

NANOTECNOLOGÍA DE ALTO VALOR AÑADIDO APLICADA SOBRE PAVIMENTOS PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE, DE SU DURABILIDAD Y DE LA SEGURIDAD VIAL. CASO DE ESTUDIO: AUTOPISTA C-31, ENTRE MONTGAT Y SANT ADRIÀ DE BESÒS (BARCELONA)

David Almazán Cruzado¹

¹Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis y Eptisa, Servicios de Ingeniería, S.L., Madrid, España.
presidente@fotocatalisis.org y dalmazan@eptisa.org

Resumen

En el marco del Plan Sectorial de Firms Sostenibles impulsado por la Generalitat de Catalunya entre 2023 y 2025, se desarrolló una actuación basada en la aplicación de nanotecnología fotocatalítica sobre un tramo de aproximadamente 9 km de la autopista C-31, entre Montgat y Sant Adrià de Besòs (Barcelona). La intervención fue ejecutada mediante contratos de Compra Pública Innovadora por la UTE formada por Eiffage Infraestructuras y OHL-Elsan, con el objetivo de reducir la contaminación atmosférica y acústica en un entorno periurbano de elevada densidad de tráfico.

La solución aplicada incorporó materiales fotocatalíticos basados en dióxido de titanio (TiO₂), capaces de degradar contaminantes atmosféricos mediante procesos de oxidación activados por radiación solar. Paralelamente, el tratamiento perseguía mejorar determinadas propiedades funcionales del pavimento, especialmente relacionadas con la adherencia neumático-pavimento.

Durante los dos años posteriores a la aplicación se realizaron campañas de seguimiento técnico y ambiental con la participación de entidades especializadas como CARTIF, Eptisa Servicios de Ingeniería, la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis y la Direcció General de Canvi Climàtic i Qualitat Ambiental. Los resultados obtenidos confirmaron la capacidad del tratamiento para degradar contaminantes atmosféricos y evidenciaron mejoras asociadas a la seguridad vial derivadas de un incremento de la adherencia superficial.

El presente trabajo expone el contexto técnico de la actuación, la metodología de aplicación y seguimiento, así como los principales resultados obtenidos, consolidando este caso como una de las experiencias más relevantes en Europa en materia de pavimentos fotocatalíticos aplicados a infraestructuras viarias reales.

Palabras clave: Fotocatálisis, pavimentos sostenibles, calidad del aire, seguridad vial, durabilidad.

1 Introducción

La contaminación atmosférica derivada del tráfico rodado constituye uno de los principales retos ambientales y de salud pública en entornos urbanos y metropolitanos [1,2]. Los óxidos de

nitrógeno (NOx), junto con otros contaminantes asociados al tráfico, generan importantes impactos sobre la calidad del aire y sobre la salud de la población expuesta.

En paralelo, las administraciones públicas afrontan la necesidad de desarrollar infraestructuras más sostenibles, resilientes y alineadas con los objetivos europeos de transición ecológica y descarbonización [5].

En este contexto, los pavimentos fotocatalíticos emergen como una solución innovadora capaz de incorporar funcionalidades ambientales activas sobre las infraestructuras viarias. La fotocatalisis heterogénea aplicada a pavimentos permite aprovechar la radiación solar para activar materiales semiconductores, principalmente dióxido de titanio (TiO₂), capaces de degradar contaminantes atmosféricos mediante procesos de oxidación [1].

Diversos estudios internacionales han demostrado la capacidad de los materiales fotocatalíticos para reducir contaminantes atmosféricos en entornos urbanos y carreteras [2,3]. Paralelamente, investigaciones recientes apuntan a mejoras relacionadas con la autolimpieza superficial, la durabilidad del pavimento y el incremento de la adherencia neumático-pavimento [6].

En este contexto, la Generalitat de Catalunya impulsó una actuación experimental sobre la autopista C-31, convirtiéndose en una de las primeras experiencias europeas de aplicación real de nanotecnología fotocatalítica sobre una infraestructura viaria de alta capacidad [7] [8].

2 Fundamentos de la fotocatalisis aplicada a pavimentos

La fotocatalisis heterogénea es un proceso fisicoquímico mediante el cual un material semiconductor activado por energía luminosa genera especies oxidantes capaces de transformar compuestos contaminantes en sustancias menos nocivas [1].

El dióxido de titanio constituye actualmente el material fotocatalítico más utilizado debido a su estabilidad química y elevada capacidad oxidante [2].

Cuando el TiO₂ es irradiado mediante radiación ultravioleta, se produce una excitación electrónica que genera pares electrón-hueco capaces de reaccionar con el oxígeno y el agua presentes en el ambiente, que acelera la degradación de contaminantes en aire [1,3].

En aplicaciones sobre pavimentos, el tratamiento puede incorporarse mediante diferentes soluciones:

- Tratamientos superficiales en rodadura, mediante microemulsiones en base acuosa.
- Percolados sobre mezclas asfálticas drenantes, a partir de lechadas en base cemento
- Aplicaciones manufacturadas en fábrica sobre piezas prefabricadas con ligantes hidráulicos (hormigón y cerámica)

En el caso de la C-31 se optó por un tratamiento superficial, aplicado sobre el pavimento y elementos de contención, específicamente diseñado para maximizar la exposición del material fotocatalítico tanto a la radiación solar como al flujo de contaminantes generado por el tráfico rodado. [8]

3 Contexto de la actuación sobre la autopista C-31

La autopista C-31 constituye uno de los principales corredores metropolitanos del área de Barcelona, soportando elevados niveles de intensidad media diaria de tráfico y atravesando zonas densamente urbanizadas.

El tramo seleccionado, comprendido entre Montgat y Sant Adrià de Besòs, presenta una elevada sensibilidad ambiental debido a:

- Alta densidad residencial.
- Proximidad de zonas habitadas a la infraestructura.
- Elevados niveles de tráfico.
- Episodios recurrentes de contaminación atmosférica.
- Necesidad de reducción del impacto acústico y ambiental.

La actuación se desarrolló en el marco del Plan Sectorial de Firmes Sostenibles de la Generalitat de Catalunya [7], incorporando criterios de innovación tecnológica mediante contratos de Compra Pública Innovadora.

La ejecución fue realizada por la UTE formada por Eiffage Infraestructuras y OHL-Elsan, incorporando la colaboración técnica de entidades especializadas en evaluación ambiental y comportamiento funcional de infraestructuras sostenibles, tales como Eptisa, Servicios de Ingeniería o Cartif. [8]



Figura 1. Estado de la Autopista C-31 durante la aplicación del tratamiento fotocatalítico, el 11 de agosto de 2023

4 Objetivos del proyecto

Los objetivos principales perseguidos mediante la aplicación del tratamiento fotocatalítico fueron los siguientes:

4.1 Mejora de la calidad del aire

Reducir la concentración de contaminantes atmosféricos asociados al tráfico rodado mediante procesos fotocatalíticos activados por radiación solar. [8]

4.2 Evaluación de posibles mejoras de la seguridad vial

Mejorar la adherencia neumático-pavimento (CRT) y optimizar determinadas propiedades funcionales superficiales del firme.

4.3 Validación tecnológica a escala real

Verificar el comportamiento de esta tecnología en condiciones reales de tráfico y explotación sobre una infraestructura de alta capacidad.

5 Metodología de aplicación y seguimiento

La aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico se desarrolló sobre aproximadamente 9 km de la autopista C-31.

Previamente a la ejecución se realizaron: [8]

- Selección de materiales fotocatalíticos, que debían contar con el Certificado de eficiencia Fotocatalítica que otorga la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis.
- Ensayos de caracterización a escala laboratorio de los materiales fotocatalíticos preseleccionados, a incorporar. Se preseleccionaron dos, uno para cada calzada.
- Instalación de sensores de medición de la calidad del aire en los elementos de contención y toma de datos de la calidad ambiental, a través de la Unidad Móvil de Medición de la Calidad del aire de la Generalitat de Catalunya.

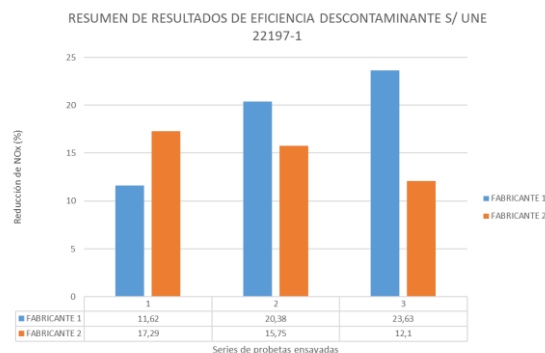


Figura 2. Ensayos de caracterización previos

La aplicación se realizó mediante equipos mecanizados capaces de garantizar una distribución homogénea y una correcta dosificación del tratamiento superficial.



Figura 3. Sistema de aplicación del tratamiento fotocatalítico en la Autopista C-31

Posteriormente se desarrolló un programa de monitorización y seguimiento técnico durante dos años, con participación de: [8]

- CARTIF.
- Eptisa Servicios de Ingeniería.
- Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis.
- Direcció General de Canvi Climàtic i Qualitat Ambiental.



Figura 4. Sistemas de monitorización de los tratamientos fotocatalíticos

Las campañas de seguimiento incluyeron:

- Medición de contaminantes atmosféricos.
- Ensayos de adherencia.

Las mediciones se realizaron considerando variables ambientales como radiación solar, humedad relativa, intensidad de tráfico y condiciones meteorológicas. [8]

6 Resultados obtenidos

6.1 Reducción de contaminantes atmosféricos

Las campañas de monitorización confirmaron la capacidad del tratamiento para degradar contaminantes atmosféricos asociados al tráfico rodado [8,9].

Sistema de monitorización 1: Mediante probetas – testigo instaladas en obra, para posterior recogida sistemática a lo largo de 2 años y realización de ensayos ISO 22197-1, en laboratorio. Este trabajo fue realizado por Eptisa, Servicios de Ingeniería, S.L.



Figura 5. Colocación “in situ” de probeta-testigo, en la zona del arcén, antes de la aplicación del tratamiento fotocatalítico

Los resultados de este análisis, comprendidos entre el 1 y el 5%, demuestran un rendimiento de degradación de contaminantes en aire durante los dos años de monitorización, con un comportamiento asintótico a lo largo del tiempo.

El detalle de la monitorización se muestra en la siguiente gráfica: [8]

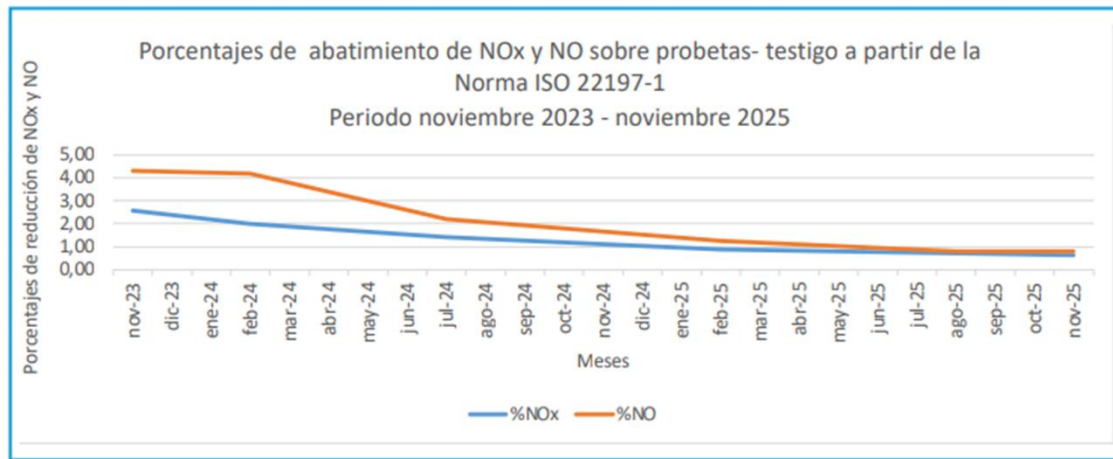


Figura 6. Resultados de eficiencia descontaminante, realizados sobre probetas-testigo

Sistema de monitorización 2: Mediante sensores de medición continua de calidad del aire, instalados en las inmediaciones de la obra, y previamente calibrados con estaciones de calidad del aire oficiales de la zona. Estos análisis se realizaron antes de la aplicación del tratamiento fotocatalítico y posteriores, para determinar su rendimiento a efectos comparativos, y se cruzaron con la influencia del número de horas de luz diarias promedio, y con las precipitaciones atmosféricas promedio durante las mediciones. Las mediciones se realizaron en 3 fases: Una primera fase, donde se tomaron datos 1-2 meses antes de la aplicación del tratamiento. Una segunda fase, entre agosto de 2023, momento de la aplicación del tratamiento y marzo de 2024. Y una tercera fase, entre septiembre de 2024 y enero de 2025. Este trabajo fue realizado por Cartif.



Figura 7. Detalle de instalación de sensores de calidad del aire con medición en continuo en la C-31

A continuación se presentan los resultados obtenidos, discriminados por las dos variables anteriormente comentadas (luz y precipitaciones atmosféricas):

[8]

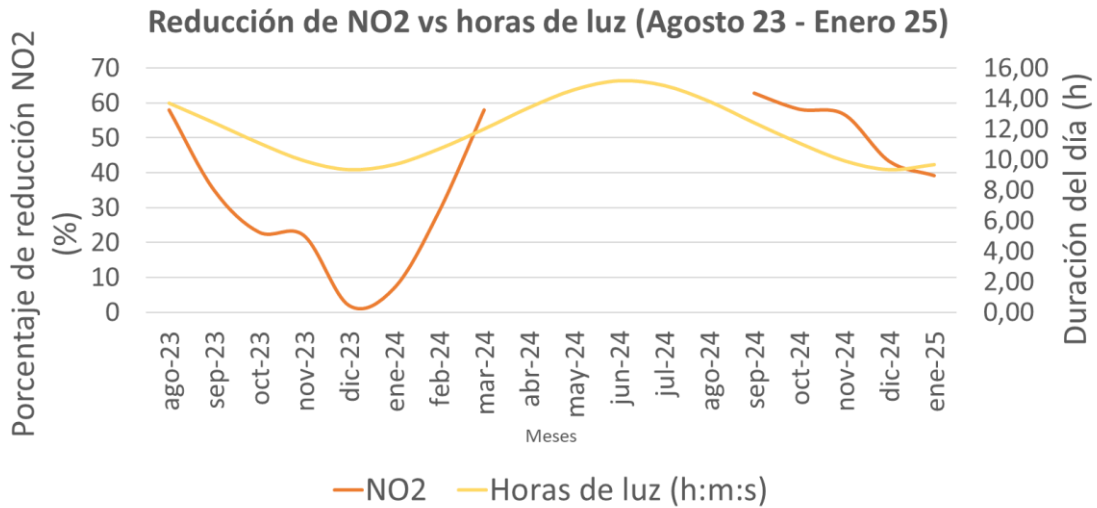


Figura 8. Rendimiento fotocatalítico frente a horas de luz

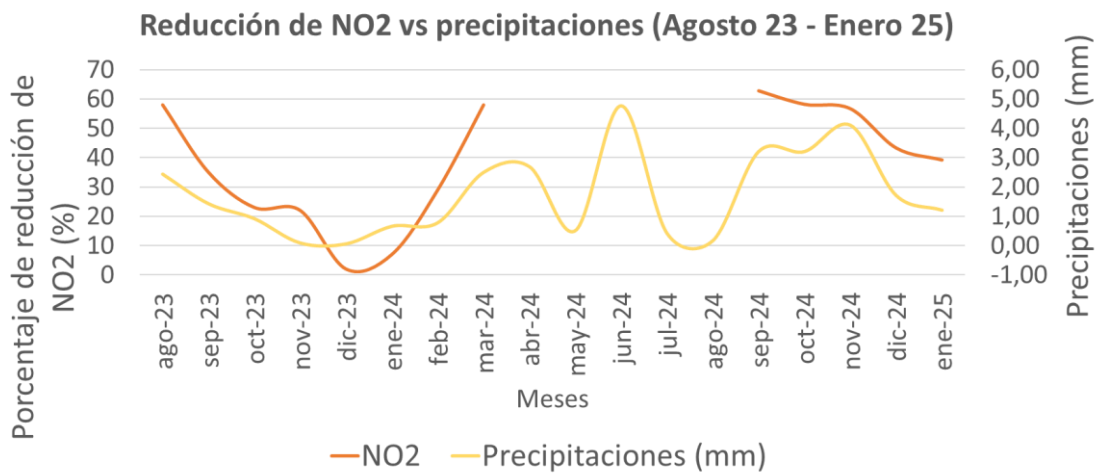


Figura 9. Rendimiento fotocatalítico frente a precipitaciones atmosféricas

Como se puede observar la influencia, tanto de la luz, para activar el fotocatalizador, como la presencia de lluvias, para la auto-limpieza de la superficie son determinantes para este tipo de nanotecnologías.

Los resultados medios de los análisis realizados sugieren una reducción de concentraciones de dióxido de nitrógeno de más de un 52%. [8]

Sistema de monitorización 3: Mediante unidades móviles de medición de la calidad del aire, llevadas a cabo por la Direcció General de Canvi Climàtic i Qualitat Ambiental de la Generalitat de Catalunya. Las mediciones se realizaron en 2 fases: Una primera fase, donde se tomaron datos 1-2 meses antes de la aplicación del tratamiento (enero-febrero de 2023). Una segunda fase, más de un año después de la aplicación del tratamiento, entre septiembre y octubre de 2024).

Los resultados promedios de los diferentes contaminantes medidos antes y después del tratamiento presentaron los siguientes resultados: [8]

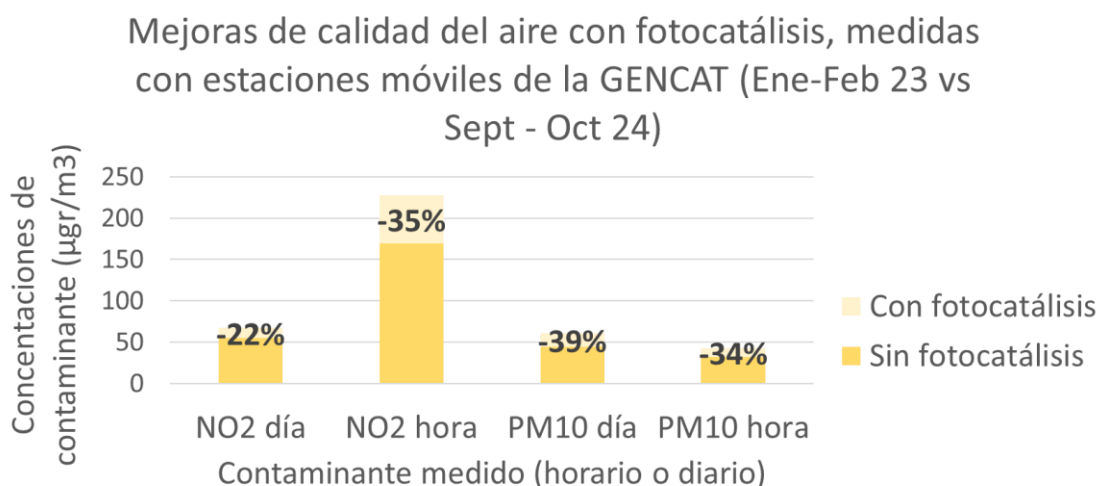


Figura 10. Mejoras de calidad del aire con unidad móvil de la GENCAT: NO₂ y PM₁₀

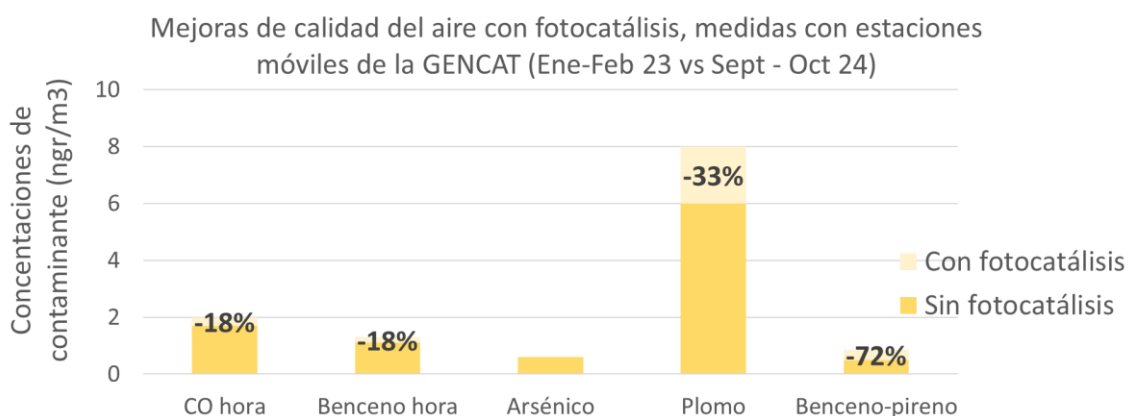


Figura 11. Mejoras de calidad del aire con unidad móvil de la GENCAT: CO, Benceno, Arsénico, Plomo y Benceno-pireno

Como se puede observar a través de los resultados gráficos, hay una considerable degradación de contaminantes en aire en todas las medidas realizadas, a excepción del arsénico, que no mostró

modificación alguna. Sin embargo, se produjeron abatimientos en las concentraciones de NO₂, PM₁₀, CO, Benceno, Plomo y especialmente en Benceno-pireno.

Por tanto, a través de las tres metodologías, no comparables entre sí, en términos cuantitativos, porque las bases son distintas, se observaron reducciones significativas de contaminantes en el entorno inmediato del pavimento tratado, especialmente en condiciones favorables de radiación solar y estabilidad atmosférica.

Los resultados obtenidos corroboran, sin lugar a dudas, la viabilidad de esta tecnología como herramienta complementaria dentro de estrategias urbanas de mejora de la calidad del aire.

6.2 Mejora de la adherencia neumático-pavimento

Uno de los resultados más relevantes fue la mejora observada en los valores de adherencia superficial. [8]

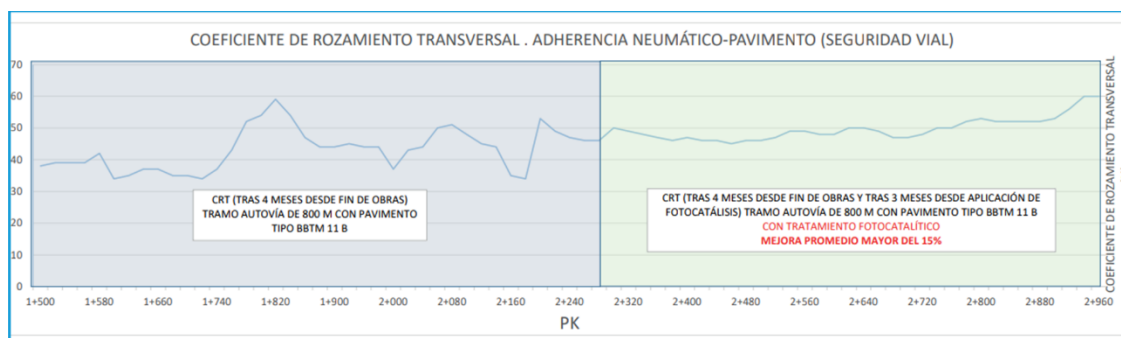


Figura 12. Comparativa de mejora del CRT entre pavimento convencional (izda-azul) y fotocatalítico (dcha-verde)

Se paso el vehículo de auscultación de pavimento, SCRIM, por las superficies pavimentadas (un tramo de 800 m sin fotocatalisis y el tramo adyacente de otros 800 m con fotocatalisis) para recabar datos del estado de la fricción del mismo.

Las campañas de auscultación evidenciaron incrementos del coeficiente de rozamiento transversal, del orden del 15% de mejora, que mide la adherencia neumático-pavimento, respecto a la situación inicial del pavimento, antes de la aplicación del tratamiento fotocatalítico, contribuyendo a mejorar las condiciones de seguridad vial.

Estos resultados coinciden con investigaciones previas desarrolladas sobre materiales fotocatalíticos, como el Proyecto LIFE Photoscaling, liderado por el Instituto Eduardo Torroja del CSIC, aplicados a infraestructuras [6]. [8]

6.3 Durabilidad y comportamiento funcional

Es importante poner de manifiesto que lo que a continuación se va a exponer, no formó parte de los trabajos de investigación de la autopista C-31, sino que son conclusiones extraídas del

proyecto LIFE MINOX STREET que lideró la empresa INECO entre 2014 y 2018, y que contó con la colaboración del CIEMAT, el CEDEX y el Ayuntamiento de Alcobendas (Madrid). [8]

En este proyecto se analizaron, por parte del CEDEX, las posibles afecciones al pavimento (bituminoso y de hormigón), que podrían producirse al instalar diferentes materiales fotocatalíticos.

Sorprendentemente, las modificaciones que este tratamiento generó sobre ambas tipologías de pavimentos, sugirieron una mejora significativa de la resistencia a la deformación permanente y una mayor resistencia al reparto de cargas, en el caso del pavimento bituminoso, y en una mayor resistencia al desgaste y a los ciclos hielo-deshielo, en el caso del pavimento de hormigón, que se traducen en aumentos de durabilidad sobre la mezcla bituminosa investigada.

Baldosa terrazo 36 pastillas blanca MBCp (patrón)					Baldosa terrazo 36 pastillas blanca MBC (material tratado con emulsión fotocatalítica Coverlite®)				
RESISTENCIA CLIMÁTICA	VALOR MEDIO	CLASE	MARCADO	RESULTADO	VALOR MEDIO	CLASE	MARCADO	RESULTADO	
ABSORCIÓN DE AGUA					CARGA DE ROTURA				
MBCp (patrón)	5,5 %	2	B	CONFORME	MBCp (patrón)	6,9 KN	45	4T	CONFORME
MBC (material con Coverlite®)	5,8 %	2	B	CONFORME	MBC (material tratado con Coverlite®)	6,1 KN	45	4T	
ABSORCIÓN CAPILAR					RESISTENCIA A FLEXIÓN				
MBCp (patrón)	0,28 g/cm ²	-	-	-	MBCp (patrón)	7,4 MPa	3	UT	CONFORME
MBC (material con Coverlite®)	0,19 g/cm ²	-	-	-	MBC (material con Coverlite®)	6,7 MPa	3	UT	
RESISTENCIA AL HIELO-DESHIELO CON SALES DESCONGELANTES					RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (URSV)				
MBCp (patrón)	0,00 kg/m ²	3	D	CONFORME	MBCp (patrón)	85	>45	CONFORME	
MBC (material con Coverlite®)	0,03 kg/m ²	3	D	CONFORME	MBC (material con Coverlite®)	79	>45	CONFORME	
RESISTENCIA AL DESGASTE (mm³/5000 mm²)									
MBCp (patrón)	31.334	1	F	CONFORME					
MBC (material con Coverlite®)	33.983	1	F	CONFORME					

Figura 20. Caracterización de loseta patrón MBCp (patrón) y MBC (material con Coverlite®). Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET

Fuente: Coverlite®

Figura 13. Caracterización de pavimento prefabricado de hormigón con fotocatalisis

En el caso del pavimento de hormigón, el tratamiento fotocatalítico mostró un comportamiento estable durante el periodo de seguimiento.

No se detectaron degradaciones prematuras significativas ni pérdidas relevantes de funcionalidad superficial, manteniéndose las propiedades del tratamiento dentro de parámetros satisfactorios.

En el caso del pavimento bituminoso, se podrán observar a continuación las mejoras descritas. [8]

En las gráficas siguientes se evidencian estas afirmaciones, según los resultados declarados por uno de los fabricantes, cuyo material fotocatalítico fue objeto de estudio, por parte del CEDEX.

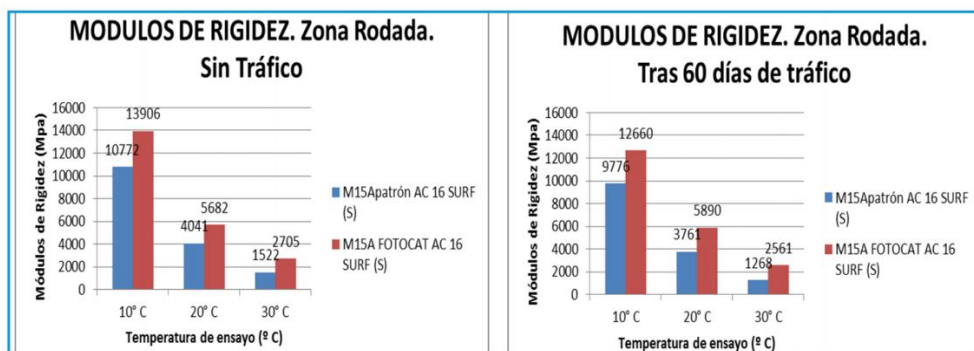


Figura 14. Mejoras en la rigidez de mezclas asfálticas de tipo AC16 por efecto del tratamiento fotocatalítico. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET y Covertite®

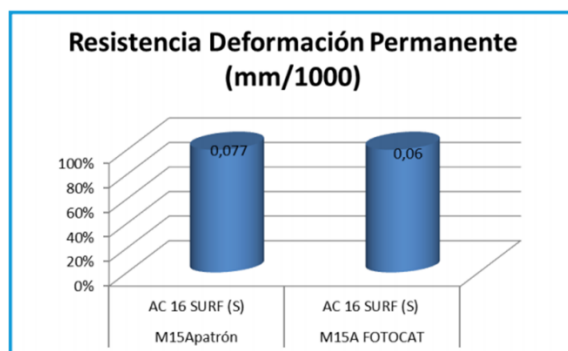


Figura 15. Mejoras en la resistencia a deformaciones plásticas de mezclas asfálticas de tipo AC16 por efecto del tratamiento fotoacatalítico. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET y Covertite®

7 Discusión

La experiencia desarrollada sobre la C-31 y el Proyecto LIFE MINOX STREET demuestran que los pavimentos fotocatalíticos pueden constituir una herramienta eficaz para incorporar nuevas funcionalidades avanzadas a las infraestructuras viarias, tales como la degradación de contaminantes en aire, la mejora de la seguridad vial o los incrementos de durabilidad de los pavimentos.

A diferencia de otras estrategias centradas exclusivamente en la reducción de emisiones en origen, esta tecnología permite actuar directamente sobre los contaminantes presentes en el entorno urbano.

La actuación pone de manifiesto la importancia de integrar innovación tecnológica, sostenibilidad y seguridad vial dentro de las políticas públicas de infraestructuras.

Asimismo, evidencia el potencial de la Compra Pública Innovadora como mecanismo para acelerar la implantación de soluciones avanzadas en obra pública.

Los resultados también muestran la necesidad de continuar desarrollando metodologías normalizadas de evaluación que permitan comparar resultados entre diferentes tecnologías y entornos de aplicación [10]. [8]

8 Conclusiones

La actuación desarrollada sobre la autopista C-31 entre Montgat y Sant Adrià de Besòs representa una de las experiencias más relevantes de aplicación de nanotecnología fotocatalítica sobre pavimentos viarios a escala real en Europa.

Los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones:

- La tecnología fotocatalítica aplicada sobre pavimentos presenta capacidad real para contribuir a la reducción de contaminantes atmosféricos.

- El tratamiento aplicado mostró mejoras relacionadas con la adherencia neumático-pavimento en relación a la seguridad vial.
- La experiencia confirma el potencial de los pavimentos fotocatalíticos como herramienta complementaria dentro de estrategias urbanas de sostenibilidad.
- La Compra Pública Innovadora se consolida como un instrumento eficaz para impulsar tecnologías avanzadas en infraestructuras públicas.

El caso de estudio de la C-31 constituye un precedente de referencia para futuras actuaciones orientadas a integrar innovación, sostenibilidad y salud pública en infraestructuras viarias.

Referencias

- [1] Fujishima, A., Hashimoto, K., & Watanabe, T. (1999). *TiO₂ Photocatalysis: Fundamentals and Applications*. Tokyo, Japón: BKC Inc.
- [2] Chen, J., & Poon, C. (2009). Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Building and Environment*, 44(9), 1899-1906.
- [3] Ballari, M., Hunger, M., Hüskén, G., & Brouwers, H. (2010). NO_x photocatalytic degradation employing concrete pavement containing titanium dioxide. *Applied Catalysis B: Environmental*, 95(3-4), 245-254.
- [4] Almazán Cruzado, D. Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis. (2025). *Guía Práctica para el Diseño, Ejecución y Control de Pavimentos Fotocatalíticos*. Madrid, España.
- [5] European Commission. (2020). *Communication from the Commission: The European Green Deal*. Bruselas, Bélgica.
- [6] Hassan, M., Mohammad, L., & Dylla, H. (2012). Evaluation of the durability of titanium dioxide photocatalyst coating for concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 35, 777-783.
- [7] Generalitat de Catalunya. (2024). *Plan Sectorial de Firmes Sostenibles*. Barcelona, España.
- [8] Almazán Cruzado, D. (2026). *Guía Práctica para el Diseño, Ejecución y Control de Pavimentos Fotocatalíticos. Edición ampliada*. Editado por la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis y la Asociación Ibérica de Fotocatálisis.
- [9] CARTIF. (2025). *Resultados de monitorización ambiental y evaluación fotocatalítica en infraestructuras viarias*. Valladolid, España.
- [10] ISO 22197-1 (2016). *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials — Part 1: Removal of nitric oxide*.