

1. RESUMEN VAXAMA

CHM Obras e Infraestructuras S.A. es una organización consolidada fruto de una larga trayectoria empresarial, marcada por la dedicación al trabajo bien hecho a lo largo de dos generaciones. Desde sus orígenes, la obra, en sus más diversas variantes, ha sido objeto de su actividad diaria y la mejora constante, su principal meta. La investigación continua, así como la calidad, seguridad y el respeto por el medio ambiente, son los principales retos que CHM ha asimilado a lo largo de los años, integrándola como elementos indispensables dentro de los distintos sistemas productivos que conforman el grupo empresarial.

El futuro de la fabricación y construcción de mezclas asfálticas demanda una mayor calidad, innovación y eficacia. Este nuevo enfoque, definido dentro de los ejes prioritarios de actuación del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, se basa en la búsqueda de la mejora operativa y eficiencia y en trasladar los avances digitales y tecnológicos disponibles para impulsar un transporte por carretera seguro, sostenible y conectado.

La importancia de realización del proyecto VAXAMA radica en la necesidad de plantear una solución que permita automatizar, mediante técnicas de análisis de imagen, el control de producción en la fabricación de mezclas bituminosas. En este contexto, el objetivo general de este proyecto es el de ***desarrollar una metodología que permita la automatización en el proceso de control de producción de mezclas bituminosas, mediante la aplicación de nuevas técnicas de ensayo no destructivas con visión artificial y análisis de imagen***, minimizando las incertidumbres relativas a la composición de la mezcla durante el proceso de puesta en obra.

El principal reto tecnológico que plantea este proyecto es conseguir integrar las técnicas de caracterización mediante visión artificial y análisis de imagen, dentro de la cadena de producción de mezclas bituminosas, tanto a escala de laboratorio como a nivel industrial. Además, será necesario definir los correspondientes parámetros de control e interrelaciones entre los ensayos clásicos normalizados y los nuevos ensayos no destructivos que se definan.

Por consiguiente, la principal motivación que se presenta en este proyecto se basa en aprovechar la tecnología actual de análisis de imagen, cuya aplicación se ha demostrado con éxito en otros sectores productivos, para el desarrollo de una metodología específica en el control de la producción de mezclas asfálticas. Todo ello, a su vez, permitirá a CHM marcar un hito de innovación para la fabricación de mezclas, aumentando su competitividad con respecto al resto de empresas del sector.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto es el de **desarrollar una metodología que permita automatizar el proceso de control de producción de mezclas bituminosas, mediante la aplicación de nuevas técnicas de ensayo no destructivas con visión artificial y análisis de imagen**. La materialización de este proyecto contribuirá, consecuentemente, a una optimización de los procesos productivos durante la fabricación de mezclas asfálticas, minimizando con ello las incertidumbres relativas a la composición de la mezcla durante su puesta en obra.

En la actualidad, el control de la producción de mezclas bituminosas se realiza siguiendo las especificaciones recogidas en el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*. Sin embargo, estos ensayos presentan una serie de inconvenientes relativas a su ejecución; tanto a nivel de tiempo, en los que habitualmente se requiere entre 24 y 48 horas, como en la precisión de los resultados, puesto que se trata de ensayos muy dependientes del factor humano. Además, los métodos actuales no permiten detectar posibles fallos o problemas durante la etapa de producción, lo que puede repercutir de forma notable en el coste de fabricación y en el comportamiento mecánico de la mezcla.

En este contexto, este proyecto plantea una herramienta que permita conocer de forma rápida y precisa la composición de la mezcla, mediante el empleo de técnicas de escáner de rayos X y análisis de imagen. Con esta propuesta se espera poder automatizar los trabajos para el control de calidad en la producción de mezclas en la planta asfáltica, con el objetivo de hacer frente a las limitaciones actuales descritas en el párrafo anterior. Esto puede suponer, a la largo, un importante ahorro económico y medioambiental y que repercutirá muy positivamente, no sólo en las empresas del sector, sino en toda la sociedad en su conjunto.

El objetivo planteado en este proyecto supone una investigación pionera en su campo ya que, en la actualidad, la aplicación de técnicas de visión artificial, mediante escáner de rayos X, para la caracterización de mezclas asfálticas, se encuentra bastante limitada, en entornos de laboratorio y ámbitos meramente académicos, pero no existen evidencias que avalen la aplicación de esta tecnología a gran escala, ni su implantación en un entorno industrial. Por consiguiente, con el desarrollo de este proyecto se plantean una serie de **Objetivos Técnicos Específicos** que se describen a continuación:

- Estudiar las últimas tendencias y técnicas de análisis por visión artificial disponibles, para poder determinar su idoneidad en los procesos de caracterización de mezclas asfálticas.

- Definir los ensayos y parámetros necesarios para poder caracterizar, mediante nuevas técnicas de análisis de imagen, diferentes mezclas asfálticas de forma precisa.
- Verificar la aplicabilidad de la nueva tecnología desarrollada, relacionando los resultados obtenidos mediante ensayos normalizados, según PG-3.
- Desarrollar una metodología que permita la aplicación de nuevas técnicas de caracterización y control de la producción a escalas industriales.
- Verificar los procesos de caracterización para cualquier tipo de mezcla asfáltica. Análisis de sensibilidad de los parámetros y aplicación de posibles correlaciones.

Teniendo en cuenta los objetivos anteriores, uno de los principales retos a los que se enfrenta este proyecto es el de poder integrar esta tecnología en un entorno industrial, dentro de la cadena de producción de una planta asfáltica. En este sentido, se plantean los siguientes

Objetivos Industriales y Económicos:

- Reducir las incertidumbres en el control de producción de mezclas bituminosas, desarrollando una metodología que permita la caracterización de forma automática, anticipando los resultados, a fin de minimizar posibles sobrecostos y retrasos asociados a no conformidades en la ejecución.
- Validar la tecnología desarrollada a escala real, mediante la realización de tramos de prueba, que permita discretizar de forma precisa cualquier tipo de mezcla asfáltica.
- Demostrar la viabilidad y beneficios económicos que la implementación de nuevas técnicas de análisis de imagen puede suponer para las empresas del sector.

Finalmente, la materialización de este proyecto y el desarrollo de nuevas técnicas de análisis de imagen se esperan repercutan de forma muy positiva, no sólo a la empresa, sino a toda la sociedad en su conjunto. Con este planteamiento, se encuadran los siguientes **Objetivos**

Medioambientales y Sociales:

- Minimizar el consumo energético y de materiales, derivado de la optimización de los procesos productivos, al aplicar una metodología de caracterización en tiempo real.
- Reducir las tareas de conservación y mantenimiento de carreteras, al aumentar la durabilidad y prestaciones de las mezclas bituminosas, que doten a los usuarios de una red de carretera más segura y duradera.
- Mejorar la percepción social hacia el sector de la construcción.

3. DESCRIPCIÓN TÉCNICA

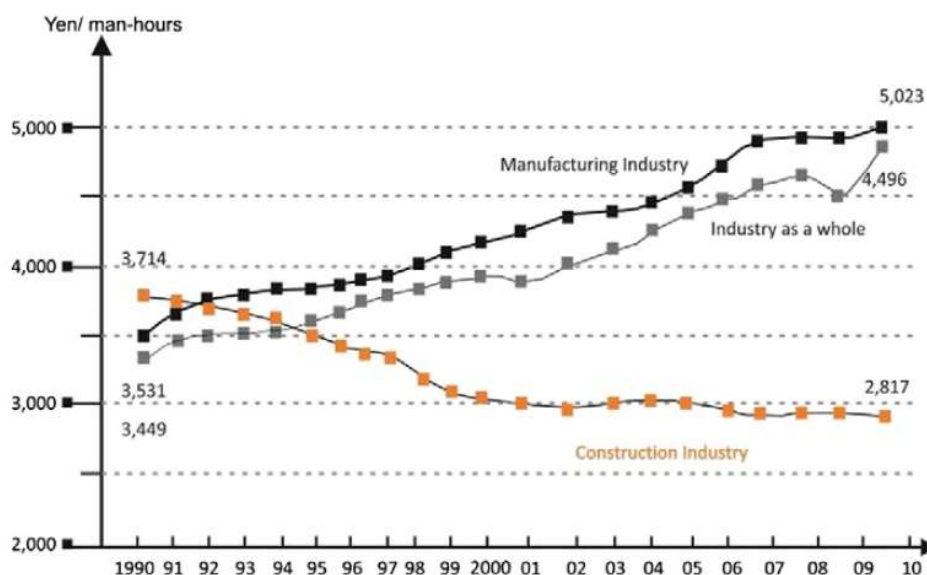
3.1. Antecedentes

Automatización en el sector de la construcción. Situación actual y retos futuros

El sector de la construcción es, en la actualidad, uno de los tejidos productivos más importantes de todo el país. En términos generales, este sector es responsable del 10% de la actividad económica en España y, según datos de la *Conferencia Nacional de Construcción (CNC)*, por cada millón de euros de producción se generan 15 nuevos puestos de trabajos. Además, se trata de un sector muy intensivo en mano de obra, que supone un 5.2% del total del PIB.

Sin embargo, pese a su importancia económica, se trata de uno de los sectores menos productivos y desactualizados. Como consecuencia, durante los últimos años se ha podido observar un importante estancamiento en el crecimiento del sector, debido a que los métodos y sistemas constructivos tradicionales han alcanzado su límite de desarrollo.

Este hecho se puede observar con total claridad en el siguiente gráfico, en el que se ilustra cómo ha ido evolucionando la productividad en el sector con respecto a otras industrias a lo largo de los años, pudiéndose apreciar que al principio de la década de los 90, la construcción era uno de los sectores de mayor productividad. Sin embargo, con el paso de los años, se ha detectado un cambio evidente de tendencia, que sugiera un estancamiento (incluso un retroceso) en la productividad del sector. En este contexto, de acuerdo con Bock (2015), uno de los principales problemas de la construcción es que *“la máxima productividad que se puede alcanzar mediante los sistemas tradicionales de construcción es de un 30%”*.



Evolución en la productividad en el sector de la construcción frente a otros sectores. Fuente: Bock (2015)

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede confirmar que el sector de la construcción se encuentra ante una situación poco sostenible y desactualizada ante las demandas actuales y los criterios mínimos exigibles. En definitiva, esta situación exige dar respuesta a una serie de problemas relativos a la mano de obra y rendimiento industrial y que, en líneas generales, se describen a continuación (Carrasco, 2020):

- El sector de la construcción presenta unas condiciones de trabajo variables, que en determinadas ocasiones pueden suponer un riesgo para la integridad de los trabajadores que la componen.
- En los últimos años, se ha detectado una falta de interés por parte de la población joven en trabajar en el sector. Este hecho, como se está demostrando actualmente, puede suponer un problema de envejecimiento y escasez de la mano de obra cualificada.
- El sector de la construcción es responsable de más de un 25% del total de residuos generados en España y de un 30% de la emisión de gases de efecto invernadero. Además, los procesos constructivos tienen asociados un consumo energético muy importante.

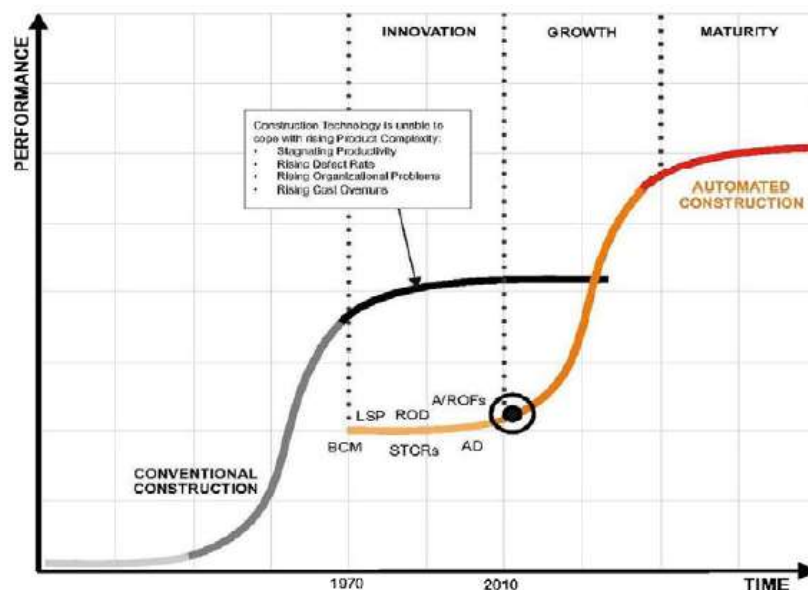
En base a lo anterior, queda de manifiesto que los sistemas convencionales de construcción no permiten alcanzar los requisitos actuales, tanto por la industria, como por los usuarios/clientes; donde se potencia la eficiencia, la productividad, la sostenibilidad y la comunicación en los sistemas productivos. Surge la necesidad, por tanto, de plantear un cambio de paradigma que permita al sector adaptarse a este nuevo planteamiento.

Ante esta situación, la *Automatización en la Construcción* nace como un sistema que permite dar respuesta a las necesidades descritas en el párrafo anterior, transformando la industria y, consecuentemente, abordando las demandas y exigencias actuales (Delgado et al, 2019). Este nuevo planteamiento aborda la actualización del sector sobre tres ejes fundamentales: *Mano de Obra*, *Desarrollo Industrial* y *Sistema Organizativo*, a partir de los cuales se pueden obtener importantes beneficios económicos y medioambientales, según se muestra a continuación:

- La automatización de los sistemas constructivos permite una mayor productividad de los procesos, superior al 30% que se estima en la actualidad.
- Un aumento en la productividad y control de los procesos implica, consecuentemente, una reducción en los costes totales de la obra.
- La optimización de los distintos procesos constructivos permite reducir el consumo de materias primas, así como la producción de residuos. Este hecho, además, implica un importante ahorro en términos energéticos.

- Los procesos automáticos permiten, a su vez, la mejora en la transferencia de información, agilizando y optimizando los tiempos de trabajo y dando lugar a una estructura de proyecto común.

Con todo ello y, para entender la importancia de automatizar los procesos constructivos, se muestra en la imagen siguiente la “Curva S” de Foster aplicada al sector de la construcción. En línea con lo descrito en párrafos anteriores se observa cómo, en los últimos años, se ha producido un estancamiento en la evolución de la productividad obtenida por métodos tradicionales de construcción (líneas de tendencia gris/negro).



Curva S de Foster en el sector de la construcción. Fuente: Bock (2015)

Por el contrario, los sistemas de construcción automatizados (línea naranja/rojo) pueden llegar a ofrecer rendimientos muy superiores a los actuales. En una primera fase de innovación y desarrollo de la tecnología, los rendimientos pueden ser menores a los sistemas tradicionales, pero, una vez implementados los sistemas hasta alcanzar un grado de madurez suficiente o adecuado, la producción es mucho mayor que cualquier metodología convencional.

Aunque la automatización de los procesos constructivos es, todavía, un campo en continuo crecimiento y desarrollo, se espera que a lo largo de los próximos años se consiga alcanzar una fase de crecimiento tal que permita su integración en el sector a gran escala. A este respecto, en los últimos años se ha observado un importante cambio de paradigma, en los que se empiezan a integrar sistemas de construcción automáticos en diferentes ámbitos y procesos productivos.

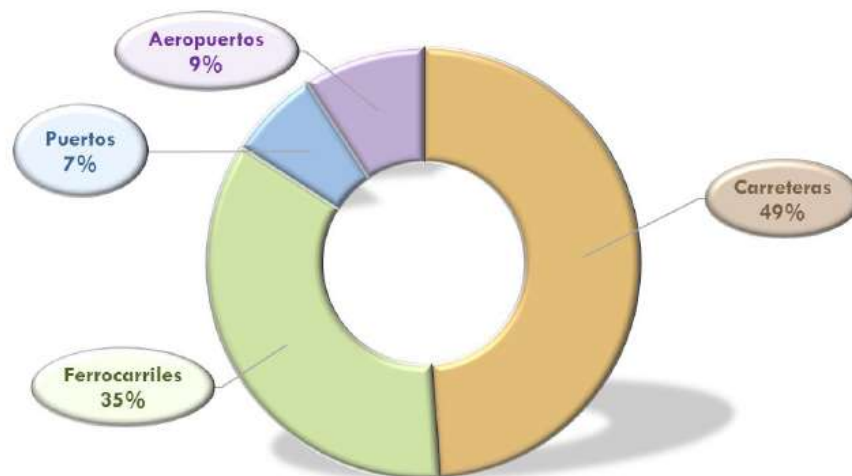
El sector de asfalto y pavimentación no ha sido inherente a este nuevo enfoque productivo y, siguiendo los ejes estratégicos del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, se han podido detectar distintas acciones y nuevos planteamientos que buscan la mejora operativa y eficiencia, reequilibrar el reparto modal del transporte hacia modos menos contaminantes y trasladar los avances digitales y tecnológicos disponibles.

Infraestructuras de transporte por carretera. Importancia en control de la producción

Las infraestructuras de transporte por carretera son elementos imprescindibles en las redes de transporte de un país, esenciales para la vertebración del territorio y mejora de la cohesión social. El transporte por carretera permite el flujo de mercancías y personas por todo el territorio, constituyendo una herramienta fundamental en el desarrollo económico y social.

En la actualidad, según datos de la Dirección General de Carreteras (MITMA), España cuenta con más de 165.000 kilómetros de carreteras, lo cual supone una de las redes más densas de todo el continente europeo. El uso de las carreteras españolas es, sin lugar a duda, el modo de transporte más importante tanto a nivel de viajeros particulares como de mercancías, ya que, de acuerdo con el Informe Anual del Observatorio del Transporte y Logística en España, en el año 2019 se realizaron más de 445.000 millones de viajes por kilómetro y se transportaron más de 1.500 millones de toneladas en movilidad interior.

La importancia del transporte por carreteras se confirma si se observa la distribución en la inversión en infraestructuras de transporte. Tal y como se observa en la siguiente imagen (OTLE, 2021), en el año 2019 la Administración Pública realizó una inversión de más de 7.250 millones de euros, de los cuales, un 49 % se destinó al transporte por carreteras.



Distribución de la inversión en infraestructuras de transporte realizadas por las administraciones públicas en 2019. Fuente: Observatorio del Transporte y Logística en España (2021)

En este contexto de inversión en infraestructuras de transporte por carretera, uno de los principales agentes involucrados en el proceso de ejecución y puesta en obra son las mezclas bituminosas. De acuerdo con el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3), se define como mezcla bituminosa a la combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado que, mezclados a altas temperaturas, forman una película continua en la que todas las partículas quedan envueltas, dando como resultado un producto homogéneo, duradero y resistente. Existen diferentes tipos de mezclas bituminosas en las que, dependiendo del uso de firme, se modifica su composición y propiedades (PROAS, 2013).

Una vez ejecutada la mezcla bituminosa, en la que se ha realizado la envuelta de los áridos con el ligante, se procede a su puesta en obra y compactación, dando lugar a los pavimentos asfálticos y que, en función de los requisitos estructurales y tipo de firme, tendrá un determinado contenido de huecos. El contenido de huecos de la mezcla, junto con las características de los áridos y el betún juegan un papel fundamental en el comportamiento mecánico del pavimento asfáltico.

Con el objetivo de garantizar el óptimo resultado y puesta en obra de las mezclas asfálticas desarrolladas, resulta imprescindible realizar una adecuada caracterización de los materiales que la conforman. Esto es, el contenido y características de los áridos, el contenido y tipología de betún empleado y el contenido final de huecos de la mezcla compactada.

En primer lugar, en lo relativo a los áridos, se trata de aquellas partículas que constituyen el esqueleto mineral de las mezclas bituminosas (PROAS, 2013), debiendo ser resistentes a la fragmentación y al desgaste ocasionado por el tráfico. Por otro lado, se entiende como ligante hidrocarbonado como aquellos aglomerantes constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos, donde el más habitual en la ejecución de carreteras es el betún asfáltico. Finalmente, el contenido de huecos es un claro indicador de si la compactación ha alcanzado los valores de diseño preestablecidos

Como se ha comentado previamente, la caracterización de los materiales que conforman las mezclas bituminosas es esencial para poder garantizar el óptimo resultado y puesta en obra de la mezcla en cuestión. Este proceso de caracterización de las mezclas asfálticas consiste en la determinación de las propiedades físicas, químicas, mecánicas e hidráulicas con el objetivo de evaluar su durabilidad y funcionalidad. Siguiendo las especificaciones recogidas en el PG-3, es imprescindible realizar un Control de Producción y de Calidad en la ejecución y puesta en obra de las mezclas bituminosas, según lo definido en su Artículo 542.9.

Por consiguiente, sobre las mezclas ya fabricadas es necesario realizar ensayos periódicos que permitan determinar el contenido de ligante y de la granulometría del árido, siguiendo las especificaciones normativas recogidas en la UNE-EN. Adicionalmente, se debe verificar que la muestra ensayada cumple las características mecánicas y el contenido de huecos con el que fueron diseñados. En base a estas consideraciones, se describen a continuación los procedimientos normativos recogidos en el PG-3, para la realización de los ensayos de caracterización de cada uno de los parámetros anteriores.

➤ **Determinación de la dosificación de ligante**

Para obtener el contenido de ligante de una mezcla bituminosa, la norma recoge dos metodologías de ensayo en función de los equipos y/o procedimientos utilizados y que se describen a continuación:

- Método de ensayo para la determinación del contenido de ligante soluble, según norma UNE-EN 12697-1, a partir del cual el betún es separado de la mezcla por disolución en diclorometano (u otro disolvente adecuado). Los sólidos insolubles son retirados de la solución y el ligante es recuperado mediante destilador en vacío, utilizando un evaporador rotativo.
- Método de ensayos para la determinación del contenido de ligante mediante la ignición en un horno (UNE-EN 12697-39). En este caso, la mezcla bituminosa se introduce en un horno estabilizado a 110°C, con el objetivo de realizar la combustión del betún que lleva la mezcla, quedando el árido limpio. El contenido de ligante se calcula, por tanto, a partir de la diferencia de masas en la mezcla.

➤ **Determinación del contenido granulométrico de los áridos extraídos (UNE-EN 12697-2)**

El principio general de este ensayo consiste en la determinación de la distribución granulométrica de los áridos que conforman una mezcla bituminosa determinada, mediante tamizado y pesado. Este procedimiento de ensayo debe realizarse después de la extracción de ligante, según lo descrito anteriormente. Con todo ello, se muestra en la siguiente imagen el proceso de tamizado de los áridos que conforman la mezcla bituminosa, a fin de determinar su curva granulométrica, en función de la cantidad de material que quede retenido.



Tamices para obtención de granulometría en mezclas bituminosas s/Norma UNE-EN 12697-2

Teniendo en cuenta la imagen anterior, se observa como durante el proceso de fabricación de mezclas bituminosas, los áridos se distribuyen en fracciones granulométricas claramente diferenciadas y cuyo porcentaje viene establecido según el tipo de mezcla a suministrar. Con todo ello, en función de las distintas fracciones obtenidas, los áridos se pueden distribuir del siguiente modo:

- *Árido grueso*: parte del árido total retenido en el tamiz de 2 mm y que constituye el esqueleto mineral de la mezcla.
- *Árido fino*: parte del árido total retenido que pasa por el tamiz de 2 mm y que retenido por el tamiz de 0.063 mm.
- *Polvo mineral – filler*: parte del árido total que pasa por el tamiz 0.063 mm.

➤ **Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8)**

El contenido de huecos de la mezcla asfáltica, ya compactada se calcula utilizando los parámetros de densidad máxima y densidad aparente de una probeta compactada, según se describe en la norma UNE-EN 12697-6, los cuales se determinan a partir de la masa de la probeta, su volumen y/o geometría.

Teniendo en cuenta el procedimiento de cada uno de los ensayos normalizados, descritos anteriormente y utilizados para determinar la composición de una mezcla asfáltica determinada, se puede concluir que estos métodos no están automatizados y que, por tanto, requieren de una importante inversión de tiempo y de mano de obra para su correcta caracterización. Además, tal y como reflejan numerosos estudios (Zhang et al., 2020), las técnicas de caracterización tradicionales presentan ciertas incertidumbre y problemas durante su ejecución, que pueden dar lugar a posibles fallos en los resultados finales obtenidos.

En este contexto, el control de calidad en la producción de mezclas bituminosas adquiere una importancia capital en el proceso de ejecución de una carretera; no sólo desde un punto de vista meramente económico, en lo que a posibles pérdidas económicas se refiere, sino también en cuestiones relativas a posibles retrasos en los plazos de ejecución, mayor consumo de materiales y energético durante la producción o una mayor cantidad de residuos, entre otros aspectos.

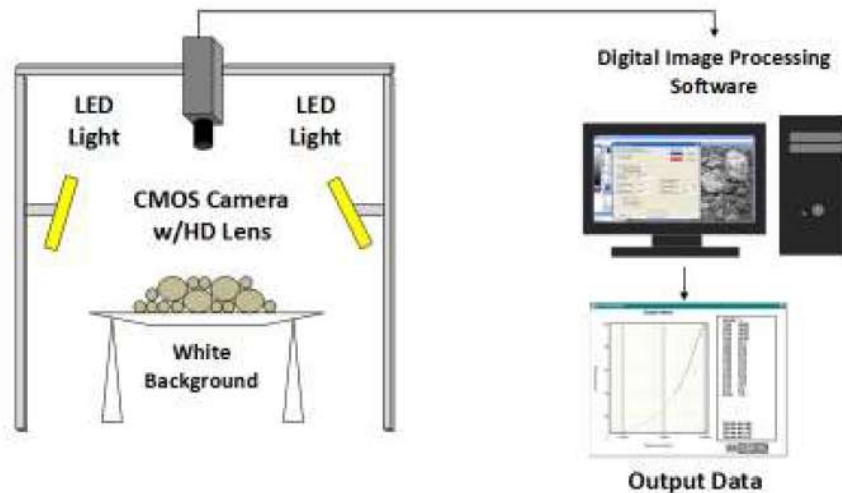
Por consiguiente, en base a lo desarrollado a lo largo de este capítulo, es evidente que la automatización de los procesos productivos en el control de calidad de mezclas asfálticas presenta un gran potencial de aplicación, con importantes beneficios para las empresas del sector y la sociedad en su conjunto. En este contexto, algunos autores (Babout et al, 2020) muestran una nueva tendencia relativa al uso de **técnicas no destructivas** con sistemas de análisis de imagen, mediante el uso de algoritmos computacionales, para el desarrollo de las tareas de caracterización y control de calidad.

3.2. Análisis de Imagen para la Caracterización de Mezclas Bituminosas

Estado actual de la técnica

Las técnicas de inspección y caracterización mediante análisis de imagen permiten extraer, de forma fácil y rápida, la información de una serie de imágenes captadas, de forma que permita su reproducción posterior mediante sistemas o algoritmos computacionales. Esta tecnología consiste, por tanto, en la extracción de las propiedades y características de la muestra ensayada a partir de distintas imágenes, pudiéndose realizar un recuento automático en la investigación, cálculo de áreas, distancia, ángulos o cualquier otra característica geométrica que se necesite obtener.

La tecnología, implementación y uso del análisis de imagen para la caracterización de materiales ha sufrido una continua evolución con el paso de los años hasta llegar a los métodos de control actuales. En este sentido, siguiendo el esquema mostrado en la imagen siguiente, los materiales se pueden caracterizar en función de una serie de imágenes en 2D, a partir de las cuales se obtienen las características de estos.



Esquema caracterización materiales mediante análisis de imagen 2D. Fuente: Terzi (2018)

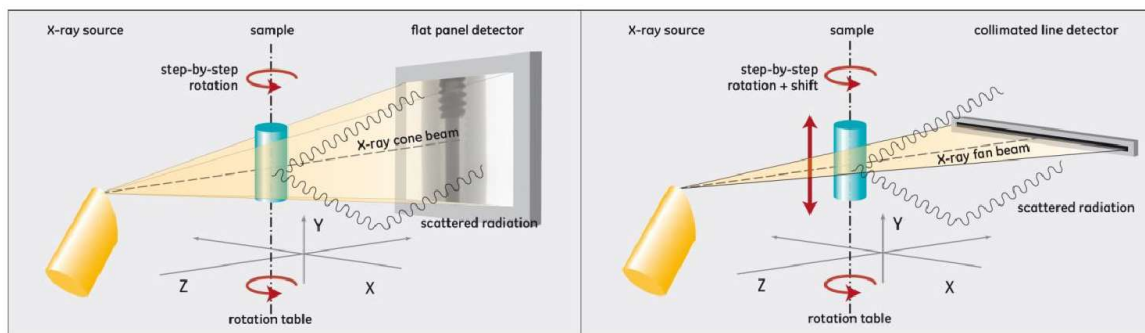
Sin embargo, estos métodos pueden suponer un problema en la inspección y caracterización de mezclas bituminosas, ya que la presencia de betún, que envuelve los áridos y hace que la mezcla sea un “*todo uno*”, dificulta el análisis y procesamiento de las imágenes analizadas. Las mezclas asfálticas, debido fundamentalmente a la presencia de betún, son muy opacas y las técnicas de inspección en 2D sólo permiten un análisis de “*frontera*” o de su contorno exterior. Además, el tiempo de adquisición y procesamiento de las imágenes deben ser lo suficientemente rápidas y precisas a fin de solventar la problemática descrita por el uso de ensayos normalizados

Por todo ello, con el objetivo de analizar la estructura interna de elementos ópticamente opacos, diversos estudios (Carnibella et al, 2019; Guillard et al, 2017; Guo et al, 2021 o Lv at al, 2020 entre otros) han demostrado que el uso de la tecnología de **rayos X** permite procesar este tipo de materiales, tomando una o varias radiografías para, posteriormente, analizarla mediante un software específico de análisis de imagen. La intensidad de los rayos X que atraviesa la materia se atenúa y los radiogramas representan una información integrada de la densidad de las partículas a lo largo de la trayectoria de penetración.

Escáner de Rayos X para la caracterización de mezclas bituminosas

A partir de la tecnología de rayos X, según distintas fuentes bibliográficas (Gou et al, 2021), con el objetivo de poder caracterizar una mezcla bituminosa y convertirla en una imagen tridimensional, se está implementando el uso de microtomografía computarizada mediante rayos X (*micro CT x-ray technology*). Esta metodología de análisis, como **técnica de ensayo no destructiva**, se utiliza para visualizar el interior de un objeto sólido opaco, con el objetivo de obtener información digital de su estructura interna a un nivel de detalle microscópico. Cada una de las imágenes que conforman el análisis se denomina corte, con un grosor determinado, y que, por tanto, constituye un volumen.

El principio de esta tecnología, tal y como se muestra en la siguiente imagen, se basa en que una fuente (*source*) produce rayos X, proyectando electrones sobre el objeto en cuestión a analizar (*sample*). A medida que los rayos X penetran en la muestra, se produce una atenuación de esta radiación (los rayos X se hacen más débiles), debido fundamentalmente a la absorción y/o dispersión de la muestra analizada, que viene determinada por la cantidad y composición de los materiales que la conforman.



Proceso de caracterización de muestras mediante CT de Rayos X. Fuente: AEMAC (2019)

Después de penetrar en la pieza, los rayos X atenuados incidirán en un detector, dando lugar a una imagen en 2D con distintos niveles de gris, denominada corte, con un espesor/grosor determinado. Las imágenes en 2D se toman para distintos pasos de rotación de la muestra, a partir del cual se podrá realizar una reconstrucción de estas imágenes, dando lugar a un modelo volumétrico en 3D del objeto analizado (Mahmud et al, 2021). Teniendo en cuenta este principio, se muestra a continuación el resultado final de una probeta ensayada analizada mediante tomografía de rayos X (Zhang et al, 2020), pudiéndose observar una de las “*rebanadas*” o imágenes bidimensionales tomadas para su posterior reconstrucción.

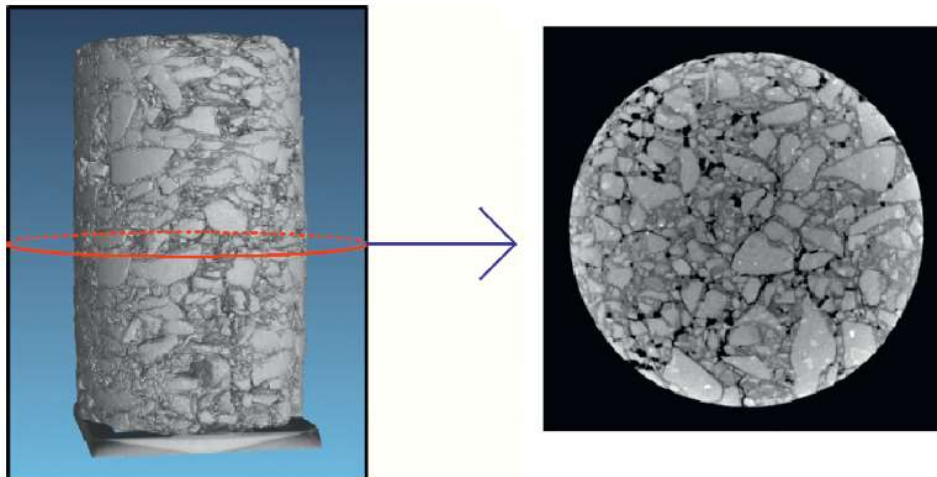


Imagen tridimensional (izquierda) y bidimensional (derecha) analizada mediante tecnología de tomografía de rayos-X. Fuente: Zhang. et al (2020)

Una vez procesada la probeta en cuestión, mediante el empleo de algoritmos computacionales y, en consecuencia, un software específico; se puede obtener información muy relevante y precisa sobre las principales características que conforman la mezcla analizada; como pueden ser el contenido de huecos, aspectos relacionados con la compactación, características de los áridos (tamaño, forma o angularidad) o el contenido de betún.

La aplicación de técnicas de rayos X para el análisis de imagen, independientemente de lo anterior, implica un alto grado de complejidad (tanto en equipamiento como en el análisis y/o procesamiento posterior), con un campo de actuación muy amplio. Existen en la actualidad múltiples equipos y alternativas disponibles, en función del tipo de análisis y de las características de la muestra. Por todo ello, con el objetivo de poder analizar correctamente una determinada muestra, tal y como recoge Babout et al (2020), es muy importante conocer sus propiedades fisicoquímicas (tamaño, naturaleza atómica o densidad de absorción, entre otros parámetros) y, además, resulta necesario conocer de antemano el nivel de precisión y/o resolución de la imagen que se pretende conseguir.

Aspectos – Parámetros a considerar

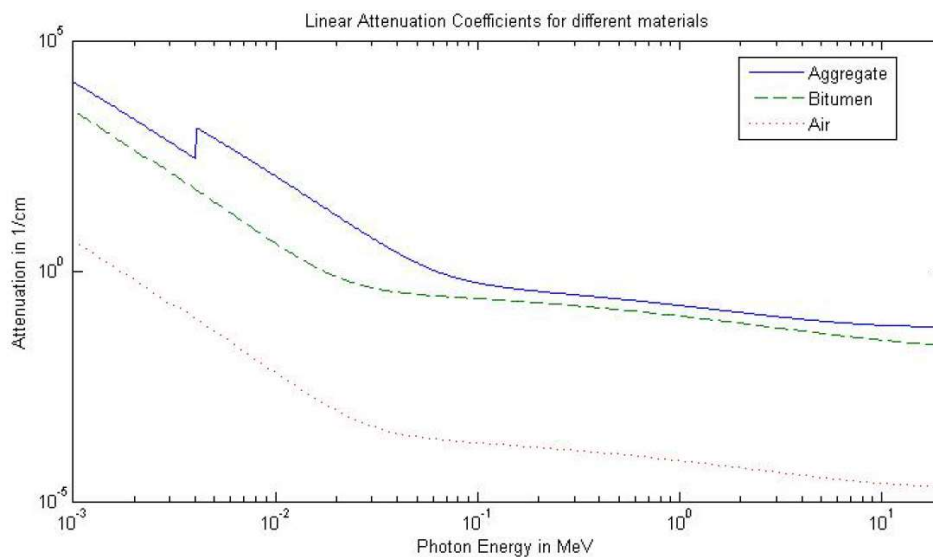
Como se ha comentado a lo largo de este capítulo, uno de los aspectos con mayor incidencia en la calidad final de los resultados es, sin lugar a duda, el tipo de muestra a analizar. En este sentido, la precisión en el escaneo del equipo de rayos X vendrá definida, no sólo por los materiales que componen la muestra, sino también por las dimensiones de cada uno los elementos que la conforman, especialmente en el caso de los áridos.

En este contexto, las imágenes obtenidas mediante un escáner de rayos X son una cartografía o mapeado del coeficiente de atenuación de cada uno de sus componentes, que en el caso de una mezcla bituminosa son betún, áridos y aire (para mezclas compactadas).

El coeficiente de atenuación de la masa es una medida de la intensidad con la que un material o sustancia química absorbe o dispersa la luz a una determinada longitud de onda. Además de la luz visible, los coeficientes de atenuación de masa pueden definirse para otras radiaciones electromagnéticas, como son los rayos X, el sonido, o cualquier otro haz que se atenúe. La ecuación que define el coeficiente de atenuación de masa se basa, fundamentalmente, en la ley de Beer-Lambert (Huang et al, 2021).

Por tanto, la capacidad de los rayos X para diferenciar los distintos materiales que conforman una probeta asfáltica depende de sus respectivos coeficientes de atenuación. Asimismo, en función de los coeficientes de atenuación lineal de estos materiales, se puede determinar el nivel de energía más adecuado para realizar el escaneo con la mayor precisión (Elsafi et al, 2021). Estos valores, pueden obtenerse accediendo a la base de datos de XCOM: Photon Cross Sections Database, del National Institute of Standards and Technology (NIST).

Se muestra, en la siguiente imagen, los coeficientes de atenuación lineal de cada uno de los elementos que conforman una mezcla bituminosa, en función de la energía de rayos X (Onifade, 2013). En este gráfico, se observa una convergencia en los coeficientes de atenuación de los áridos y el betún para intensidades de energía en torno a los 200kV. Por consiguiente, se podría conseguir una buena distinción entre el betún y árido cuando la muestra se escanea con intensidades en torno a los 200kV.



Coeficiente lineal de atenuación para mezclas bituminosas. Fuente: Onifade, I. (2013)

Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, el tamaño de la muestra juega un papel fundamental en la calidad y resolución final de la imagen procesada. En este sentido, para muestras relativamente grandes (superiores a 80 mm), se requieren mayores intensidades de energía para poder penetrar a través de la muestra (Onifade, 2013).

En la imagen final escaneada, el material con mayor coeficiente de atenuación (los áridos) tendrán valores más altos de nivel de gris, es decir, tendrán un aspecto más claro o brillante. Por otro lado, los materiales con un menor coeficiente de atenuación (en este caso, los huecos), tendrán niveles más bajos de gris, por lo que las imágenes lo reflejarán con un aspecto más oscuro, casi negro. Finalmente, el betún, con un coeficiente de atenuación intermedio, tendrá un nivel de gris entre ambos límites. No obstante, en función de la intensidad de energía que se utilice en el escaneo, los niveles de grises para el betún podrán llegar a ser muy similares a los de los áridos, complicando de forma notable el análisis de imagen posterior.

Con todo ello y, considerando el principio de funcionamiento de la tecnología de escáner de rayos X descrito a lo largo de este capítulo, para asegurar un correcto análisis e interpretación de los datos y resultados, es imprescindible controlar de forma precisa una gran cantidad de parámetros y factores que intervienen en el proceso, no sólo relativos a la muestra analizada. En este sentido, una vez definida el grado de precisión esperado, se deberá desarrollar una metodología de análisis adecuada, en la que se establezcan los equipos y parámetros implicados en el análisis, que permitan analizar una muestra asfáltica siguiendo los objetivos y necesidades planteadas en el proyecto.

3.3. Principales retos tecnológicos

Teniendo en cuenta lo anterior, y pese al potencial que presenta el escáner con rayos X en el análisis y caracterización de materiales, lo cierto es que esta tecnología no está lo suficientemente asentada en el sector, tanto desde un punto de vista meramente académico (en lo que a publicación de estudios/artículos se refiere) como a nivel industrial. Por tanto, este proyecto tiene como principal reto tecnológico **establecer una relación entre los métodos convencionales de ensayos de las mezclas bituminosas y nuevas técnicas de caracterización mediante rayos X**, con el fin de establecer una nueva metodología para el control de calidad de la fabricación de las mezclas bituminosas, y poder solucionar los problemas actuales.

Por consiguiente y, para desarrollar con éxito los objetivos planteados, es necesario abordar una serie de retos tecnológicos que exponen a continuación:

- Desarrollar nuevos métodos de caracterización de mezclas bituminosas, mediante ensayos no destructivos, que permitan automatizar el control de producción.
- Definir las técnicas de inspección y los parámetros de análisis que permitan obtener un nivel de precisión y resultados acordes a los objetivos planteados.
- Definir el proceso de producción de mezclas asfáltica para poder garantizar su correcta caracterización, en función de los requerimientos de los equipos y métodos de análisis desarrollados.
- Validar los resultados y metodología desarrollada, estableciendo posibles adaptaciones y correlaciones con los ensayos normalizados de caracterización.
- Integrar la nueva metodología de análisis dentro de la cadena de producción de mezclas bituminosas, tanto a nivel de laboratorio como a escala industrial, en planta asfáltica.

De materializarse los objetivos y retos planteados en este proyecto, se prevé conseguir un aumento en la competitiva de CHM con respecto al resto de empresas del sector, al ofrecer una tecnología que se adapta a las nuevas exigencias y necesidades que demandan los nuevos enfoques en la producción y ejecución de pavimentos asfálticos. Por todo ello, teniendo en cuenta los principales retos a los que se enfrenta este proyecto, la siguiente tabla recoge, a modo de resumen, las principales líneas de actuación previstas en el proyecto.

RIESGO TECNOLÓGICO	PUNTO CRÍTICO – PROBLEMÁTICA
Definir las técnicas de inspección con rayos X para el análisis de mezclas bituminosas.	Se investigarán las distintas técnicas y métodos de análisis, así como los parámetros de diseño, que permitan obtener de forma precisa los distintos elementos que conforman la mezcla bituminosa.
Definir los parámetros de producción de mezclas bituminosas para asegurar un correcto análisis y caracterización.	Se deberá definir una metodología de caracterización que se integren dentro de los procesos de producción de mezclas bituminosas, tanto a nivel de laboratorio como a escala industrial, que permita su análisis de forma precisa y automatizada.
Adaptación de los equipos a nivel de laboratorio y a escala industrial	La metodología caracterización desarrollada deberá integrarse dentro de los procesos productivos de mezclas asfálticas, tanto a nivel de laboratorio como a escala industrial.