



SUPERMODIFICADOR A BASE DE GRAFENO Y PLÁSTICOS RECICLADOS: DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA

Blanca Durand¹, Luca Baccellieri², Loretta Venturini³

¹Iterchimica S.p.A., Suisio, Italia, blanca.durand@iterchimica.it

²Iterchimica S.p.A., Suisio, Italia, luca.baccellieri@iterchimica.it

³Iterchimica S.p.A., Suisio, Italia, loretta.venturini@iterchimica.it

Resumen

El desarrollo de las infraestructuras viarias europeas forma parte del Plan de Acción Europeo que financia el crecimiento sostenible. Con respecto a los pavimentos de carreteras, la mejora de las prestaciones de las mezclas bituminosas, que tiene el potencial de aumentar la vida útil de los pavimentos, es uno de los factores que permiten perseguir un crecimiento sostenible también en el sector vial. En las últimas décadas, además del betún modificado con polímeros tradicional (PmB), se han desarrollado y probado varias tecnologías de modificación de las mezclas bituminosas, incluido el uso de plásticos reciclados al final de su vida útil. El supermodificador polimérico a base de grafeno (SmBG) es el resultado de 6 años de investigación (incluida en el proyecto Ecopave) que ha permitido conseguir no sólo grandes logros en el ámbito de la economía circular de los plásticos duros, que en Europa acaban normalmente en plantas de conversión de residuos en energía, sino también la creación de un producto para la modificación en seco de mezclas bituminosas para la construcción de pavimentos seguros y ecosostenibles. El proyecto Ecopave fue realizado por Iterchimica S.p.A. en colaboración con la Universidad de Milán-Bicocca (estudio de evaluación del ciclo de vida (ACV)), Directa Plus (producción de grafeno) y G.Eco (recuperación y selección de plásticos duros). El objetivo principal del proyecto era el desarrollo del supermodificador y su aplicación con tecnología seca (es decir, añadiendo el aditivo directamente durante la fase de mezcla) para modificar mezclas bituminosas. Dado el carácter innovador de este producto, se registraron tres patentes. El supermodificador se utilizó en muchos proyectos y tramos de pruebas, casi treinta en Italia y en el extranjero. Entre ellos hay algunos muy importantes en Italia de los que se tratará con más detalle en este artículo.

Palabras Clave: supermodificador de mezclas asfálticas, plásticos reciclados, grafeno, sostenibilidad;

1 Introducción

Para hacer frente al cambio climático y a la degradación del medio ambiente que caracterizan a Europa pero también al resto del mundo, el Pacto Verde Europeo transformará la UE en una economía moderna, eficiente en el uso de los recursos y competitiva, garantizando que hayan dejado de producirse emisiones netas de gases de efecto invernadero en 2050, el crecimiento económico esté dissociado del uso de recursos y no haya personas ni lugares que se queden atrás. Para adaptar las políticas de la UE en materia de clima, energía, transporte y fiscalidad con el fin de reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55 % de aquí a 2030 (en comparación con los niveles de 1990), la Comisión Europea ha adoptado un conjunto de propuestas.

La movilidad aporta numerosos beneficios a sus usuarios pero al mismo tiempo no está exenta de costes para nuestra sociedad. Por ejemplo, son costes los accidentes de tráfico, la congestión y la pérdida de biodiversidad, todo lo cual repercute en nuestra salud y bienestar. Los esfuerzos y las medidas

estratégicas emprendidos en el pasado no han sido suficientes para abordar estos costes. Reducir significativamente sus emisiones y ser más sostenible es el reto más serio al que se enfrenta el sector del transporte. Al mismo tiempo, esta transformación brinda grandes oportunidades para mejorar la calidad de vida y para que la industria europea, en todas las cadenas de valor, se modernice, cree puestos de trabajo de gran calidad, desarrolle nuevos productos y servicios, refuerce su competitividad y aspire al liderazgo mundial en un momento en que otros mercados avanzan rápidamente hacia una movilidad sin emisiones.

Como todo el mundo sabe, el aumento de rendimiento de las mezclas bituminosas y el aumento de la vida útil de las pavimentaciones permiten realizar pavimentaciones seguras, duraderas, mejorables y fáciles de mantener, renovar y reciclar. Los requisitos de diseño ecológico son la extensión del ciclo de vida - ACV (Fig. 1), la reducción de las huellas de carbono y medioambientales de los productos a lo largo de su ciclo de vida, la garantía de que los productos sean adecuados para una economía climáticamente neutra y circular, la prevención de residuos y el fomento de la recuperación de materiales, el uso de materiales de muy alta calidad, el establecimiento de técnicas sofisticadas de construcción, rehabilitación y mantenimiento que utilicen los últimos avances científicos, y la reducción de los costes del ciclo de vida (LCC) de los pavimentos de carreteras mediante la construcción de soluciones de larga duración con escasa necesidad de mantenimiento y rehabilitación [1].

Las acciones del Programa Operativo Regional (POR) 2014-2020 de la Región Lombardía con cargo al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) tienen como objetivos: inspirar la innovación entre las microimpresas y las PYME (pequeñas y medianas empresas), impulsar las actividades cooperativas de I+D, fomentar la creación de redes y sinergias entre las impresas y entre éstas y las instituciones de investigación, y respaldar los encargos públicos de investigación, desarrollo e innovación.



Figura 1. ACV de una infraestructura viaria

2 Modificación de la mezcla bituminosa con método seco (PmA)

Tal y como se reconoce internacionalmente, las tecnologías que se pueden utilizar para la modificación de mezclas bituminosas son esencialmente dos:

- Betún modificado (PmB – Polymer modified Bitumen) con polímeros (SBS – Stirene-Butadiene- Stirene) para conglomerados bituminosos: definido según la normativa europea (UNI EN 12597) como un ligante bituminoso cuya reología se modifica a través de la introducción de polímeros. La producción se realiza en una planta de modificación especial (Método húmedo).
- Modificación estructural del conglomerado bituminoso (PmA – Polymer Modified Asphalt): utilizando el betún convencional, el compuesto polimérico de modificación se

introduce en el ciclo de producción después de los agregados y antes del betún (Método seco).

Gracias a las características del método húmedo (el alto rendimiento de las mezclas bituminosas modificadas y su gran versatilidad) en los últimos 20 años, la investigación ha desarrollado nuevos compuestos poliméricos y tecnologías, que cada vez tienen un mayor rendimiento.

La investigación del Proyecto Ecopave 2014-2020 permitió el desarrollo de Gipave®, un supermodificador a base de plásticos reciclados y seleccionados y de grafeno. La investigación fue desarrollada por Iterchimica S.p.A. (empresa italiana líder en el sector de productos para mezclas asfálticas), Universidad de Milán - Bicocca (estudio de evaluación del ciclo de vida - ACV), Directa Plus (producción de grafeno) y G.Eco (recuperación y selección de plásticos duros). El objetivo principal fue desarrollar un producto capaz de mejorar significativamente el rendimiento físico-mecánico del pavimento, en comparación con la tecnología tradicional PMB y las tecnologías PMA con el método seco actualmente en uso. Dado el carácter innovador de este producto, se han obtenido varios patentes que demuestran su singularidad: el primero para el método de tratamiento del grafito (permite producir grafeno 100% puro), el segundo para la formulación de Gipave® y el tercero para el proceso de recuperación de plásticos duros.

2.1 Supermodificador a base de plásticos reciclados y seleccionados

El supermodificador se presenta en gránulos (1,0 ÷ 4,0 mm) de color negro y está compuesto por (Fig. 2): plásticos de recuperación seleccionados derivados de objetos hechos de "plástico duro" que son tratados industrialmente según un proceso patentado; grafeno (el G+ o ITC1) y una base funcional compuesta por aditivos de diferente naturaleza que están cubiertos por secretos comerciales.



Figura 2. Nanoplaquetas de grafeno y compuesto polimérico (Gipave®)

2.2 Plásticos de recuperación seleccionados

El uso de residuos plásticos en la construcción de pavimentos de carreteras es conocido en todo el mundo desde hace más 20 años, pero la idea del nuevo proceso de recuperación de los plásticos nació de la necesidad de descubrir una forma virtuosa de reutilizar los residuos plásticos. El plástico reutilizado procede tanto de residuos sólidos urbanos (juguetes, cajas, bolígrafos, rotuladores, chancas, papeleras, cajas de plásticos, tuberías, mesas y sillas de plástico, muebles de exterior, cubos, palanganas, estuches de cintas de audio, CD, DVD, cintas de vídeo y objetos similares), como de residuos de la producción industrial.

El proceso de producción del diseño incluye [2]:

- Selección de los plásticos reciclados en función de su naturaleza química y de los rendimientos químico-físicos correspondientes (no todos los plásticos pueden reutilizarse para la modificación de las mezclas bituminosas);
- Molienda, desferrización y lavado, sea para eliminar residuos de otras sustancias que puedan afectar a la calidad del material acabado, sea para conseguir una mayor separación entre plásticos de alta densidad y plásticos de baja densidad utilizando una solución de una concentración determinada;
- Combinación y recomposición de plásticos de distinta naturaleza química según los porcentajes de la mezcla diseñada por el centro de investigación química (formulación secreta);
- Mezcla de plásticos con grafeno y una base activa (su formulación es un secreto comercial);
- Extrusión para obtener granulos.

2.3 Grafeno

Las características físico-mecánicas del grafeno se conocen oficialmente desde 2004 (transformación del grafito y descubrimiento en 1947 por P.R. Wallace y aislado en 2004 por A. Geim y K. Novoselov - Premio Nobel de Física en 2010).

La estructura del grafeno (Fig. 3) está formada por átomos de carbono (separados 0,14 nm) dispuestos en una estructura de forma de panal de abejas y unidos en el mismo plano por enlaces covalentes, mientras que los diferentes planos de carbono (separados 0,34 nm) están unidos por interacciones de Van der Waals [3].

Debido a su propiedades elásticas, el grafeno se considera el “material más resistente de la historia” [4]. De hecho, tiene una resistencia a la rotura de 42 N/m con una deformación mecánica intrínseca de $\approx 25\%$ y un módulo de Young de ≈ 1 TPa.

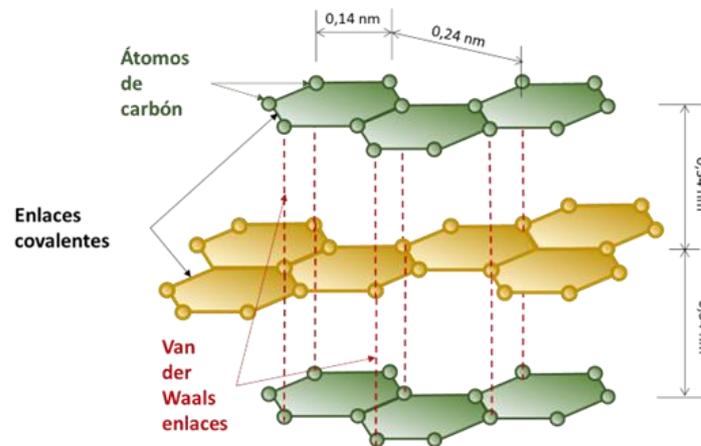


Figura 3. Características del grafeno

En la actualidad, se han presentado varias técnicas para la síntesis de grafeno, que permiten la preparación de cristales de diferentes dimensiones, formas y calidad. El grafeno G+ (llamado ITC1) es producido por Directa Plus y está compuesto de nanopartículas de grafeno ultrapuras con características morfológicas y estructurales optimizadas. G+ se obtiene mediante un proceso de fabricación patentado que utiliza una técnica única (Plasma Super Expansion). Esta técnica permite generar nanoplaquetas de grafeno prístinas a gran escala [5, 6]. Las nanoplaquetas de grafeno tienen una dimensión lateral típica de partícula primaria inferior a 10 μm , con una D50 de unos 2 μm y D90 de unos 4 μm y un grosor típicamente inferior a 3 nm, con una D50 de 4-6 capas de grafeno. Se caracterizan por una calidad cristalina muy elevada: en efecto, el contenido de carbono suele ser superior al 99%, mientras que el de oxígeno es inferior al 0,1%.

Con el fin de obtener beneficios en términos de rendimiento sin afectar a la buena procesabilidad del material, la morfología, la relación de aspecto y la pureza de las plaquetas son fundamentales. Las

dimensiones laterales elevadas (del orden de unas micras) son fundamentales para mejorar las propiedades del grafeno, que suelen estar en el plano, mientras que un grosor nanométrico implica una superficie específica bastante elevada, de unos 400-500 m²/g.

3 Ventajas

Utilizar el supermodificador para modificar las mezclas bituminosas significa obtener beneficios tanto desde el punto de vista medioambiental como de rendimiento.

3.1 Sostenibilidad

La Universidad Bicocca de Milán hizo muchas pruebas para comprobar los beneficios medioambientales de las mezclas modificadas con el supermodificador a base de grafeno, en general y también en comparación tanto con las mezclas con betún tal como con las producidas con PmB: se han calculado las emisiones en la atmósfera (especialmente PM₁₀, PM_{2,5} y UFP) y los lixiviados acuosos para detectar la presencia de sustancias químicas peligrosas y microplásticos. En lo que respecta a las emisiones atmosféricas, se colocaron contadores ópticos de partículas (OCP) y muestreadores de aire con filtros de cuarzo y teflón (para la recogida y determinación de PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, carbono total/orgánico/elemental, elementos) en la planta de producción de la mezcla asfáltica.

Los resultados de las pruebas en planta y en laboratorio, obtenidos mediante la medición de PM, OC/EC y elementos (como S, Al, Si, Fe), han demostrado que no se introducen cambios significativos en las emisiones peligrosas a la atmósfera con la nueva tecnología (Fig. 4). La introducción de materiales plásticos y grafeno en el nuevo aditivo no provoca un aumento de la contaminación atmosférica por PM, tanto por partículas primarias como por aerosoles orgánicos secundarios (SOA).

Además se realizaron análisis preliminares de los gránulos de plástico de tamaño micrométrico, procedentes del proceso dedicado de recogida y reciclaje de plásticos, dentro del supermodificador con el fin de definir la composición polimérica de los microplásticos (MP) posiblemente liberados por los asfaltos modificados y los posibles contaminantes adicionales asociados a la fracción MP. La lixiviación de los MP resultó comparable para las tres matrices diferentes ensayadas, con muy pocos MP dispersos por litro de eluido y sin liberación adicional tras el envejecimiento de los conglomerados.

Paralelamente a la baja liberación de sustancias químicas peligrosas y de MP, los efectos ecotoxicológicos medidos con el pez cebra revelaron efectos insignificantes tanto en la viabilidad como en las malformaciones embrionarias, sin variabilidad entre los eluidos, considerando los diferentes materiales o el envejecimiento [2].

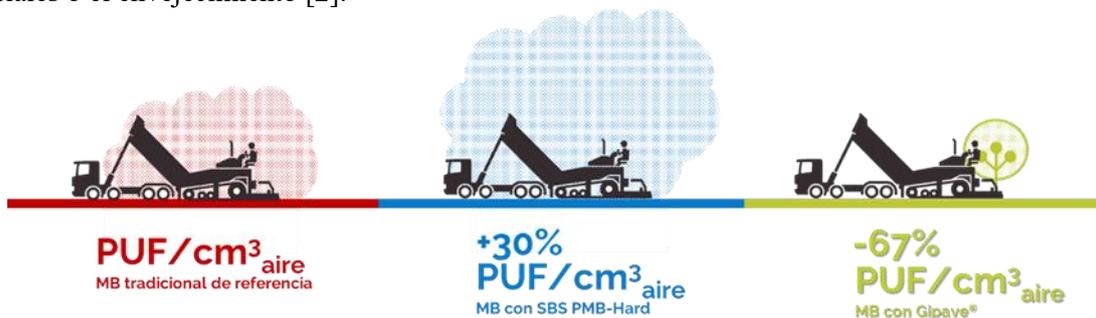


Figura 4. Reducción de Partículas UltraFinas (PUF/cm³aire) durante la producción y la recolección de la mezcla



Figura 5. El supermodificador está libre de microplásticos y no induce efectos tóxicos

Gracias al empleo del software Gabi LCA y utilizando el método de impacto CML 2001 (actualización de 2016), los primeros datos obtenidos con el proyecto Ecopave sugirieron que los impactos ambientales de SmBG, y en particular las emisiones equivalentes de efecto invernadero fueron iguales a un valor total de 305 kg de CO₂ equivalente por tonelada de SmBG producida (Fig. 6), frente a 4.000 kgCO₂eq por tonelada de tSBS utilizada para la producción de PmB [7].



Figura 6. Huella de carbono de Gipave® vs SBS

3.2 Rendimiento físico-mecánico

El uso del supermodificador también garantiza importantes mejoras de rendimiento desde el punto de vista físico y mecánico (en comparación con las mezclas tradicionales): en particular, el producto permite aumentar la resistencia a la tracción (es decir, la capacidad de absorber deformaciones importantes antes de romperse y, por tanto, de desencadenar el fenómeno de agrietamiento, con especial referencia al bottom-up) y permite aumentar también el módulo de rigidez (es decir, la capacidad de distribuir eficaz y eficientemente las cargas). Adicionalmente, la tecnología reduce la susceptibilidad a la formación de roderas a temperaturas elevadas (es decir, garantiza mejor resistencia a la deformación permanente) y mejora la resistencia a la fatiga (es decir, mejor capacidad de soportar ciclos de carga a temperatura intermedia). En la Fig. 7 se muestra el aumento medio del rendimiento.



Figura 7. Rendimiento técnico de la mezcla asfáltica con supermodificador con grafeno y plásticos reciclados en comparación con las mezclas convencionales con PmB (valores obtenidos tras 6 años de investigación y tramos de prueba)

4. Casos prácticos

Los proyectos más importantes realizados en Italia son el puente San Giorgio de Génova y la autopista Brescia-Padua. Además la autopista Turín-Milán A4 se encuentra en fase de inicio de los trabajos, tras la realización de un tramo de prueba.

4.1 Puente San Giorgio de Génova

Génova San Giorgio es el viaducto de la autopista que atraviesa el torrente Polcevera y los barrios genoveses de Certosa, Sampierdarena y Cornigliano. El puente, inaugurado el 3 de agosto de 2020, fue construido tras el derrumbe del puente anterior en 2018, el puente Morandi.

Este puente es un tramo estratégico porque permite la conexión por carretera entre el norte y el centro de Italia y el sur de Francia, además de ser el principal eje viario entre la zona centro oriental de Génova, el puerto de Voltri-Prà, el aeropuerto Cristoforo Colombo y las zonas industriales del distrito de Génova.

El proyecto de diseño del viaducto de San Giorgio (también conocido como viaducto de Polcevera) se desarrolló en varias fases. El proyecto inicial (proyecto ejecutivo de primer nivel) se basaba en el concepto arquitectónico de Renzo Piano que prevé la construcción del viaducto con una estructura mixta de acero y hormigón, de 1067 m de longitud, aproximadamente 31 m de anchura y 45 m de altura. Las normas a alcanzar que guiaron la definición del proyecto fueron: una mayor durabilidad (es decir, mayor vida útil y menor mantenimiento), baja emisión de ruido, resistencia a las acciones tangenciales inducidas por el tráfico, menor consumo de materias primas no renovables, evacuación eficaz del agua de lluvia en la superficie de la carretera, mejor capacidad de distribución de cargas y protección del tablero del puente. Para el tablero del puente se realizaron las capas intermedia y de rodadura, mientras que para las rampas se realizaron también las capas de base.

La vida útil estimada del pavimento fue de 20 años. La necesidad de obtener una alta resistencia a la deformación permanente y a la fatiga para la capa de rodadura y también la necesidad de reducir las emisiones acústicas debido a la posición de la carretera, influyeron en la elección del material. La mezcla asfáltica SMA aporta la característica de macrotextura (textura negativa), que permite disminuir las emisiones acústicas.

Teniendo en cuenta el comportamiento que tendrá el pavimento a lo largo del tiempo en las condiciones de tráfico previstas, además de las condiciones climáticas de la zona, los expertos calcularon el segundo nivel de diseño del pavimento. En el proyecto se utilizó el método de la Guía de diseño mecanístico-empírico de firmes (MEPDG). Los resultados del segundo nivel son los niveles de rendimiento y no los espesores de las distintas capas. De este modo, el diseño se optimiza para garantizar que el deterioro global experimentado por el pavimento se mantenga por debajo de los valores umbral durante toda su vida útil.

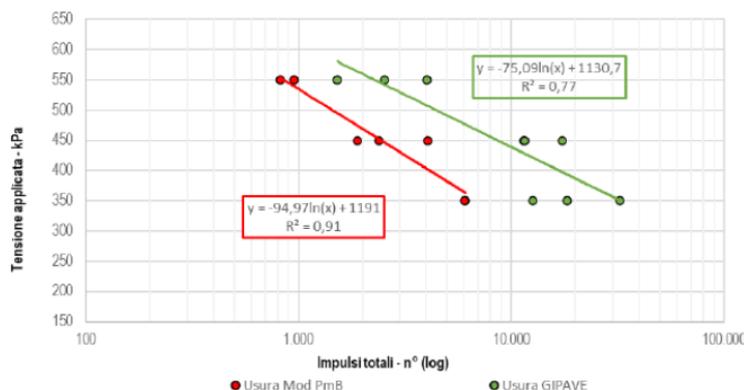


Figura 8. Ejemplo de datos de entrada utilizados durante el tercer nivel del proyecto [8]

Tabla 1. Resumen de los resultados medios del diseño de la mezcla [8]

Capas y tipo de HMA		Estabilidad Marshall [kg]	Rigidez Marshall [kg/mm]	Resistencia media a la tracción indirecta [MPa]	Coefficiente medio de tracción indirecta [MPa]	Módulo de rigidez medio @20°C - 4 Hz [MPa]	Profundidad del surco [MPa]	Impresión con matriz de acero [MPa]
Capa Base	Requisitos del proyecto	-	-	0,90 – 1,55	≥ 80	>7500	-	-
	HMA PmB	-	-	1,32	120	7650	-	-
	HMA con comp. pol.	-	-	1,35	141	10303	-	-
Capa Intermedia	Requisitos del proyecto	-	-	0,90 – 1,55	≥ 80	> 6200	-	-
	HMA PmB	-	-	1.34	115	8754	1.57	-
	HMA con comp. pol.	-	-	1.53	157	11966	1.55	-
Capa de rodadura	Requisitos del proyecto	> 1000	> 350	> 0,60	-	> 5000	-	< 2
	HMA PmB	1291	402	1,24	-	5621	-	0,60
	HMA con comp. pol.	1278	495	1,32	-	9273	-	0,34

En el tercer nivel, con el propósito de mejorar las características de rendimiento al tiempo que se refuerza el carácter ecológico de la infraestructura, se realizaron estudios detallados para evaluar el rendimiento de una nueva propuesta técnica que representaba una alternativa a las soluciones establecidas por el Ingeniero.

La propuesta técnica suponía el uso del innovador supermodificador con grafeno para modificar el hormigón asfáltico y, por consiguiente, mejorar el comportamiento físico-mecánico del pavimento asfáltico (Tab.1). La caracterización mecánica de las mezclas bituminosas implicó la medición y el análisis de propiedades fundamentales como la resistencia a la formación de ahuellamiento (UNI EN 12697-22 "Mezclas bituminosas-Métodos de ensayo-Parte 22: Método de seguimiento de ruedas"), la resistencia a la tracción indirecta y el coeficiente de tracción indirecta (UNI EN 12697-23 "Mezclas bituminosas-Métodos de ensayo-Parte 23: determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas"), la resistencia a la fatiga (UNI EN 12697-24 "Mezclas bituminosas-Métodos de ensayo-Parte 24: Resistencia a la fatiga"), y el módulo de rigidez (UNI EN 12697-26 "Mezclas bituminosas-Métodos de ensayo-Parte 26: Rigidez") [8].



Figura 9. Colocación del puente de Génova San Giorgio

Teniendo en cuenta los datos obtenidos del Proyecto Ecopave, el análisis de diseño y algunos datos bibliográficos (disponibles previa solicitud) y con el objetivo de valorar los beneficios medioambientales al final de la vida útil, se realizó una estimación que condujo a los siguientes resultados (1.067 m x 30 m x 4 cm - Gipave® al 6% sobre el peso del betún): -43% de emisiones de CO₂e, -43% de energía consumida, 21 t de plástico clasificado y reciclado que, de otro modo, se habrían destinado a la valorización energética de residuos.

4.2 Autopista A4 Brescia-Padua

La autopista A4 Brescia-Padua es un tramo de carretera clave que conecta el este y el oeste de Italia con los países vecinos. El organismo gestor es Autostrada Brescia-Verona-Vicenza-Padova S.p.A., que forma parte del grupo A4 Holding, una empresa de gestión que siempre ha estado comprometida con la consecución de los objetivos del Pacto Verde.

La autopista A4 está siendo sometida actualmente a un mantenimiento exhaustivo, ya que forma parte del programa del Corredor Mediterráneo de la Red Básica Transeuropea (red TEN), que es uno de los corredores viarios con mayor densidad de tráfico, tanto de pasajeros como de mercancías. En conjunto, la red de autopistas gestionada por Autostrada Brescia-Verona-Vicenza-Padova S.p.A. se extiende a lo largo de 235,6 kilómetros e incluye parte de la A4 entre Brescia y Padua a lo largo del corredor europeo-mediterráneo que conecta Lombardía, Véneto y Europa del Este, y la A31 de Vicenza a Badia Polesine en la provincia de Rovigo. Se cruza con otras rutas: A21 Brescia-Piacenza, A22 Brennero-Modena y A13 Padua-Bolonia [9].



Figura 10. Colocación de la Autopista A4 Brescia-Padua

En concreto, el proyecto se refiere al acondicionamiento y mejora de un tramo de la pavimentación en la calzada este, desde el km 345+800 al km 351+300.

Para identificar el tramo más adecuado se consideró la antigüedad y el deterioro de las características portantes del pavimento y la presencia de otros trabajos previstos. Cada año pasan por el tramo afectado por el trabajo unos 15.787.404 vehículos (cifra de 2019), de los cuales aproximadamente el 25% es tráfico pesado.

El paquete de carreteras (carril de emergencia y carril lento) se construyó de la siguiente manera: fresado de todo el paquete asfáltico existente, estabilización in situ con cemento de treinta centímetros, colocación de emulsión ácida, colocación de trece centímetros de base de betún modificado, colocación de emulsión ácida, colocación de siete centímetros de ligante con supermodificador a base de grafeno, colocación de emulsión modificada, relleno, colocación de cinco centímetros de asfalto drenante fonoabsorbente (Fig. 10).

El cálculo de diseño estimó una vida útil de al menos 28 años con un índice de fiabilidad del 99%. Esto se traduce en beneficios medioambientales inmediatos, ya que los trabajos de mantenimiento pueden realizarse durante periodos más largos, con la consiguiente reducción de los impactos inducidos por los trabajos (menores emisiones a la atmósfera, menor uso de áridos naturales, menor transporte de materiales, menor producción en las plantas, etc.).

Parámetro	Especifica	Límite de especificación Control de PMA capa intermedia con producción de supermodificador a base de grafeno	Productor	
			A	B
			Toma de muestra km 346+900	Toma de muestra km 346+000
ITS @N2 [MPa]	EN 12697-23	1,3-2,5	2,1	1,9
CTI @N2 [MPa]		> 100	204	170
ITSR (Sensibilidad al agua) [%]	EN 12697-12	> 90	93	94
Rigidez @20°C, 124 ms, 5 mm [MPa]	EN 12697-26	8000-16000	9972	8103
Ahuellamiento	EN 12697-22	RD @10000 [mm]	≤ 2,5	1,4
		PRD @10000 [%]	≤ 5,0	2,4
		WTS @5000-10000 [mm]	≤ 0,10	0,04

Tab. 2 Ejemplos de verificación de la producción de HMA con compuesto polimérico a base de grafeno

A continuación se resumen los ahorros estimados por kilómetro de pavimento reconstruido, basados en los datos del Proyecto Ecopave, en el análisis de diseño y en algunos datos bibliográficos (disponibles previa solicitud), suponiendo una vida útil de 28 años: -42% de emisiones de CO₂e, -43% de energía consumida, -33% de betún, -34% de agregados, -34% de viajes en camión, -33% de horas de trabajo. Además, se recuperarán de forma virtuosa unas 20 t de plásticos reciclados y clasificados por kilómetro. La Universidad de Bolonia trabaja actualmente en la verificación oficial de los datos anteriores.

4.3 Autopista A4 Turín-Milán

La A4 TO-MI se convertirá en la autopista más moderna y tecnológicamente avanzada del mundo. Tras haber construido ya 1.000.000 de metros cúbicos de base ecológica a finales de los años 90, el proyecto actual prevé su aplicación en 250 km de vía lenta entre la barrera de Milano Ghisolfa y el nudo de Novara Est.

Los objetivos principales del trabajo son la sostenibilidad y la seguridad viales, la vida útil y el mantenimiento, la asistencia al conductor y el transporte inteligente y por fin la monitorización de infraestructuras. El Grupo que gestiona el tramo objeto del trabajo es el Grupo ASTM, activo en los ámbitos de la gestión de redes de autopistas en régimen de concesión, diseño, construcción de grandes obras de infraestructura y uso de tecnología aplicada a la movilidad del transporte. ASTM es el segundo mayor operador concesionario de autopistas del mundo, con una red de unos 6.200 km bajo gestión en Italia, Brasil (donde opera a través de la empresa EcoRodovias) y Reino Unido.

A través de su concesionaria SATAP, el Grupo ha presentado un plan económico-financiero para el periodo 2023-2026 ("EFP 2023-26") con el objetivo de transformar la autopista A4 Turín-Milán en una infraestructura "Smart Road". Este proyecto de transformación se sustenta en la adopción de Objetivos Basados en la Ciencia (SBT) que pretenden reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero del Grupo para 2030, persiguiendo los objetivos de la taxonomía medioambiental de la UE, como la mitigación del cambio climático y la economía circular. De aquí a 2030, ASTM se ha

comprometido a reducir en un 25% sus propias emisiones directas e indirectas (Scope 1 y 2) y en un 13% sus emisiones indirectas no propias (Scope 3) procedentes de bienes y servicios adquiridos a terceros.

El proyecto en cuestión se refiere a la repavimentación de las capas asfálticas de 250 km de carretera lenta, normalmente sometida al paso de cargas pesadas. La mezcla asfáltica en caliente con betún modificado con SBS y un 30% de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) utilizado actualmente para las capas de base y para la capa intermedia será sustituido por una mezcla asfáltica altamente modificada con un supermodificador a base de grafeno y que contendrá un porcentaje muy elevado de RAP (material fresado) del 70%, procedente de la demolición de la propia autopista.

Con la colaboración de la Universidad de Bolonia, se realizó un estudio para evaluar la reducción del impacto ambiental en comparación con la tecnología utilizada tradicionalmente. La pavimentación consta de las siguientes capas: 10 cm de base, 6 cm de capa intermedia y 4 cm de capa de rodadura drenante. A finales de octubre de 2022, se llevó a cabo una pavimentación preparatoria para la ejecución de la solución de 2 km de longitud en ambas calzadas de la autopista A4 Turín-Milán. La elección del diseño se basó en el análisis de las características funcionales de los pavimentos resultantes de las bases de datos, en relación con la distribución y la evolución en el tiempo de los volúmenes de tráfico y la edad de los pavimentos colocados. Según el estudio preliminar realizado por el grupo ASTM, el uso de la nueva tecnología aumentará la vida útil del pavimento en un +75% [10].



Figura 11. Primera capa de “Smart Road” con Gipave® y 70% RAP - A4 Turín-Milán

Desarrollado por la Universidad de Bolonia, el análisis de ACV se llevó a cabo utilizando un enfoque "de la cuna a la puerta". Fue utilizado el software OpenLCA, con la base de datos Ecoinvent v 3.7.1.

Se utilizaron distintos métodos de evaluación de impacto. Entre los más reconocidos están ReCiPe Endpoint, que resume los resultados del impacto ambiental en daños a la salud humana, daños al ecosistema y daños a la disponibilidad de recursos, y el GWP 100a del IPCC2013, desarrollado por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) y que resume los resultados en una norma contable para las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂e).

Los datos primarios sobre consumo de energía, recursos naturales y transporte fueron facilitados por la empresa y corresponden a valores reales. En cuanto a los valores de impacto ambiental del compuesto polimérico a base de grafeno, se utilizaron los datos procedentes de la Universidad Bicocca de Milán (Proyecto Ecopave). A continuación, se recopilieron datos bibliográficos y secundarios para colmar las lagunas de información directa. Si se toma el escenario del análisis del ACV para 1 km de carretera y se compara con la tecnología utilizada tradicionalmente (PmB), se observa que la reducción de las



emisiones de CO₂eq es de aproximadamente un -39% y la reducción del consumo de energía es de aproximadamente un -30%. Además, se ahorrará en torno a un -40% de materias primas no renovables (áridos y betún) y se podrán reciclar de forma más virtuosa unas 1.500 t de plástico, normalmente destinadas a la planta de valorización energética de residuos.

El primer tramo de pavimento sostenible se construyó a finales de 2022 y actualmente está siendo verificado y supervisado en términos de rendimiento por un Laboratorio Oficial de terceros (Fig. 11).

5 Conclusiones

La evolución hacia el Green Deal ha permitido desarrollar nuevas tecnologías para pavimentos sostenibles.

Gipave es el resultado de varios años de investigación subvencionada por la UE y se compone principalmente de plásticos reciclados seleccionados, normalmente destinados a la industria de transformación de residuos en energía, y grafeno. Utilizado para la modificación estructural de las mezclas bituminosas, permite aumentar la vida útil de los pavimentos, reciclar porcentajes muy elevados de material fresado sin dejar de garantizar propiedades mecánicas elevadas (potencialmente hasta el 100%, pero dependiendo de la planta) y mejorar el ACV de la superestructura gracias a la reducción de las emisiones al medio ambiente y al menor consumo de energía.

6 Referencias

- [1] European Commission. (09-05-23). New Road Construction Concept (NR2C). Grant agreement ID: 505831.
- [2] Giustozzi, F., & Nizamuddin, S. (2022). Plastic Waste for Sustainable Asphalt Roads. Elsevier.
- [3] Wallace, P. (1947). The band theory of graphite (Vol. Rev. 71, 622). Phys.
- [4] Lee , C., & et al. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. Science , 321, 385.
- [5] ISO/TS 80004-13. (2013). Nanotechnologies — Vocabulary — Part 13: Graphene and related twodimensional (2D) materials.
- [6] Directa Plus. (s.d.). Continuous process for preparing pristine graphene nanoplatelets.
- [7] Asphalt Institute. (2019). Life Cycle Assessment of Asphalt Binder.
- [8] Marradi, A. (2020). Pavimentazioni prestazionali: Il nuovo Ponte San Giorgio. Convegno Asphaltica, Padova.
- [9] Guerra, M., Moro, S., Costantini, G., & Pasetto, M. (2023). Lunga vita all'Autostrada A4. Le Strade, 96-105.
- [10] Nicolini, L., & Ottonelli, I. (2023). Sostenibilità ambientale di pavimentazioni ecologiche. Strade & Autostrade.