

Rubio-Gómez, M.C., Moreno-Navarro, F., Pastrana-Zambrana, M.C., Jiménez-Espada, A. (2024). Implementación de MASAI (Materiales Asfálticos, Sostenibles, Automatizados e Inteligentes) en Proyectos y Obras de Carreteras en España. *Actas de congreso del IX Congreso Iberoamericano de Gestión y tecnología de la Construcción (IX ELAGEC2024)*.

IMPLEMENTACIÓN DE MASAI (MATERIALES ASFÁLTICOS, SOSTENIBLES, AUTOMATIZADOS E INTELIGENTES) EN PROYECTOS Y OBRAS DE CARRETERAS EN ESPAÑA.

M. Carmen Rubio-Gómez¹ – mcrubio@ugr.es

Fernando Moreno-Navarro¹ – fmoreno@ugr.es

M Carmen Pastrana² – mariac.pastrana@juntadeandalucia.es

Alejandro Jiménez-Espada² – Alejandro.jimenezespada@juntadeandalucia.es

¹*LabIC.UGR, E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Granada, Granada, España.*

²*Consejería de Fomento, Vivienda y Articulación del Territorio, Junta de Andalucía, Sevilla, España.*

RESUMEN

Los MASAI (Materiales Asfálticos Sostenibles, Automatizados e Inteligentes) son materiales concebidos y diseñados para la creación de infraestructuras de carreteras más duraderas, sostenibles y adaptadas a las nuevas demandas tecnológicas de administradores y usuarios. Su implementación en la red de carreteras autonómica de Andalucía (España) está contribuyendo a la implementación de las innovaciones más importantes en materia de firmes de carretera en nuestro país. Gracias a sus ventajas ambientales y técnicas, así como al trabajo colaborativo realizado entre la Consejería de Fomento, de la Junta de Andalucía y el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR), se ha conseguido que la Unión Europea financie su uso en la rehabilitación de firmes de las carreteras de Andalucía. Esto ha supuesto un hito sin precedentes en el sector, convirtiendo a MASAI en un motor económico para la ingeniería de carreteras y el desarrollo territorial, favoreciendo la creación de puestos de trabajo, el crecimiento y modernización de empresas. Esta comunicación muestra las fases de implementación de MASAI, desde su integración a nivel de proyecto, hasta su diseño, fabricación, puesta en obra y seguimiento durante su vida de servicio.

PALABRAS CLAVE

MASAI; mezclas bituminosas; sostenibilidad; economía circular, carreteras.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, ha tenido lugar un importante desarrollo de tecnología en el sector de la ingeniería de carreteras, especialmente en lo relativo a conectividad y automatización situándonos en lo que puede considerarse la cuarta revolución industrial (Pompigna & Mauro 2022; Luo & Yang 202; Zhao & Wu 2015). No obstante, como gran diferencia en los condicionantes de etapas anteriores, la implementación de estas tecnologías avanzadas va a estar marcada por una gran concienciación y preocupación de la sociedad por el medio ambiente, en donde la generación de emisiones, residuos, y otros contaminantes ambientales no son admisibles. Este paradigma, el cambio del modelo tradicional de economía lineal a una economía circular, requiere del estudio e implementación de nuevos materiales y procesos productivos que minimicen el consumo de recursos naturales, la generación de residuos y todo ello desde el máximo respeto medioambiental, teniendo muy presente los efectos del cambio climático y proporcionando los niveles de seguridad y confort adecuados, que den respuesta a las demandas de transporte de la sociedad en sus diferentes entornos.

A pesar de los esfuerzos y avances tecnológicos conseguidos (Tarsi et al. 2020; Picado-Santos et al. 2020; Rubio et al. 2012), el sector de la construcción continúa en la mayor parte de los casos desarrollándose bajo el mismo modelo tradicional del siglo pasado. Este modelo tradicional, en la construcción de carreteras, y en particular las carreteras con pavimentos asfálticos, continúa consumiendo recursos naturales (áridos, ligantes asfálticos, etc.), generando emisiones contaminantes a la atmósfera, derivadas en gran parte de las altas temperaturas de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas y consumiendo combustibles fósiles como recursos energéticos. A modo de ejemplo, aproximadamente el 94% de los materiales constituyentes de los pavimentos asfálticos convencionales son áridos (que se obtienen de la explotación de canteras), el resto lo constituyen el ligante asfáltico, polvo mineral y eventualmente aditivos; además se fabrican a temperaturas entorno a los 160 °C. Actualmente las tendencias más sostenibles abogan por la reducción de temperatura de fabricación, la inclusión de material procedente del fresado de pavimentos deteriorados (RAP) en sustitución de áridos procedentes de canteras, el uso de ligantes más sostenibles (no derivados del petróleo), así como el empleo de modificadores sostenibles (como el polvo de neumáticos al final de su vida útil); todo ello sin disminuir las prestaciones mecánicas del material, para no reducir su vida de servicio. En este contexto, las mezclas semicalientes (fabricadas a temperaturas inferiores a 140°C) y el empleo de RAP proporcionan un buen balance entre sostenibilidad y durabilidad (Gruber & Hofko (2023); Santolini et al. (2024)).

Por otra parte, la avanzada edad de las infraestructuras viarias requiere de planes urgentes de rehabilitación y mantenimiento de estas, lo que además supone grandes molestias para los usuarios y la generación de residuos derivados de las obras y actuaciones de mejora de pavimentos.

Este modelo, resta eficiencia al sector de la construcción de carreteras, afecta directamente a la productividad, y lo hace más vulnerable frente a eventuales situaciones de riesgo como problemas de suministro o volatilidad en los precios de materias primas entre otros.

Bajo estas premisas, y con el objetivo de promover la implementación de materiales y tecnologías sostenibles y avanzadas en la construcción y rehabilitación pavimentos asfálticos, el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (LabIC.UGR) ha desarrollado un material innovador denominado MASAI (Materiales Asfálticos Sostenibles, Automatizados e Inteligentes), que ha sido implementado recientemente en las carreteras de Andalucía (España).

El objetivo de esta publicación es dar a conocer los materiales MASAI, sus características y metodologías seguida en la implementación de los mismos.

METODOLOGÍA

En esta sección se definen los materiales MASAI y sus principales características, descritas con mayor detalle por Moreno-Navarro et al. (2023).

En primer lugar, MASAI no es una receta única; se trata de una mezcla asfáltica a utilizar en firmes de carreteras (cualquier capa: rodadura, intermedia y/o base), fabricada siempre a temperaturas que no superen los 140°C y que presenten altas prestaciones mecánicas y funcionales (para ello se evaluara su respuesta mecánica frente a fenómenos como deformaciones plásticas, sensibilidad al agua, rigidez, resistencia a fisuración por fatiga, o resistencia al envejecimiento entre otros). La reducción de temperatura puede obtenerse mediante el uso de aditivos (tensoactivos o de otra naturaleza) o mediante espumación. Estas son las dos características mínimas que una mezcla asfáltica debe reunir para ser considerada MASAI. A partir de ahí, dependiendo de otras características, obtendrá diferentes clasificaciones, que se resumen a continuación:

1. Se trata de un material de altas prestaciones mecánicas y funcionales
2. Su fabricación se realizará siempre a temperaturas inferiores a 140°C
3. Se utilizan modificadores sostenibles (polvo de neumático al final de su vida útil (PNFVU), polietileno, etc.) por vía húmeda o seca.
4. Reutilización de al menos un 20% sobre el peso de la mezcla asfáltica de material procedente del fresado de pavimentos deteriorados, o un mínimo del 5% de otros residuos procedentes de la industria local.
5. Incorporación de sensores u otros dispositivos con la capacidad de enviar/recibir información y proporcionar nuevas funcionalidades que permitan mejoras en la seguridad vial, gestión del tráfico, etc.

Las características 1 y 2 son de obligado cumplimiento para que el material pueda ser designado como MASAI. Si adicionalmente se cumple uno de los requerimientos 3 ó 4, se obtiene la categoría MASAI grado I, y si se cumplen ambos requerimientos, 3 y 4, se obtiene la categoría MASAI grado II. Además, con la inclusión de la característica 5 en

cualquiera de las categorías MASAI, se obtendría el grado (+). La Tabla 1. recoge las diferentes categorías de mezclas MASAI.

Tabla 1. Categorías MASAI

Características	1	2	3	4	5
MASAI (I)	√	√	√		
MASAI (I) +	√	√	√		√
MASAI (I)	√	√		√	
MASAI (I) +	√	√		√	√
MASAI (II)	√	√	√	√	
MASAI (II) +	√	√	√	√	√

La implementación de los materiales MASAI comenzó en 2017, y se ha realizado en colaboración con la Consejería de Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda de la Junta de Andalucía. Desde el primer momento, el principal objetivo de este proyecto ha sido la rehabilitación de la red de carreteras andaluzas bajo el menor impacto medioambiental posible y tratando de adaptar la infraestructura a las necesidades futuras de usuarios y gestores de la carretera; rompiendo de este modo con el modelo tradicional del sector. MASAI ha permitido la captación de recursos para llevar a cabo la rehabilitación de aproximadamente 100 km de carreteras (fondos REACT-EU), una actuación que hará posible la reutilización de más de 80,000 toneladas de material procedente del fresado de pavimentos deteriorados, el reciclado de más de 5,000 toneladas de polímeros y otros residuos locales, con una reducción de entorno al 20% de emisiones ambientales directas derivadas de la fabricación de las mezclas asfálticas.

A continuación, se define la metodología seguida en la implementación y evaluación de los materiales MASAI (ver Figura 1), que se estructura en cuatro etapas.



Figura 1. Tramos de carreteras rehabilitados con mezclas MASAI.

ETAPAS DE IMPLEMENTACIÓN MASAI

En esta sección se describen las principales etapas seguidas en una actuación MASAI, que engloba: la evaluación del pavimento y condiciones del entorno antes de comenzar los trabajos de rehabilitación, la fabricación en la planta asfáltica de la fórmula de trabajo propuesta por la empresa constructora y verificación de las características MASAI, control de la mezcla MASAI en las operaciones de extendido y compactación, y finalmente, tras la apertura a tráfico, un control de la evolución de sus propiedades mecánicas, funcionales y ambientales (ver Figura 2.).



Figura 2. Etapas del protocolo de implementación de mezclas MASAI

Etapa 1: evaluación previa, trabajos de auscultación antes de la actuación de rehabilitación

Esta primera etapa que tiene lugar una vez que la obra ha sido adjudicada y antes de que comiencen los trabajos de rehabilitación, comprende las siguientes actuaciones: evaluación in-situ de las características funcionales, extracción de testigos para caracterización de propiedades mecánicas y estructurales del material antes de su fresado y evaluación ambiental (control de emisiones de ruidos y gases contaminantes generados por el tráfico rodado, partículas en suspensión, temperatura y humedad). La evaluación

in-situ consta de una inspección visual del tramo que permite identificar diferentes tipos de deterioros, se evalúan propiedades de fricción y textura de acuerdo con las normas EN 13036-1 y EN-13036-4, deflexiones e índice de regularidad superficial (IRI) y calidad ambiental y ruido. Para el estudio de las propiedades mecánicas, se lleva a cabo una extracción del ligante de los testigos extraídos del pavimento deteriorado para el estudio de sus características reológicas según norma EN 12697-3 para estudio de su envejecimiento; se obtienen a su vez los valores de penetración (EN 1426), punto de reblandecimiento (EN 1427), se realizan barridos de frecuencia y temperatura mediante DSR (EN 14770) y ensayos MSCR (EN 1426); además se estudian densidades (EN 12697-6), rigidez (EN 12697-26), resistencia a tracción indirecta (EN 12697-23), resistencia a deformaciones plásticas (EN 12697-25), resistencia al envejecimiento (EN 12697-45) y resistencia a fisuración por fatiga mediante el dispositivo de ensayo UGR-FACT (UNE 41210) de las mezclas asfálticas de los testigos extraídos. La figura 3 muestra en ejemplo de una de las actuaciones antes de la rehabilitación del firme y de la ejecución del material MASAI; la figura 4 muestra la estación de monitorización ambiental.



Figura 3. Ejemplo de pavimentos deteriorados antes de la actuación MASAI.



Figura 4. Monitorización de gases contaminante (CO₂, NO_x, etc.), partículas en suspensión y ruido, temperatura y humedad

Etapas 2: Estudio de reproducibilidad en planta de la mezcla MASAI

Una vez que la obra ha sido adjudicada a la empresa constructora, esta propondrá una fórmula de trabajo que reúna los requisitos MASAI establecidos en el proyecto. Antes de la ejecución puesta en obra de la mezcla en el tramo de carretera a rehabilitar, se realizarán pruebas en planta para verificar la reproducibilidad de la mezcla y evaluar las propiedades MASAI. Para ello, durante la prueba en planta, se tomarán muestras de los áridos en sus diferentes fracciones, filler, ligante, material procedente de fresado, etc., de la mezcla asfáltica fabricada y se llevarán a las instalaciones de LabIC.UGR para su estudio.

Los ensayos de caracterización de áridos y material procedente de fresado incluyen: análisis granulométrico (EN 933-1), coeficiente de desgaste LA (EN 1097-2), índice de lasjas (EN 933-3), porcentaje de partículas trituradas (EN 933-5:2022), equivalente de arena (EN 933-8:2012+A1:2015), densidad y absorción (EN1097-6). La evaluación de las propiedades de los ligantes, tanto el ligante virgen como el extraído de la mezcla MASAI, se realiza mediante los ensayos: penetración (EN 1426), punto de reblandecimiento (EN 1427), barridos de frecuencia y temperatura con DSR (EN 14770) y MSCR (EN 16659). Por último, para la evaluación de las propiedades de las mezclas MASAI fabricadas en planta, se obtienen los valores de densidad (EN 12697-4 y EN 12697-6), contenido de huecos (EN 12697-8), contenido de ligante (EN 12697-1), sensibilidad al agua (EN 12697-12), resistencia a deformaciones plásticas en seco y sumergido (EN 12697-22), valores de rigidez (EN 12697-26), resistencia a deformaciones plásticas (EN 12697-25), resistencia a retracciones térmicas (EN 12697-46), resistencia al envejecimiento (EN 12697-45) y resistencia a fisuración por fatiga con el dispositivo UGR-FACT (UNE 41210).

Tras el análisis de resultados, se lleva a cabo la optimización de la fórmula de trabajo y la construcción de una sección de prueba de aproximadamente 200 m, que permite además la evaluación de la trabajabilidad del material mediante el control de temperatura

y densidades, para lo que se utiliza una cámara termográfica y dispositivo de medida de densidades in-situ no-nuclear (la Figura 5 muestra un ejemplo del control de densidades in-situ). De nuevo, se extraerán testigos de la mezcla MASAI para su estudio en laboratorio.

Durante la fabricación de la mezcla tiene lugar la medida de emisiones ambientales y el control de la temperatura de fabricación y consumos energéticos en planta (ver Figura 6).



Figura 5. Control de densidades in-situ durante la ejecución del tramo de prueba

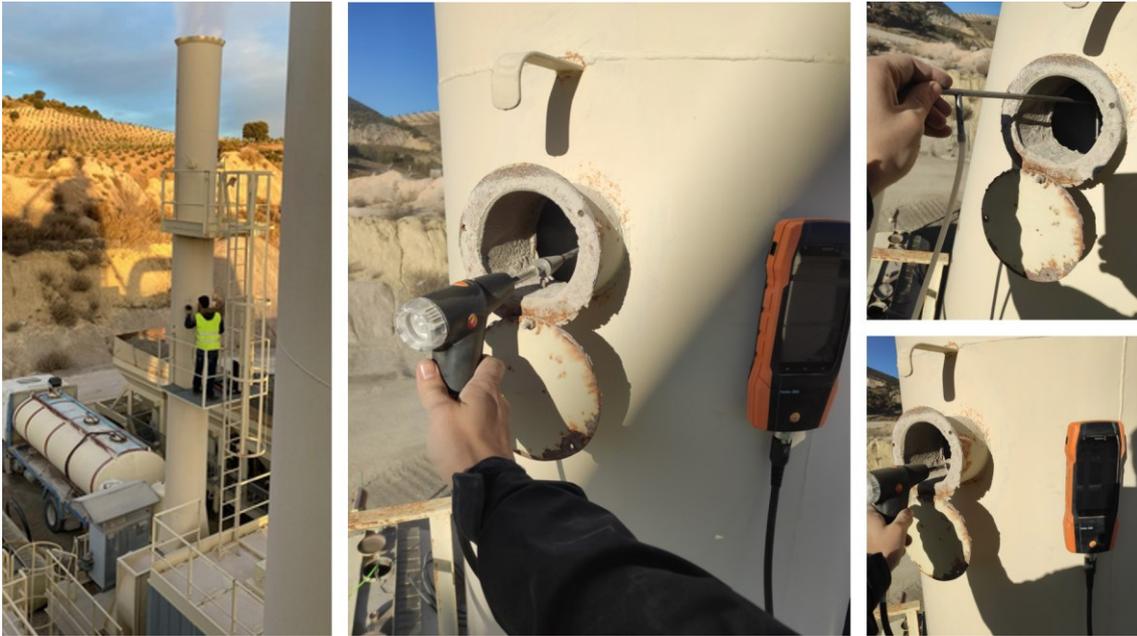


Figura 6. Detalle del control de emisiones en planta durante la fabricación de la mezcla MASAI.

El análisis global de los resultados de esta etapa 2 son los que se utilizan para la aprobación de la fórmula de trabajo que se utilizará en actuación MASAI a ejecutar.

Etapa 3: Control de ejecución de la mezcla MASAI

Esta etapa tiene como objetivo el estudio de fabricación y puesta en obra de la mezcla MASAI definida en las etapas anteriores. Para ello, durante los trabajos de ejecución, se toman muestras de la mezcla MASAI para su estudio en laboratorio, mediante los ensayos ya descritos en las etapas anteriores. Adicionalmente se estudian las temperaturas de fabricación y compactación, emisiones generadas y consumos energéticos. Una vez ejecutado el pavimento se extraen testigos para evaluación de propiedades de materiales constituyentes y mezclas MASAI, evaluándose in-situ propiedades funcionales como fricción, textura.

Etapa 4: Control de evolución de las propiedades MASAI en su vida de servicio

Una vez concluida la actuación y tras la apertura a tráfico, tiene lugar el estudio de evolución de propiedades funcionales, mecánicas y ambientales de la mezcla MASAI. Para la evaluación ambiental, se utilizará la misma estación de monitorización de calidad del aire (contaminante y partículas en suspensión), ruido, temperatura y humedad. El análisis de evolución de propiedades funcionales (textura, fricción, IRI y deflexiones) tiene lugar in-situ y el de propiedades mecánicas se realiza tras la extracción de testigos del pavimento (mediante los ensayos ya descritos en etapas anteriores), a ser posible transcurridos 6, 24, 36 y 48 meses desde su puesta en servicio. Basándonos en los resultados de esta etapa y comparándolos con los de etapas anteriores, se obtiene un

modelo de evolución de propiedades a lo largo del tiempo. Finalmente tiene lugar un análisis de ciclo de vida de cada actuación para conocer el potencial impacto de las mezclas MASAI en términos de demanda energética, acidificación, etc.

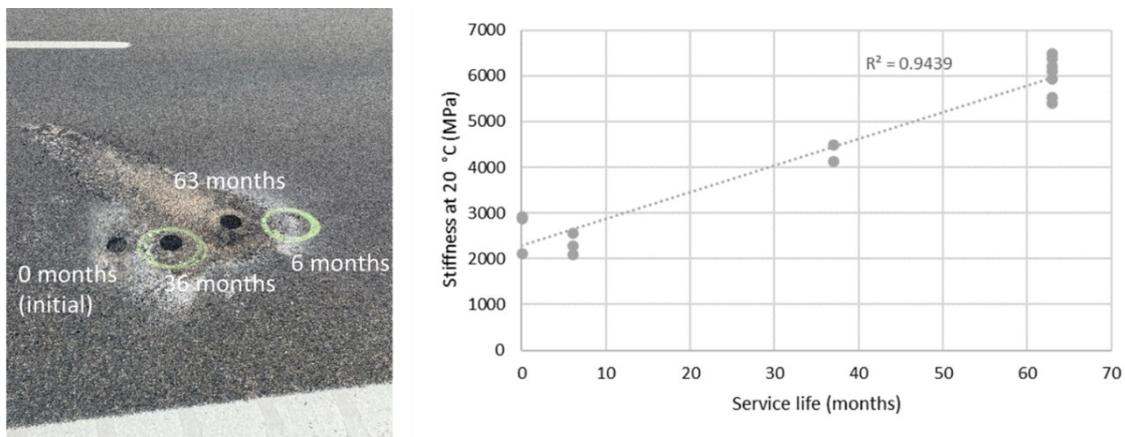


Figura 7. Ejemplo de evolución de propiedades mecánicas de una mezcla MASAI durante su vida de servicio.

CONCLUSIONES

El trabajo presentado en este artículo describe los materiales MASAI y la metodología seguida para su implementación en obras de rehabilitación de carreteras en Andalucía. Estos materiales están siendo empleados con el objeto de contribuir a la transición del modelo tradicional de construcción de carreteras hacia un modelo más actual, más sostenible y adaptado a las demandas de usuarios y gestores de estas infraestructuras. El aunar tecnologías que permiten la eficiencia energética, la implementación de la economía circular, la disminución de contaminantes atmosféricos, promoviendo a su vez el uso de materiales de alta calidad es la contribución de MASAI a la modernización en la construcción de carreteras.

REFERENCIAS

Gruber, M. R., & Hofko, B. (2023). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from recycled asphalt pavement production. *Sustainability*, 15(5), 4629.

Luo, Z., & Yang, B. (2021). Towards resilient and smart urban road networks: Connectivity restoration via community structure. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103344. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103344>

Moreno-Navarro, F., Sierra-Carrillo de Albornoz, J., Sol-Sánchez, M. & M.C. Rubio-Gómez (2023). MASAI: sustainable, automated and intelligent asphalt materials. The way to the next generation of asphalt pavements, *Road Materials and Pavement Design*, 24:sup1, 486-505, DOI: 10.1080/14680629.2023.2181007

Picado-Santos, L. G., Capitaó, S. D., & Neves, J. M. C. (2020). Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 247, 118577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118577>.

Pompigna, A., & Mauro, R. (2022). Smart roads: A state of the art of highways innovations in the Smart Age. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 25, 100986. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.04.005>

Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>

Santolini, E., Tarsi, G., Torreggiani, D., & Sangiorgi, C. (2024). Towards more sustainable infrastructures through circular processes: Environmental performance assessment of a case study pavement with recycled asphalt in a life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 448, 141380.

Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review. *Materials*, 13(18), 4052. <https://doi.org/10.3390/ma13184052>

Zhao, H., & Wu, D. (2015). Definition, Function, and Framework Construction of a Smart Road. *New Frontiers of Road and Airport Engineering*, ASCE, Reston, 204-218. <https://doi.org/10.1061/9780784414255.020>

EN 933-1 (2012). Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. AENOR.

EN 933-3 (2012). Tests for geometrical properties of aggregates - Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index. AENOR.

EN 933-5 (2005). Tests for geometrical properties of aggregates - Part 5: Determination of percentage of crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles. AENOR.

EN 1097-2 (2010). Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation. AENOR.

EN 1097-6 (2014). Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption. AENOR.

[EN 1426 (2015). Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration. AENOR.

EN 1427 (2015). Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method. AENOR.

EN 12697-1 (2022). Bituminous mixtures - Test methods - Part 1: Soluble binder content. AENOR.

EN 12697-5 (2020). Bituminous mixtures - Test methods - Part 5: Determination of the maximum density. AENOR.

EN 12697-6 (2022). Bituminous mixtures - Test methods - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. AENOR.

EN 12697-8 (2022). Bituminous mixtures - Test methods - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens. AENOR.

EN 12697-12 (2019). Bituminous mixtures - Test methods - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. AENOR.

EN 12697-22 (2022). Bituminous mixtures - Test methods - Part 22: Wheel tracking. AENOR.

EN 12697-25 (2019). Bituminous mixtures - Test methods - Part 25: Cyclic compression test. AENOR.

EN 12697-26 (2019). Bituminous mixtures - Test methods - Part 26: Stiffness. AENOR.

EN 12697-45 (2022). Bituminous mixtures - Test methods - Part 45: Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS) conditioning test. AENOR.

EN 12697-46 (2022). Bituminous mixtures - Test methods - Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. AENOR.

EN 14770 (2012). Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR). AENOR.

EN 16659 (2016). Bitumen and Bituminous Binders - Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT). AENOR.

UNE 41210 (2022). Test methods for bituminous mixtures. Resistance to structural cracking and fatigue with UGR-FACT. AENOR.

