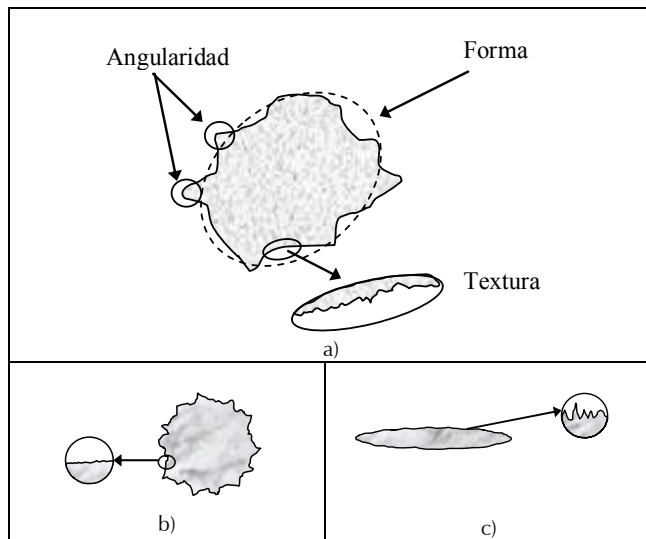


Figura 6. Esquemización de: (a) características geométricas de los agregados, (b) agregados redondeados, con alta angularidad y textura no rugosa, y (c) agregados alargados con baja angularidad y textura rugosa

Tabla 1. Ensayos estándar empleados en la caracterización de la morfología de los agregados

Metodología	Ensayo	Especificación
Superpave para mezcla asfálticas	Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso	ASTM D5821
	Partículas aplanadas y alargadas en el agregado grueso	ASTM D4791
	Contenido de vacíos en agregado fino no compactado	AASHTO T304
Invías para bases granulares	Proporción de partículas fracturadas mecánicamente en el agregado grueso	INV E-227
	Índices de aplanamiento y alargamiento	INV E-230

Descripción del Sistema de Imágenes de Agregados (AIMS)

El Sistema de Imágenes de Agregados, AIMS, se compone de una cámara fotográfica con dos sistemas de iluminación (inferior y superior), un video-microscopio, bandeja con una red de puntos definida para la colocación de partículas de agregado grueso, y un programa de computador (Figura 7). El sistema está configurado para operar bajo dos módulos diferentes que permiten evaluar de manera independiente agregados finos (i.e., pasatamiz No. 4 [4,75 mm]) y agregados gruesos (i.e., retenidos en el tamiz No. 4).

En el caso de los agregados finos, la forma y la angularidad son evaluadas a través de imágenes en blanco y negro que definen claramente el contorno de las partículas. Estas imágenes son captadas en el AIMS usando el sistema de iluminación localizado en la parte inferior del equipo (debajo de la bandeja de los agregados), el cual genera un contraste adecuado entre las partículas y la bandeja de agregados. Dada la correlación existente entre angularidad y textura en los agregados finos reportada por Masad et al., (2001), sólo es necesario evaluar la forma y la angularidad de tal fracción de agregado para obtener una caracterización completa. Este hecho permitió simplificar el sistema, puesto que la determinación de la textura no requiere imágenes de alta resolución.



Figura 7. Sistema de Imágenes de Agregados, AIMS (Texas A&M University)

Mientras en el ensayo de agregado fino las partículas son extendidas aleatoriamente sobre la bandeja de agregados, en el caso de los agregados gruesos las partículas deben ser colocadas en las intersecciones de la red de puntos ubicada en la parte superior de la bandeja. Una vez ubicadas, se procede a tomar imágenes individuales de cada partícula para realizar la evaluación de su forma (la cual está basada en mediciones en tres dimensiones). El análisis se hace a través de imágenes en blanco y negro para determinar la forma y la angularidad, y de imágenes en escala de grises para cuantificar la textura. Las imágenes en blanco y negro, usadas para generar proyecciones en dos dimensiones, son tomadas usando el sistema de iluminación inferior, mientras que el sistema de iluminación superior es aplicado para registrar las imágenes en escala de grises. Adicionalmente, el videomicroscopio es uti-

lizado para determinar la profundidad de las partículas, lo que permite completar el registro de tres dimensiones que se necesita para cuantificar su forma. Tanto el movimiento del sistema como la magnificación de las imágenes es controlado automáticamente a través de un computador (Al Rousan, 2004).

Una vez que las imágenes son capturadas, estas se procesan en un *software* especializado, que cuantifica la forma a través del índice de esfericidad (I_E) (ecuación 5), y el cual se define en función de las longitudes mayor (d_L), intermedia (d_I) y menor (d_S), siendo y es igual a la unidad para partículas equidimensionales:

$$I_E = \sqrt[3]{\frac{d_S \cdot d_I}{d_L^2}} \quad (5)$$

La angularidad se calcula a partir de las imágenes bidimensionales usando el método del gradiente, basado en el cambio de la dirección del vector gradiente (i.e., vector normal) a lo largo de una superficie. Mientras en superficies con contornos redondeados este cambio es gradual y homogéneo, en el caso de superficies con extremos agudos el cambio del vector es sustancial. La angularidad (A) es cuantificada a través del cambio promedio en la inclinación de los vectores gradientes mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (6)$$

donde N es el número total de puntos sobre el contorno, i denota el i -ésimo punto sobre el contorno de una partícula y es el ángulo de orientación en un punto del contorno.

El análisis de textura se basa en la teoría *Wavelet*. Esta teoría ofrece el soporte matemático para analizar imágenes en múltiples escalas, lo que permite obtener una imagen de baja resolución y una serie de imágenes detalladas (Al Rousan, 2004). En el AIMS el método *Wavelet* es empleado para determinar la textura en dirección vertical, horizontal y diagonal en tres imágenes detalladas independientes. El índice de textura (I_{Tn}) se cuantifica con base en el nivel de descomposición (N) y en los coeficientes *Wavelet* (D), usando la siguiente expresión:

$$I_{Tn} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x,y))^2 \quad (7)$$

donde i varía de 1 a 3, representando las tres direcciones de textura, y j es el índice del coeficiente *Wavelet*. En la figura 8b se presenta un ejemplo de descomposición de textura en cuatro imágenes, partiendo de la imagen original mostrada en la Figura 8a. Las cuatro imágenes resultantes del análisis corresponden a una de baja resolución (Figura 8b1) y a tres que contienen la información substraída de dicha imagen en las direcciones Y (Figura 8b2), X (Figura 8b3), y en ambas direcciones, X y Y (Figura 8b4).

Con base en las descripciones anteriores, es posible concluir que el AIMS posee importantes ventajas con respecto a los

métodos de caracterización tradicionales, dentro de las cuales se puede señalar:

- menor variabilidad de los índices medidos con el sistema,
- posibilidad de analizar agregados finos y gruesos empleando el mismo equipo,
- obtención de análisis detallados de textura, y
- posibilidad de utilizar diferentes resoluciones con base en el tamaño de la partícula (Masad *et al.*, 2005).

Adicionalmente, la medición independiente de cada una de las características geométricas del agregado se constituye en un avance importante para el análisis de su efecto real en el desempeño de las estructuras de pavimento.

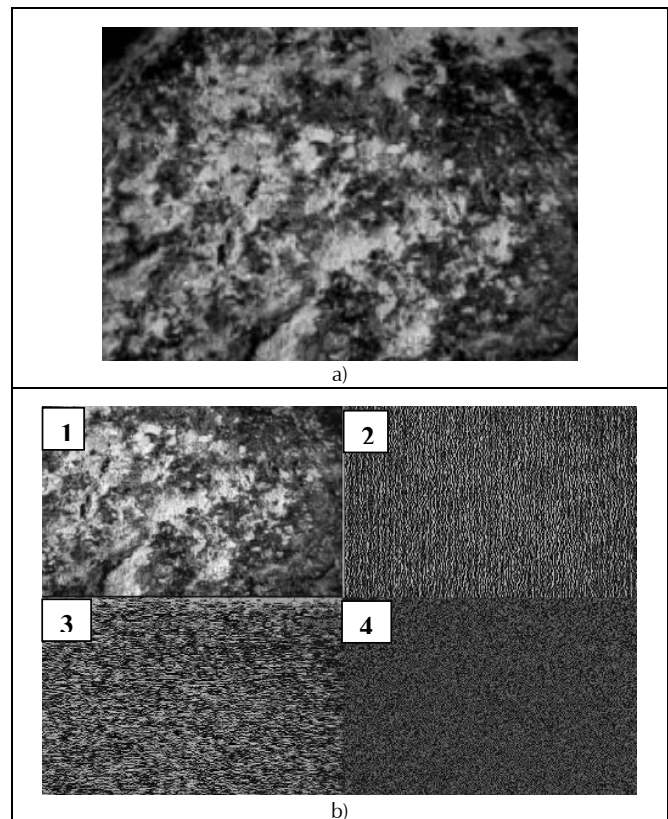


Figura 8. Análisis de textura: (a) imagen original, (b) descomposición usando la teoría *Wavelet* (adaptado de: Al Rousan, 2004)

A nivel más general, este sistema ofrece ventajas adicionales como la posibilidad de evaluar cuantitativamente el efecto de diferentes técnicas de producción de agregados (i.e., explotación y trituración) sobre sus características geométricas, con miras a la optimización de los procesos de acuerdo con la fuente y la aplicación final. Así mismo, esta técnica se puede emplear para cuantificar directamente el cambio en las propiedades superficiales de los agregados tras ser sometidos a ensayos de caracterización y evaluación de calidad en laboratorio (e.g., después de ensayos de pulimento) (Mahmoud, 2005, Luce *et al.*, 2007).

Conclusiones

La determinación de las propiedades de los materiales empleados en pavimentos es fundamental para diseñar y construir estructuras confiables, durables y económicas. Las dos técnicas descritas en este documento hacen parte de un nuevo grupo de metodologías no destructivas aplicadas al estudio de materiales empleados en pavimentos y son una muestra de la tendencia mundial que existe para su caracterización, modelación y análisis.

La tomografía computarizada con rayos-X (*X-ray CT*) es un método eficaz para caracterizar la estructura interna de materiales porosos. Su empleo ha sido especialmente eficiente en el estudio de la microestructura de mezclas asfálticas, en particular en lo concerniente a la determinación de la estructura de vacíos (i.e., tamaño, distribución y conectividad) y al análisis de transporte de agua al interior del material. La principal ventaja de esta técnica es que, al ser no destructiva, es posible utilizar los mismos especímenes en pruebas de laboratorio posteriores con el fin de determinar sus características mecánicas, físicas, o químicas. Su principal limitación es la resolución de las imágenes resultantes. Los equipos que se utilizan actualmente en el análisis de mezclas asfálticas pueden generar una resolución máxima de entre 10 μ m y 100 μ m, lo cual en ocasiones es insuficiente para estudiar ciertos fenómenos como el inicio y evolución de fisuras ocasionadas por cargas cíclicas (i.e., fatiga).

En la actualidad existen diversos sistemas basados en imágenes que permiten la caracterización morfológica de los agregados, dentro de los que se destaca el Sistema de Imágenes de Agregados (AIMS), que emplea fundamentos matemáticos para la cuantificación directa e independiente de cada una de las propiedades geométricas de los agregados (forma, angularidad y textura) con base en el procesamiento de imágenes obtenidas mediante una cámara fotográfica (con dos fuentes de iluminación) y un videomicroscopio. Esta metodología reporta importantes ventajas con respecto a la caracterización convencional de agregados, a la vez que ofrece diversas posibilidades para el mejoramiento y desarrollo de la industria de los agregados y la construcción vial. Es de esperar que en el futuro cercano esta técnica sea implementada como parte de los ensayos estandarizados de caracterización de agregados y del diseño de mezclas asfálticas.

Bibliografía

Al-Omari, A., Masad, E., Three Dimensional Simulation of Fluid Flow in X-ray CT Images of Porous Media., *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 28, 2004, pp. 1327-1360.

Al Rousan, T., Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System., *Disertación Doctoral presentada a Texas A&M University, College Station, Texas, para optar al grado de Doctor of Philosophy*, 2004.

Alvarez, A.E., Epps Martin, A., Estakhri, C., Button, J., Kraus, Z., Prapaitrakul, N., Glover, C.J., Evaluation and Recommended Improvements for Mix Design of Permeable Friction Courses., *Report FHWA/TX-08/0-5262-3*, College Station, Texas, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 2008, pp. 36-39.

Arámbula, E., Masad, E., Epps Martin, A., Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures with Known Field Performance Evaluated with Dynamic Analysis and Crack Growth Model., *Transportation Research Record*, Vol. 2001, 2007a, pp. 20-28.

Arámbula, E., Masad, E., Epps Martin, A., Influence of Air Void Distribution on the Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes., *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 19, 2007b, pp. 655-664.

Barrie, P.J., Characterization of Porous Media Using NMR Methods., *Annual Reports on NMR Spectroscopy*, Vol. 41, 2000, pp. 265-316.

Caro, S., Masad, E., Bhasin, A. D., Little, D. N., Moisture Damage Susceptibility, Part I: Mechanisms., *International Journal of Pavements Engineering*, Vol.9, 2, 2008a, pp. 81-98.

Caro, S., Masad, E., Bhasin, A. D., Little, D. N., Moisture Damage Susceptibility, Part II: Characterization and Modeling., *International Journal of Pavements Engineering*, Vol.9, 2, 2008a, pp. 99-114.

Chen, J., Lin, K., Young, S., Effects of Crack Width and Permeability on Moisture-Induced Damage of Pavements., *Journal in Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 16, No. 3, 2004, pp. 276-282.

Gatchalian, D., Masad, E., Chowdhury, A., Little, D., Characterization of Aggregate Resistance to Degradation in Stone Matrix Asphalt Mixtures., *Transportation Research Record*, Vol. 1962, 2006, pp. 55-63.

Hanna, A., Aggregate Tests for Portland Cement Concrete Pavements: Review and Recommendations., *National Cooperative Highway Research Program. Research Results Digest*, Number 281, 2003.

Instituto del Asfalto., *Superpave., Superpave Mix Design, Superpave Series No. 2 (SP-2)*, Lexington, KY, Asphalt Institute, 2001, pp. 35-61.

Kandhal, P., Parker, F., Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements., *NCHRP Program, Report 405*, 1998.

Ketcham, R.A., Carlson, W.D., Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences., *Computers & Geosciences*, Vol. 27, 2001, pp. 381-400.

Kosek, J., Stepanek, F., Marek, M., Modeling of Transport and Transformation Processes in Porous and Multiphase Bodies., *Advances in Chemical Engineering*, Vol. 30, 2005, pp. 137-203.

Kutay, M.E., Aydilek, A.H., Masad, E., Computational and Experimental Evaluation of Hydraulic Conductivity Anisotropy in Hot-Mix Asphalt., *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 8, No. 1, 2007, pp. 29-43.

- Lekarp, F., Isacson, U., Dawson, A., State of The Art I: Resilient Response of Unbound Aggregates., *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, 2000a, pp 66-75.
- Lekarp, F., Isacson, U., Dawson, A., State of The Art II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates., *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, 2000b, pp.76-83.
- Luce, A., Mahmoud, E., Masad, E., Chowdhury, A., Relationship of Aggregate Microtexture to Asphalt Pavement Skid Resistance., *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 35, No. 6, 2007, pp. 1-11.
- Mahmoud, E., Development of Experimental Methods for the Evaluation of Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion, and Breakage., tesis presentada a Texas A&M University, College Station, para optar al grado de Master of Science., 2005.
- Masad, E., Olcott, D., White, T., Tashman, L., Correlation of fine aggregate imaging shape indices with asphalt mixture performance., *Transportation Research Record*, Vol. 1757, 2001, pp. 148-156.
- Masad, E., Jandhyala, V.K., Dasgupta, N., Somadevan, N., Shashidhar, N., Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes Using X-ray Computed Tomography. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 14, No. 2, 2002, pp. 122-129.
- Masad, E., Little, D., Tashman, L., Saadeh, S., Al-Rousan, T., Sukhwani, R., Evaluation of Aggregate Characteristics Affecting HMA Concrete Performance., Report No. ICAR 203-1, College Station, Texas, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, Dec., 2003.
- Masad, E., X-ray computed tomography of aggregates and asphalt mixes., *Materials Evaluation*, Vol. 62, No. 7, 2004, pp. 775-783.
- Masad, E., Birgisson, B., Al-Omari, A., Cooley, A., Analytical Derivation of Permeability and Numerical Simulation of Fluid Flow in Hot-Mix Asphalt., *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, No. 5, 2004, pp. 487-496.
- Masad, E., Aggregate Imaging System (AIMS): Basics and Applications., Report FHWA/TX-05/5-1707-01-1, College Station, Texas, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 2005, pp. 2-5.
- Masad, E., Al-Rousan, T., Button, J., Little, D., Tutumluer, E., Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity., NCHRP Project 4-30A, 2005.
- Masad, E., Castelblanco, A., Birgisson, B., Effects of Air Void Size Distribution, Pore Pressure, and Bond Energy on Moisture Damage., *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 34, No. 1, 2006, pp. 1-9.
- Masad, E., Analysis of Aggregate Shape Characteristics and its Relationship to Hot Mix Asphalt Performance., *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 8, 2007, pp. 317-350.
- Masad, E., Arambula, E., Ketcham, R.A., Abbas, A.R., y Epps Martin, A., Nondestructive Measurement of Moisture Transport in Asphalt Mixtures., *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 76, 2007, pp. 919-952.
- Masad, E., Al-Omari, A., Chen H.-C., Computations of Permeability Tensor Coefficients and Anisotropy of Asphalt Concrete Based on Microstructure Simulation of Fluid Flow., *Computational Material Science*, No. 40, 2007, pp. 449-459.
- Otani, J., Obara, Y., X-ray CT for Geomaterials: Soils, Concrete, Rocks., *Proceedings of the International Workshop on X-Ray CT for Geomaterials: GEOX2003*, Kimamoto, Japan, Royal Swets and Zeitlinger: Lisse, 2004.
- Papagiannakis, A.T., Masad, E.A., *Pavement Design and Materials*, John Wiley and Sons, Inc., 2008.
- Watson, D.E., Masad, E., Moore, K.A., Williams, K., Cooley, L.A. Jr., Verification of Voids in Coarse Aggregate Testing, Determining Stone-on-Stone Contact of Hot-Mix Asphalt Mixtures., *Transportation Research Record*, Vol. 1891, 2004, pp. 182-190.
- White, T.D., Haddock, J.E., Rismantojo, E., Aggregate Tests for Hot-Mix Asphalt Mixtures Used in Pavements., NCHRP Program, Report 557, 2006.