

Nuevas técnicas no destructivas que utilizan el análisis de imágenes para el estudio y la caracterización de mezclas asfálticas

Lorena Palomo
lpalomo@chm.es
José Simón
jsimon@chm.es

Gloria Motos Cascales
gmotos@ctcon-rm.com
Víctor García
vgarcia@ctcon-rm.com

El futuro de la fabricación y construcción de mezclas asfálticas exige mayor calidad, innovación y eficiencia. Este nuevo enfoque se centra en mejorar el rendimiento operativo y la eficiencia mediante la transferencia de los avances digitales y tecnológicos disponibles para promover un transporte por carretera seguro, sostenible y conectado.

Teniendo en cuenta estas premisas, el presente artículo tiene como objetivo presentar los principales avances logrados durante el proyecto VAXAMA, que se centra en el desarrollo de una metodología para automatizar el proceso de control de la producción de mezclas bituminosas mediante la aplicación de nuevas técnicas de ensayo no destructivo que utilizan la visión artificial y el análisis de imágenes. Este enfoque busca reducir y minimizar las incertidumbres relacionadas con la composición de las mezclas asfálticas durante sus procesos de producción y colocación.

Como parte del trabajo realizado, se han analizado diversas muestras de asfalto utilizando técnicas de ensayo no destructivas para caracterizar la composición y la estructura interna de la mezcla. A partir de estos análisis, se han desarrollado módulos de segmentación que utilizan inteligencia artificial, lo que permite una discretización precisa del contenido de huecos en todo el espesor de las muestras.

En cuanto al contenido de betún y la curva de granulometría de la mezcla, y dada la homogeneidad del recubrimiento y las propiedades del betún, se proponen nuevos procedimientos y herramientas que permiten identificar con precisión cada componente. En resumen, aunque este proyecto se encuentra todavía en una fase inicial de desarrollo, los resultados obtenidos hasta ahora son muy prometedores y demuestran el potencial de esta tecnología para su aplicación en mezclas bituminosas.

Palabras Clave: Tomografía, rayos X, análisis de imágenes, ensayos no destructivos, caracterización de mezclas asfálticas.

The future of asphalt mixture manufacturing and construction demands greater quality, innovation, and efficiency. This new approach focuses on enhancing operational performance and efficiency by transferring available digital and technological advances to promote safe, sustainable, and connected road transport. Based on these premises, this article aims to present the main advances achieved during the VAXAMA project, which focuses on developing a methodology to automate the quality control process in asphalt mixture production through the application of new non-destructive testing techniques that use computer vision and image analysis. This approach seeks to reduce and minimize uncertainties related to the composition of asphalt mixtures during their production and placement processes. As part of the work carried out, various asphalt samples were analyzed using non-destructive testing techniques to characterize the composition and internal structure of the mixtures. From these analyses, segmentation modules based on artificial intelligence were developed, enabling precise discretization of void content

Nuevas técnicas no destructivas que utilizan el análisis de imágenes para el estudio y la caracterización de mezclas asfálticas

throughout the entire thickness of the samples. Regarding the bitumen content and the gradation curve of the mixture, and considering the uniformity of coating and bitumen properties, new procedures and tools have been proposed to accurately identify each component. In summary, although this project is still in its early development phase, the results obtained so far are highly promising and demonstrate the potential of this technology for application in bituminous mixtures.

Keywords: Tomography, X-rays, Image Analysis, Non-Destructive Testing (NDT), Characterization of Asphalt Mixtures

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El sector de la construcción es actualmente una de las industrias productivas más importantes del país. En términos generales, este sector representa el 10 % de la actividad económica de España y, según datos de la Conferencia Nacional de la Construcción (CNC), por cada millón de euros de producción se crean 15 nuevos puestos de trabajo. Además, es un sector muy intensivo en mano de obra, que representa el 5,2 % del PIB total del país.

Sin embargo, a pesar de su relevancia económica, sigue siendo uno de los sectores menos productivos y más obsoletos. Como resultado, en los últimos años se ha producido un notable estancamiento en el crecimiento del sector, debido principalmente a que los métodos y sistemas de construcción tradicionales han alcanzado su límite de desarrollo.

Esto se observa claramente en la figura 1, que ilustra la evolución de la productividad del sector de la construcción en comparación con otras industrias a lo largo del tiempo. Muestra un claro cambio de tendencia, que indica un estancamiento (e incluso un retroceso) de la

productividad. En este contexto, uno de los principales retos a los que se enfrenta el sector de la construcción es que «la productividad máxima que se puede alcanzar con los sistemas de construcción tradicionales es de alrededor del 30 %» [1].

A partir del gráfico anterior, se puede confirmar que el sector de la construcción se encuentra actualmente en una posición insostenible y obsoleta si se compara con las exigencias actuales y los estándares mínimos requeridos, que promueven la eficiencia, la productividad, la sostenibilidad y la comunicación entre los sistemas de producción. Por lo tanto, existe una clara necesidad de proponer un cambio de paradigma que permita al sector adaptarse a este nuevo marco [2].

En este contexto, la automatización de la construcción ha surgido como un sistema capaz de abordar las necesidades del sector transformando la industria y, en consecuencia, respondiendo a las demandas y requisitos actuales [3]. Este nuevo enfoque se centra en la actualización del sector a través de tres pilares fundamentales: mano de obra, desarrollo industrial y sistemas organizativos, de los que se pueden derivar importantes beneficios económicos y medioambientales.

Aunque la automatización de los procesos de construcción es todavía un campo en evolución y desarrollo, se espera que en los próximos años alcance un nivel de madurez que permita su integración a gran escala en todo el sector. De hecho, en los últimos años se ha producido un importante cambio de paradigma, y los sistemas de construcción automatizados han comenzado a integrarse en diversos ámbitos y procesos de producción.

El sector del asfalto y la pavimentación no ha quedado al margen de este nuevo enfoque productivo. En línea con los pilares estratégicos del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, se han identificado diversas acciones y nuevas propuestas con el objetivo de me-

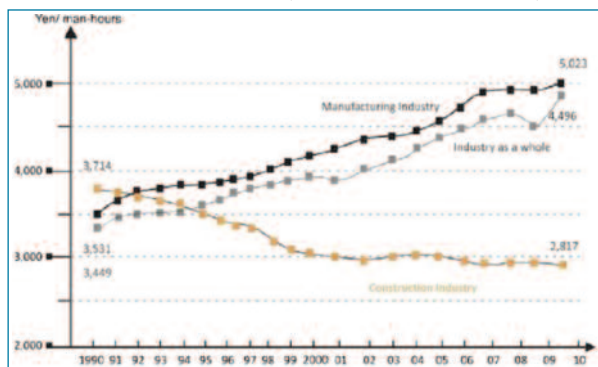


Figura 1. Evolución de la productividad en el sector de la construcción frente a otras industrias [1]

jorar la eficiencia operativa, reequilibrar la cuota modal del transporte hacia modos menos contaminantes y aprovechar los avances digitales y tecnológicos disponibles.

1.2 Necesidades actuales

En la actualidad, tal y como se define en el Pliego de Condiciones Técnicas Generales de Obras de Vial y Puentes (PG-3), para determinar el contenido de betún y áridos de una mezcla asfáltica determinada es necesario separar sus componentes mediante disolventes orgánicos (UNE-EN 12697-1). A continuación, se estudian y caracterizan el betún y los áridos, lo que permite determinar sus propiedades volumétricas mediante los siguientes procedimientos:

- Contenido de ligante recuperado de la extracción (UNE-EN 12697-3), mediante destilación al vacío.
- Facciones granulométricas que componen la mezcla, determinadas mediante el método de tamizado (UNE-EN 933-1).

2. OBJETIVO Y ALCANCE DEL TRABAJO

Teniendo en cuenta los puntos tratados en el apartado anterior, el objetivo principal de este proyecto es desarrollar una metodología que permita automatizar el control de la producción de mezclas bituminosas, mediante la aplicación de nuevas técnicas de ensayo no destructivas que utilizan la visión artificial y el análisis de imágenes. El desarrollo de este trabajo permitirá, en consecuencia, optimizar los procesos de producción durante la fabricación de mezclas asfálticas, minimizando así las incertidumbres relacionadas con la composición del pavimento durante su colocación.

Para alcanzar con éxito este objetivo, es esencial estudiar y definir las principales técnicas de inspección utilizando equipos de análisis de imágenes. Asimismo, es necesario identificar los parámetros clave del proceso que pueden afectar a la calidad de los resultados obtenidos. Partiendo de estas premisas, se ha definido una metodología de escaneo y análisis de imágenes para las distintas muestras e hipótesis consideradas en el estudio. Es importante señalar que, en función del nivel de precisión

requerido, deben establecerse parámetros específicos tanto en cuanto al tamaño de la muestra como al tipo de escaneo.

Se trata de un proyecto en curso. En la primera fase, se han analizado mediante tomografía diversas muestras de áridos vírgenes con diferentes granulometrías. Esto nos ha permitido evaluar la idoneidad de la metodología desarrollada, al tiempo que se han identificado posibles limitaciones y/o enfoques alternativos. A partir de las conclusiones extraídas hasta el momento, se está llevando a cabo el análisis de mezclas bituminosas, junto con la optimización de la tecnología para obtener los mejores resultados posibles.

Este proyecto está financiado por la Red PIDI del CDTI con el número de expediente IDI-20230536. El trabajo se ha llevado a cabo en colaboración con el CE-NIEH, concretamente a través del Laboratorio de Microtomografía Computada y Microscopía, así como con NOVADEP y CTCON.

3. ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DE MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE PAVIMENTOS

3.1 Aplicación de técnicas de análisis de imágenes en mezclas asfálticas

Las técnicas de inspección y caracterización basadas en el análisis de imágenes permiten extraer de forma rápida y sencilla información de una serie de imágenes capturadas, lo que permite su posterior reproducción mediante sistemas computacionales o algoritmos. Esta tecnología consiste en extraer las propiedades y características de la muestra analizada a partir de diversas imágenes, lo que permite realizar automáticamente tareas como el recuento de objetos, el cálculo de áreas, la medición de distancias y ángulos, o cualquier otro parámetro geométrico requerido.

La tecnología, la implementación y el uso del análisis de imágenes para la caracterización de materiales han evolucionado continuamente a lo largo de los años, hasta alcanzar los avanzados métodos de control actuales. En este sentido, y siguiendo el marco ilustrado en la figura 2 [4], los materiales pueden caracterizarse utilizando una serie de imágenes 2D a partir de las cuales se de-

Nuevas técnicas no destructivas que utilizan el análisis de imágenes para el estudio y la caracterización de mezclas asfálticas

rivan sus características relevantes.

Sin embargo, estos métodos pueden plantear dificultades cuando se aplican a la inspección y caracterización de mezclas bituminosas, debido a la presencia de betún, que recubre los áridos y une la mezcla en una sola masa. Esto dificulta el análisis y el procesamiento de imágenes. Las mezclas asfálticas, debido principalmente al contenido de betún, son muy opacas, y las técnicas tradicionales de inspección 2D solo permiten un análisis superficial o de los límites de la muestra. Además, los tiempos de adquisición y procesamiento de imágenes deben ser lo suficientemente rápidos y precisos como para optimizar y automatizar los procesos de caracterización, en comparación con los métodos tradicionales descritos en las especificaciones PG-3 (Normas Españolas).

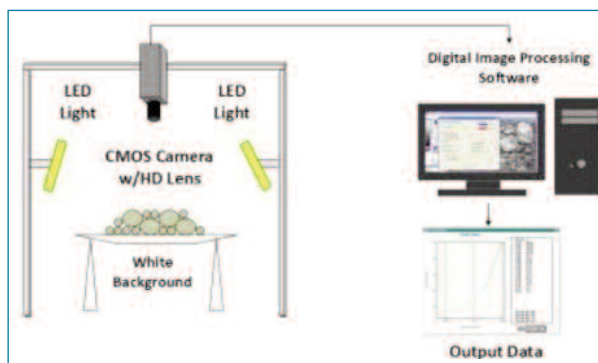


Figura 2. Flujo de trabajo de caracterización basado en el análisis de imágenes 2D para materiales [4]

Por todas estas razones, y con el objetivo de analizar la estructura interna de elementos ópticamente opacos, diversos estudios [5, 6, 7 y 8] han demostrado que el uso de la tecnología de rayos X permite el procesamiento de dichos materiales mediante la captura de una o más imágenes radiográficas, que luego se analizan utilizando un

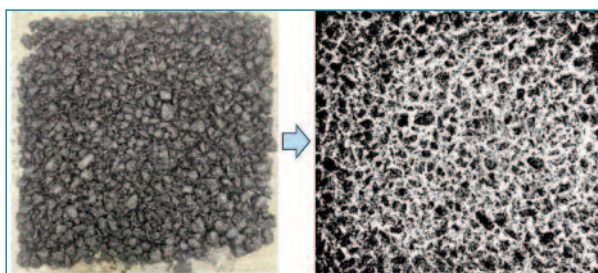


Figura 3. Caracterización basada en imágenes 2D de mezclas bituminosas

software especializado en análisis de imágenes. La intensidad de los rayos X que atraviesan el material se atenúa, y los radiogramas resultantes proporcionan información integrada sobre la densidad de las partículas a lo largo de la trayectoria de penetración.

3.2 Tomografía computarizada por rayos X aplicada a mezclas bituminosas

Basada en la tecnología de rayos X, y con el objetivo de caracterizar una mezcla bituminosa y convertirla en una imagen tridimensional, actualmente se está implementando la microtomografía computarizada de rayos X (micro-CT) [7]. Este método analítico, como técnica de ensayo no destructiva, se utiliza para visualizar el interior de objetos sólidos opacos, proporcionando información digital sobre su estructura interna con un nivel de detalle microscópico. Cada una de las imágenes que componen el análisis se denomina corte, con un grosor específico, y en conjunto forman un volumen.

El principio de esta tecnología, como se ilustra en la figura 4, se basa en una fuente que produce rayos X proyectando electrones sobre el objeto que se va a analizar (la muestra). A medida que los rayos X penetran en la muestra, la radiación se atenúa (es decir, los rayos X se debilitan), principalmente debido a la absorción y/o dispersión dentro del material. Esta atenuación depende de la cantidad y composición de los materiales que componen la muestra.



Figura 4. Flujo de trabajo para la caracterización de muestras mediante tomografía computarizada por rayos X [9]

Después de atravesar la muestra, los rayos X atenuados llegan a un detector, produciendo una imagen 2D con diferentes niveles de gris, denominada corte, con un grosor específico. Estas imágenes 2D se capturan en diferentes pasos de rotación de la muestra, lo que permite su posterior reconstrucción en un modelo volumétrico

3D del objeto analizado [10]. Basándose en este principio, la figura 5 muestra el resultado final de una muestra analizada mediante tomografía de rayos X [11], donde se puede observar uno de los «cortes» o imágenes bidimensionales utilizados para el proceso de reconstrucción.

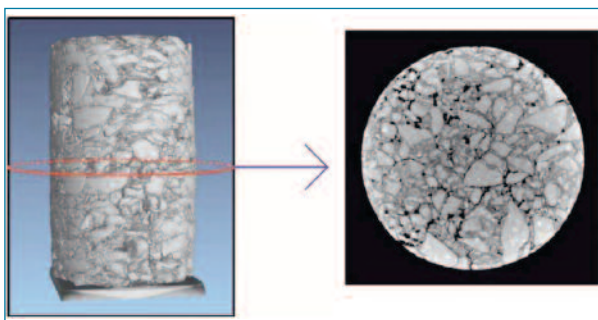


Figura 5. Imagen 3D (izquierda) y 2D (derecha) obtenida mediante tomografía computarizada por rayos X [11]

Una vez procesada la muestra (mediante el uso de algoritmos computacionales y, por consiguiente, software especializado), es posible obtener información muy relevante y precisa sobre las principales características de la mezcla analizada. Entre ellas se incluyen el contenido de huecos, aspectos relacionados con la compactación y propiedades de los áridos, como el tamaño, la forma o la angularidad, así como el contenido de betún.

Sin embargo, la aplicación de técnicas de rayos X para el análisis de imágenes conlleva un alto nivel de complejidad, tanto en términos de equipamiento como de análisis y/o procesamiento posterior, y abarca un amplio campo de aplicación. En la actualidad, existe una amplia gama de equipos y enfoques alternativos disponibles, dependiendo del tipo de análisis requerido y de las características de la muestra. Por lo tanto, para analizar adecuadamente una muestra determinada [12], es esencial comprender sus propiedades fisicoquímicas —como el tamaño, la composición atómica o la densidad de absorción, entre otros parámetros— y, además, es necesario determinar de antemano el nivel de precisión y/o resolución de imagen requerido.

3.3 Parámetros clave que determinan la resolución y la calidad de la imagen

Como se ha comentado a lo largo de este capítulo, uno de los factores que más influye en la calidad final de los resultados es, sin duda, el tipo de muestra que se analiza. En este sentido, la precisión de escaneo del equipo de rayos X viene determinada no solo por los materiales que componen la muestra, sino también por las dimensiones de cada uno de sus elementos, especialmente en el caso de los áridos.

En este contexto, las imágenes obtenidas mediante el escaneo de rayos X representan un mapeo del coeficiente de atenuación de cada uno de los componentes de la muestra, que, en el caso de una mezcla bituminosa, son el betún, los áridos y el aire (para mezclas compactadas). El coeficiente de atenuación de masa es una medida de la intensidad con la que un material o sustancia química absorbe o dispersa la radiación en una longitud de onda determinada. Además de la luz visible, los coeficientes de atenuación de masa también pueden definirse para otros tipos de radiación electromagnética, como los rayos X, el sonido o cualquier otro tipo de haz sujeto a atenuación. La ecuación que define el coeficiente de atenuación de masa se basa fundamentalmente en la ley de Beer-Lambert [13].

Por lo tanto, la capacidad de los rayos X para distinguir entre los distintos materiales que componen una muestra de asfalto depende de sus respectivos coeficientes de atenuación. Del mismo modo, basándose en los coeficientes de atenuación lineal de estos materiales, es posible determinar el nivel de energía de rayos X más adecuado para realizar el escaneo con la mayor precisión posible. Se puede acceder a estos valores a través de la base de datos XCOM: Photon Cross Sections Database, proporcionada por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST).

La figura 6 presenta los coeficientes de atenuación lineal de cada uno de los componentes que conforman una mezcla bituminosa, en función de la energía de los rayos X [14]. Este gráfico muestra una convergencia de los coeficientes de atenuación de los áridos y el betún en niveles de energía en torno a los 200 kV. En consecuencia, sería posible lograr una clara distinción entre el be-

Nuevas técnicas no destructivas que utilizan el análisis de imágenes para el estudio y la caracterización de mezclas asfálticas

tún y los áridos cuando la muestra se escanea a intensidades de energía cercanas a los 200 kV.

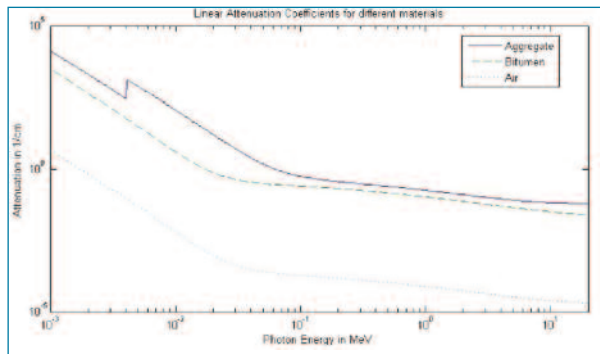


Figura 6. Coeficiente de atenuación lineal para mezclas asfálticas [14]

Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el tamaño de la muestra desempeña un papel crucial en la calidad y resolución finales de la imagen procesada. En este sentido, para muestras relativamente grandes (más de 80 mm), se requieren intensidades de energía más altas para garantizar una penetración adecuada a través del material [14].

En la imagen escaneada final, el material con el coeficiente de atenuación más alto (los áridos) aparecerá con niveles de gris más altos, lo que significa que se verá más claro o brillante. Por el contrario, los materiales con coeficientes de atenuación más bajos (en este caso, los huecos de aire) tendrán niveles de gris más bajos y, por lo tanto, aparecerán más oscuros, casi negros. Por último, el betún, con un coeficiente de atenuación intermedio, presentará un nivel de gris situado entre los dos extremos. Sin embargo, dependiendo de la intensidad de energía utilizada durante el escaneo, los niveles de gris del betún pueden llegar a ser muy similares a los de los áridos, lo que complica significativamente el posterior análisis de la imagen.

4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN

Basándose en los resultados descritos en el capítulo anterior, se ha demostrado que la microtomografía computarizada de rayos X (micro-CT) tiene un gran potencial como técnica de inspección de muestras de asfalto,

ya que se trata de un ensayo no destructivo que permite determinar la estructura interna de las muestras. Además, para procesar las imágenes obtenidas con el equipo de rayos X y caracterizar las muestras de asfalto, es necesario utilizar un software especializado en análisis de imágenes.

El escaneo de las muestras de asfalto se llevó a cabo utilizando un sistema micro-CT VITomeX s 240m, fabricado por GE Sensing & Inspection Technologies. Se trata de un sistema muy versátil, equipado con dos tubos de rayos X: un tubo microfoco de 240 kV con una detectabilidad de 1 μm y un tubo nanofoco de 180 kV con valores de detectabilidad inferiores a 0,5 μm .

Este equipo es capaz de escanear muestras con un diámetro máximo de 200 mm y una longitud de 400 mm, con un peso de hasta 10 kg, lo que significa que las dimensiones de las muestras analizadas se ajustan perfectamente a estas especificaciones. La figura 7 muestra el sistema micro-CT utilizado.

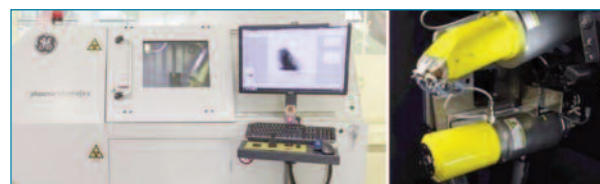


Figura 7. Sistema de microtomografía computarizada (micro-CT)

Una vez escaneadas las muestras, el uso de software de reconstrucción y análisis de imágenes se vuelve esencial para caracterizar y extraer las propiedades clave de las muestras estudiadas. Para ello, se ha utilizado el software Dragonfly, desarrollado por Object Research Systems (ORS).

Entre las diversas herramientas que ofrece el software, una característica especialmente destacable es la capacidad de desarrollar modelos de segmentación mediante Deep Learning, en los que se «entrena» al programa para que reconozca y distinga entre diferentes componentes. Con este entrenamiento, y mediante el uso de Inteligencia Artificial (IA), el software puede generar modelos de segmentación que permiten caracterizar las muestras de asfalto analizadas. En este contexto, y teniendo en cuenta los coeficientes de atenuación

ción de los diferentes elementos que componen una mezcla bituminosa (véase la figura 5), es especialmente importante interpretar correctamente los histogramas de niveles de gris de cada muestra analizada.

Basándose en estas consideraciones, y tal y como se describe en el capítulo 5, con el fin de determinar la gradación de cada muestra o agregado, se han obtenido los siguientes parámetros una vez segmentadas con éxito las imágenes escaneadas:

- Volumen (mm^3): volumen total de cada partícula segmentada. En este caso, se presenta el volumen máximo y mínimo obtenido para cada una.
- Diámetro Feret máximo (mm): distancia máxima entre dos puntos a lo largo de todo el contorno de la partícula analizada.
- Diámetro ortogonal Feret mínimo (mm): distancia mínima entre dos puntos a lo largo del contorno de la partícula, medida perpendicularmente al diámetro Feret máximo.

Como parte de la caracterización de las mezclas asfálticas mediante técnicas de microtomografía computarizada de rayos X, se han seleccionado tres tipos fundamentales de muestras para su análisis. En primer lugar, se estudiarán fracciones de áridos de diferentes granulometrías y composiciones con el fin de validar las capacidades de segmentación y cuantificación volumétrica del sistema. A continuación, se analizarán mezclas completas sin betún, lo que permitirá evaluar la distribución y la compactación de los áridos sin la interferencia del ligante. Por último, se escanearán muestras compactadas de mezclas bituminosas completas, con el objetivo de estudiar su estructura interna, identificar el contenido de huecos y evaluar la interacción entre los áridos y el betún.

5. ANÁLISIS DE ÁRIDOS PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

Siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior, se ha analizado una serie de áridos con diferentes granulometrías y composiciones, lo que ha confirmado la idoneidad de la metodología analítica seleccionada. A continuación se enumeran las diferentes hipótesis analíticas consideradas:

- Áridos porfídicos, 16-22 mm
- Áridos calizos y porfídicos, 6-12 mm
- Áridos calizos y porfídicos, 2-8 mm

- Arena caliza (0-4 mm) y áridos porfídicos (6-12 mm)

Para cada una de las hipótesis analizadas, los principales resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1. Además, la Figura 8 ilustra, a modo de ejemplo, el resultado del proceso de caracterización y segmentación para la gradación de áridos de 16-22 mm.

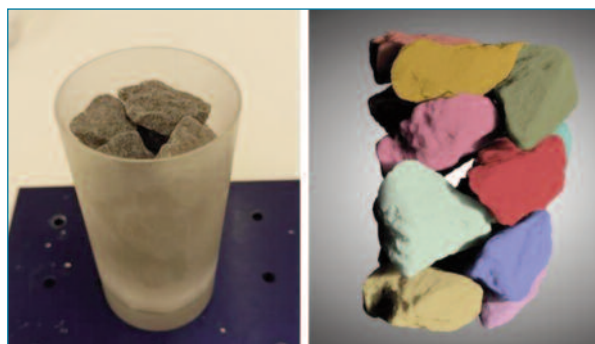


Figura 8. Segmentación 3D de áridos de 16-22 mm

Los resultados obtenidos muestran una fuerte correlación entre el número total de partículas analizadas (para cada una de las fracciones de granulometría consideradas) y sus características geométricas (volumen y diámetro de Feret), lo que confirma la viabilidad y aplicabilidad de la metodología para el análisis de partículas de más de 2 milímetros. Sin embargo, en el caso de la fracción de arena de 0-4 mm, se observó que, cuando se combinan con áridos más gruesos, estas partículas más finas tienden a sedimentarse o segregarse, depositándose la gran mayoría en el fondo de los moldes de ensayo.

Por este motivo, y tal y como se muestra en la figura 9, se puede llevar a cabo una segmentación preliminar de la muestra para diferenciar las partículas de áridos de la arena, ya que presentan valores de nivel de gris distintos. Este análisis inicial permite cuantificar el contenido de partículas finas en la muestra, a lo que puede seguir la segmentación y cuantificación de los áridos más gruesos utilizando la metodología aplicada en los casos anteriores.

Nuevas técnicas no destructivas que utilizan el análisis de imágenes para el estudio y la caracterización de mezclas asfálticas

Tabla 1. Resultados de la segmentación de los áridos

Hipótesis de los áridos	Número total de partículas	Volumen máximo (mm ³)	Volumen mínimo (mm ³)	Diámetro Feret máximo (mm)	Diámetro ortogonal mínimo de Feret (mm)
Agregado 16-22	17	7662	2132	49,7	11,0
Total 6-12	53	10638	65	25,7	3,4
Total 2-8	298	332	2	21,2	1,1

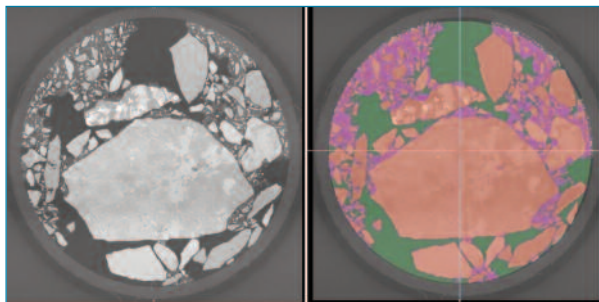


Figura 9. Segmentación en corte 2D de arena de 0-4 mm y áridos de 6-12 mm

En conclusión, esta metodología ha demostrado ser muy eficaz para cuantificar y segmentar con precisión cualquier tipo de árido mayor de 1-2 mm. En el caso de las partículas finas, debido al nivel de resolución y al tamaño de la muestra, no es posible obtener datos detallados más allá de una cuantificación global del contenido total. En el caso de las partículas finas, debido al nivel de resolución y al tamaño de la muestra, no es posible obtener datos detallados más allá de una cuantificación global del contenido total.

El proceso de caracterización sigue generalmente la misma metodología descrita para las muestras que contienen áridos finos, como se muestra en la siguiente imagen. En la primera etapa, a partir del corte tomográfico obtenido, se realiza una binarización para aislar el árido

grueso sin arena, cuyo contenido total puede determinarse volumétricamente. Una vez excluido el árido fino de la muestra, se segmentan los áridos restantes y se clasifican sus tamaños según las fracciones de tamiz de laboratorio estándar.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, a continuación se presentan los principales resultados obtenidos durante el análisis de imágenes de cada muestra de AC16 SURF 35/50 Sc. En primer lugar, la figura 11 muestra el histograma de frecuencia relativa correspondiente a los áridos gruesos presentes en la mezcla. Es importante señalar que estos histogramas no incluyen las partículas de áridos finos, ya que se han tratado como un único volumen total y, por lo tanto, no se pueden discretizar individualmente.

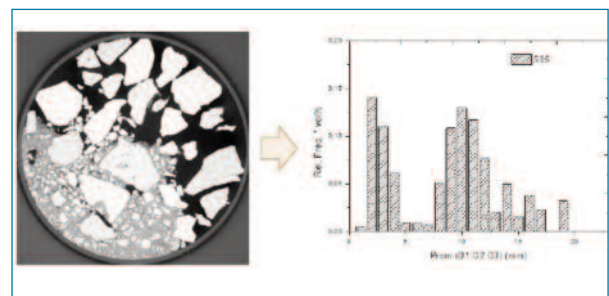


Figura 11. Análisis por tomografía de rayos X de la distribución del tamaño de las partículas de AC16 SURF 35/50 Sc

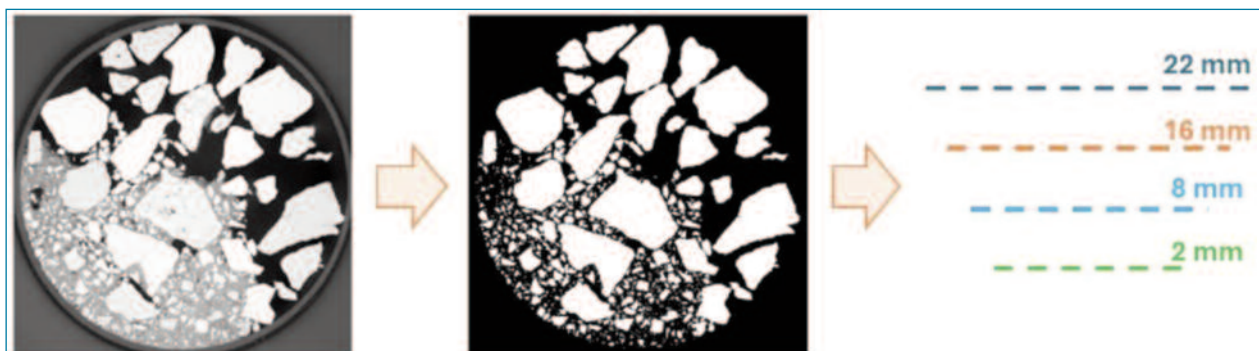


Figura 10. Metodología para el análisis del tamaño de las partículas en mezclas asfálticas

Una vez analizado el histograma de frecuencia relativa, se determinó la curva de gradación de la mezcla, como se muestra en la figura 12. En este caso, existe una clara correspondencia entre las fracciones de gradación reales de la muestra (obtenidas mediante ensayos de laboratorio normalizados) y las derivadas del análisis de imágenes, especialmente para las fracciones de áridos superiores a 8 milímetros.

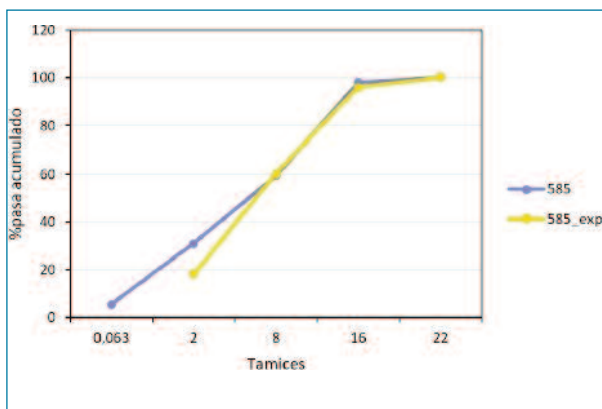


Figura 12. Análisis por tomografía de rayos X de AC16 SURF 35/50 Sc (curva de gradación)

6. ANÁLISIS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA DETERMINAR SUS COMPONENTES PRINCIPALES

Para el estudio de las mezclas asfálticas, se prepararon muestras de losas utilizando un compactador de rodillos (UNE-EN 12697-33), con un espesor de 4 cm. De

estas losas se extrajeron núcleos cilíndricos de aproximadamente 4,50 cm de diámetro. Además, se prepararon moldes impresos en 3D para rellenarlos con la mezcla asfáltica sin necesidad de compactación previa, lo que permitió optimizar los tiempos de trabajo y agilizar los procedimientos de preparación de muestras para el análisis por tomografía de rayos X. Estas muestras se muestran en la figura 13.

A partir de estos núcleos, se ha implementado un enfoque innovador utilizando el software Dragonfly, que permite la visualización y el análisis de alta precisión de imágenes tomográficas. Uno de los principales retos identificados fue la binarización y segmentación de las imágenes, especialmente en muestras con niveles de gris heterogéneos o áridos aglomerados.

Para superar estas limitaciones, se ha desarrollado un modelo de segmentación automática basado en inteligencia artificial, capaz de distinguir con mayor precisión las diferentes fases presentes en la mezcla: áridos, betún con arena, aire y el contorno exterior de la muestra. La figura 14 muestra el flujo de trabajo de procesamiento y segmentación de uno de los cortes obtenidos durante el análisis de la mezcla asfáltica.

Este modelo ha permitido el análisis individual en 2D y 3D de cada árido, mejorando significativamente la precisión de la cuantificación volumétrica y de masa de cada fase. La tabla 2 muestra los principales resultados derivados del análisis realizado.



Figura 13. Preparación de muestras de asfalto para el análisis de tomografía de rayos X

Nuevas técnicas no destructivas que utilizan el análisis de imágenes para el estudio y la caracterización de mezclas asfálticas

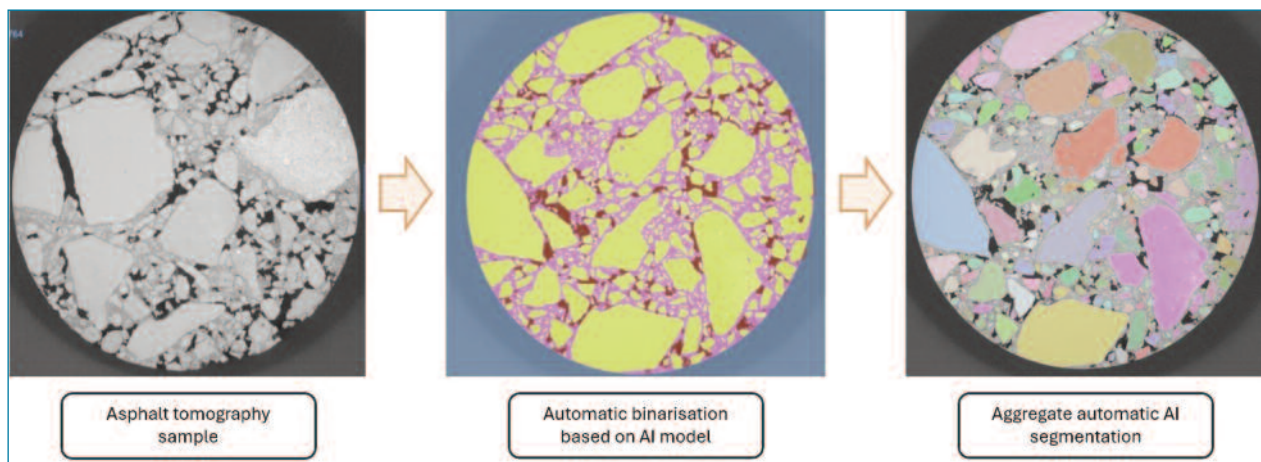


Figura 14. Binarización basada en IA y segmentación automática para la caracterización de un corte representativo de una mezcla asfáltica

Tabla 2. Análisis de caracterización (huecos, áridos y betún) basado en la binarización automática

Contenido de huecos	Contenido de betún + arena	Contenido de áridos gruesos (%)
7,9	29,5	62,6

A partir de estos resultados, se observa que es posible calcular el porcentaje de cada fase analizada. Sin embargo, también se tiende a sobreestimar el contenido de betún (mástique), ya que las partículas de áridos finos y relleno presentan niveles de gris similares a los del betún, lo que dificulta considerablemente la discretización de las partículas. Como parte del trabajo en curso dentro del proyecto, los esfuerzos se centran actualmente en desarrollar una metodología que permita avanzar en el análisis y la segmentación de estas partículas.

En este contexto, se han elaborado nuevas hipótesis variando su contenido de betún (entre el 3,90 % y el 5,50 %) con el objetivo de desarrollar una metodología y un procedimiento capaces de cuantificar la diferencia entre ellas. Partiendo de estas premisas, la figura 15 muestra un corte tomográfico obtenido para cada una de estas hipótesis.

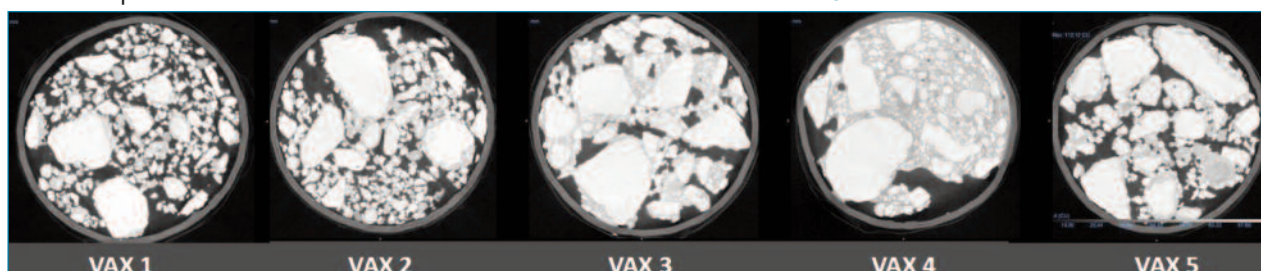


Figura 15. Hipótesis de asfalto con diferente contenido de betún para el análisis CT

Como resultado, se ha determinado una clara correlación entre el aumento de los niveles de gris (derivados del análisis tomográfico) y el contenido de betún de cada muestra, como se muestra en la figura 16. Sin embargo, se observa que la muestra VAX-4 se encuentra fuera del rango de resultados esperado, lo que pone de relieve la necesidad de seguir avanzando en la validación y el desarrollo de esta metodología de segmentación.

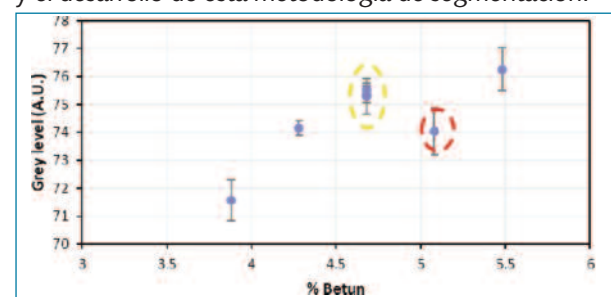


Figura 16. Correlación entre el contenido de betún y el nivel de gris obtenido durante el análisis CT

7. TRABAJO FUTURO

Los esfuerzos futuros se centrarán en dos aspectos fundamentales. En primer lugar, perfeccionar el modelo de segmentación para permitir la discretización automática de las fracciones de gradación de la mezcla, prestando especial atención a los tamaños de áridos superiores a 2 mm. El objetivo es mejorar la precisión y la coherencia del proceso de clasificación dentro de estructuras complejas y heterogéneas.

En segundo lugar, se abordarán cuestiones relacionadas con la estimación del contenido de betún. Aunque los resultados obtenidos hasta ahora son muy prometedores, es evidente que el uso de esta tecnología debe consolidarse mediante el establecimiento de criterios y procedimientos estandarizados. Estos deberían permitir una correlación directa entre el nivel de gris en las imágenes tomográficas y el contenido de betún en la mezcla.

8. CONCLUSIONES

Los resultados presentados a lo largo de este estudio ponen de relieve el gran potencial de la microtomografía computarizada de rayos X (micro-CT) y las técnicas de análisis de imágenes como potentes herramientas para la caracterización no destructiva de mezclas bituminosas. Las metodologías desarrolladas en el marco del proyecto VAXAMA han demostrado su capacidad para obtener reconstrucciones digitales de alta resolución de muestras de asfalto, lo que permite cuantificar con precisión características internas críticas como el contenido de huecos, la distribución de los áridos y el contenido de betún.

La aplicación de modelos de segmentación basados en la inteligencia artificial ha demostrado su eficacia para identificar y diferenciar las distintas fases presentes en las mezclas asfálticas, especialmente en el caso de áridos de tamaño superior a 2 mm. Los flujos de trabajo de análisis en 2D y 3D han mostrado una gran concordancia con los resultados obtenidos mediante métodos de laboratorio convencionales, especialmente en el caso de las fracciones más gruesas.

A pesar de estos resultados prometedores, persisten

ciertos retos, especialmente en relación con la segmentación de los áridos finos y los rellenos, que presentan niveles de gris similares a los del betún y, por lo tanto, complican la separación de fases. No obstante, los primeros resultados sugieren que las variaciones en los niveles de gris de las tomografías se correlacionan con los cambios en el contenido de betún, lo que abre nuevas posibilidades para la cuantificación indirecta de la presencia de ligante en muestras compactadas.

En general, la metodología desarrollada proporciona un marco sólido para una mayor exploración y estandarización. Con un perfeccionamiento continuo, especialmente en lo que respecta a la precisión de la segmentación y la calibración de los parámetros, este enfoque tiene un potencial significativo para mejorar el control de calidad y la optimización de los procesos de producción de asfalto, avanzando hacia un futuro más digital, automatizado y sostenible en la construcción de carreteras.

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento al Centro para el Desarrollo de la Tecnología Industrial (CDTI) por financiar esta investigación con el número de referencia IDI-20230536, en el marco del programa Red PIDI. También queremos expresar nuestro especial agradecimiento al Centro de Investigación Nacional de la Evolución Humana (CENIEH) por su colaboración, en particular al Laboratorio de Microtomografía Computada y Microscopía, y a los equipos de NOVA-DEP.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bock, T. (2015). El futuro de la automatización en la construcción: la disrupción tecnológica y la inminente omnipresencia de la robótica. *Automatización en la construcción*, 59, 113-121.
- [2] Carrasco, J.L. (2020). *Automatización en la construcción: hacia un nuevo modelo productivo*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
- [3] Delgado, J. M. D., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M. y Owolabi, H. (2019). *Robótica y sistemas automatizados en la construcción*:

Nuevas técnicas no destructivas que utilizan el análisis de imágenes para el estudio y la caracterización de mezclas asfálticas

- comprensión de los retos específicos del sector para su adopción. *Revista de ingeniería de la construcción*, 26, 100868.
- [4] Terzi, M. (2018). Análisis de la distribución del tamaño de las partículas en plantas de procesamiento de áridos mediante métodos de procesamiento de imágenes digitales. *Revista Romana de Materiale*, 48(4), 514.
- [5] Carnibella, R. P., Kitchen, M. J. y Fouras, A. (2019). Determinación de la distribución del tamaño de las partículas a partir de una sola imagen de proyección. *Optics express*, 20(14), 15962-15968.
- [6] Guillard, F., Marks, B. y Einav, I. (2017). La radiografía dinámica de rayos X revela el tamaño de las partículas y los campos de orientación de la forma durante el flujo granular. *Informes científicos*, 7(1), 1-11.
- [7] Guo, Y., Chen, X., Chen, B., Wen, R. y Wu, P. (2021). Análisis de la estructura porosa del hormigón celular de la plataforma ferroviaria basado en tomografía computarizada por rayos X. *Construction and Building Materials*, 273, 121773.
- [8] Lv, Q., Huang, W., Zheng, M., Hao, G., Yan, C. y Sun, L. (2020). Investigación del comportamiento de reparación de la unión entre el ligante asfáltico y la masilla mediante ensayos de resistencia de la unión del betún y tomografía computarizada por rayos X. *Construction and Building Materials*, 257, 119504.
- [9] Asociación Española de Materiales Compuestos, AEMAC (2019). Tomografía de rayos X para la caracterización de defectos de procesado y daño por ensayos mecánicos en materiales compuestos reforzados con fibras. Recuperado de: <https://www.aemac.org/webinars/>
- [10] Mahmud, M. Z. H., Hassan, N. A., Hainin, M. R., Ismail, C. R., Jaya, R. P., Warid, M. N. M. y Masros, N. (2021). Caracterización de las propiedades microestructurales y de absorción acústica del asfalto poroso sometido a obstrucción progresiva. *Materiales de construcción y edificación*, 283, 122654.
- [11] Zhang, J., Yang, J., Liu, T., Cai, R. y Yang, R. (2020). Estudio sobre la reconstrucción de la estructura de los huecos de la mezcla asfáltica mediante tomografía computarizada de rayos X y el método de Otsu. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1-13.
- [12] Babout, L., Grudzień, K., Waktola, S., Miśkiewicz, K., Adrien, J. y Maire, E. (2020). Análisis cuantitativo de la dinámica del flujo de materiales granulares orgánicos dentro de un modelo de silo versátil durante experimentos de tomografía por rayos X con lapso de tiempo. *Computadoras y electrónica en la agricultura*, 172, 105346.
- [13] Huang, G., He, J., Zhang, X., Feng, M., Tan, Y., Lv, C., ... y Jin, Z. (2021). Aplicaciones de la ley de Lambert-Beer en la preparación y evaluación del rendimiento del asfalto modificado con grafeno. *Materiales de construcción y edificación*, 273, 121582.
- [14] Onifade, I. (2013). Caracterización de la estructura interna del hormigón asfáltico mediante tomografía computarizada de rayos X.