



**Medida y modelización de la eficiencia  
descontaminante de óxidos de nitrógeno de  
materiales fotocatalíticos y su empleo como  
estrategia para la gestión de la calidad del aire: El  
proyecto LIFE MINOX-STREET**

**Autor:** Rafael María Muñoz Melendro

**Institución:** Ayuntamiento de Alcobendas

**Otros autores:** Magdalena Palacios (Centro de Invertigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas, CIEMAT); Belen Cadavid (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX); Gemma Caballero (Ingeniería y Economía del Transporte, INECO)

## Resumen

El contenido del proyecto LIFE MINOX-STREET, cofinanciado por el Instrumento Financiero para el Medio Ambiente de la Unión Europea, se encuentra enmarcado dentro de la 'Estrategia temática sobre la contaminación atmosférica' (COM (2005) 446).

Se desarrolla a lo largo de cuatro años (2013-2017). Tiene como objetivo principal evaluar las estrategias de reducción de las concentraciones en la atmósfera de los óxidos de nitrógeno relacionados con el tráfico rodado en ciudades, ofreciendo a las autoridades locales soluciones eficaces, sostenibles e integrales para la gestión de la calidad del aire, tales como optimizar las condiciones de uso de materiales fotocatalíticos comerciales diseñados para la purificación del aire y evaluar el papel que estos materiales pueden jugar en combinación con otras tecnologías y estrategias.

En la actualidad, se trabaja en proporcionar evidencias basadas en ensayos rigurosos sobre las propiedades físico-químicas y eficiencia de numerosos materiales fotocatalíticos comerciales, tanto en condiciones controladas como en ambiente real. Además, se ha diseñado y puesto a punto un sistema experimental para la caracterización del efecto sumidero de los óxidos de nitrógeno de distintas superficies fotocatalíticas en atmósfera urbana útil para la demostración a escala real de las capacidades descontaminantes de estos materiales implementados en diferentes escenarios urbanos reales. Asimismo, se está desarrollando y validando un modelo para simular la dispersión de contaminantes a escala urbana y analizar la eficacia individual y combinada de distintos materiales fotocatalíticos aplicados a diferentes elementos del entorno urbano a escala de distrito. Adicionalmente, se estudia la desactivación fotocatalítica de estos materiales en condiciones reales para recomendar a las autoridades las mejores prácticas de empleo.

Se espera que los resultados del proyecto tengan impacto en los actores clave de la gestión de la calidad del aire, léase autoridades, industria y medios de comunicación, y preparen el terreno para futuras aplicaciones innovadoras de estos materiales.

**Palabras clave:** calidad del aire, materiales fotocatalíticos, gestión medioambiental, programa europeo Life

## INTRODUCCIÓN

El cumplimiento de las actuales estrategias y políticas ambientales europeas relativas a la mejora de la calidad del aire obliga a continuar abriendo nuevas líneas de investigación y desarrollo que planteen estrategias y medidas y generen tecnologías y productos que demuestren su utilidad para reducir la contaminación atmosférica, especialmente en entornos urbanos en los que la salud de la población puede verse más afectada por las concentraciones excesivas de algunos contaminantes gaseosos.

El proyecto LIFE MINOX-STREET, cofinanciado por el Instrumento Financiero para el Medio Ambiente de la Unión Europea, se encuentra enmarcado dentro de la “Estrategia temática sobre la contaminación atmosférica” (COM (2005) 446), que fija objetivos en materia de salud y medio ambiente, y de la Directiva 2008/50/CE relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, a través de la cual la Unión Europea revisa la legislación europea relativa a la calidad del aire ambiente con el fin de reducir la contaminación a niveles que limiten al mínimo los efectos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente.

En particular, la propuesta que el consorcio del LIFE MINOX-STREET está desarrollando, desde su comienzo, en julio del 2013, con un horizonte de ejecución de cuatro años, presenta un doble objetivo general que permite abordar varias acciones favorecidas por la temática Aire sobre Política y Gobernanza Medioambientales LIFE. Por un lado, es un proyecto de demostración, que está estudiando las capacidades reales que tienen distintos materiales fotocatalíticos comerciales para reducir las concentraciones de NO<sub>x</sub> urbanas, muy relacionadas con el tráfico rodado en ciudades. Por otro lado, LIFE MINOX-STREET está desarrollando un modelo que permitirá estimar la reducción en la concentración de NO<sub>x</sub> en diferentes entornos urbanos esperada del uso de estos materiales. Ello permitirá a los organismos gestores de la calidad de aire urbano disponer de herramientas adicionales para dar respuesta cumplida a los objetivos de calidad del aire fijados por las estrategias y normativas de la Unión Europea, pudiendo apostar por el uso tecnologías y productos que sean eficaces en la reducción de óxidos de nitrógeno y poner en marcha estrategias mejoradas de gestión de la calidad del aire urbano.

## OBJETIVOS

El proyecto plantea cumplir los siguientes objetivos específicos:

- a) Proporcionar evidencias, a través de ensayos y pruebas rigurosas, acerca de las propiedades físico-químicas y de eficiencia descontaminante de varios materiales fotocatalíticos comerciales, tanto en condiciones controladas como en ambiente real.
- b) Parametrizar el efecto sumidero de los niveles de NO<sub>x</sub> en distintas superficies fotocatalíticas en condiciones ambientales.
- c) Demostrar a escala real las capacidades descontaminantes de estos materiales implementados en diferentes escenarios urbanos.
- d) Desarrollar y poner en marcha un modelo a microescala para simular la dispersión de contaminantes a escala urbana.
- e) Analizar la eficiencia individual y combinada de varios materiales fotocatalíticos aplicados en distintos elementos del entorno urbano a escala de distrito.

- f) Determinar la desactivación fotocatalítica de estos materiales en condiciones reales y recomendar una metodología de regeneración.
- g) Identificar y cuantificar los subproductos generados que puedan tener efectos nocivos sobre la salud pública.
- h) Lograr un impacto razonable en actores clave: autoridades, industria, I+D+i y medios de comunicación.
- i) Preparar el terreno para futuras aplicaciones innovadoras de estos materiales.

Para ello, el consorcio ha planteado el desarrollo de distintas acciones, que desglosamos a continuación.

### **ACCIONES**

Desde el arranque del proyecto, han venido desarrollándose las siguientes acciones de carácter preparatorio:

- a) Profundizar en el estado del arte de las técnicas de purificación del aire que emplean materiales fotocatalíticos así como seleccionar algunos de los productos actuales disponibles potencialmente más adecuados y recopilar datos relevantes sobre sus características.
- b) Estudio de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales fotocatalíticos así como de los cambios inducidos por el uso y la durabilidad de los mismos mediante ensayos de laboratorio.
- c) Ensayo de la fotoactivación y la capacidad de purificación del aire y estudio de las propiedades químicas y estructurales y de los cambios inducidos por el envejecimiento y por procedimientos de regeneración en condiciones controladas.
- d) Selección rigurosa de tres materiales fotoactivos diferentes para ser aplicados en distintas infraestructuras urbanas.
- e) Diseño y validación y puesta a punto de una instrumentación y metodología para medir con precisión el efecto de sumidero de  $\text{NO}_x$ .

Y han comenzado ya a llevarse a cabo las acciones de implementación comprometidas en el proyecto, a saber:

- f) Estudio de la influencia de las variables más relevantes en la actividad descontaminante de los materiales en condiciones controladas; ensayo de las propiedades mecánicas y físicas, cambios inducidos por la operación y durabilidad de los materiales fotocatalíticos en pruebas a gran escala; ensayo de la fotoactivación y la capacidad de purificación de aire, las propiedades químicas y estructurales y los cambios inducidos por el envejecimiento y procedimientos de regeneración en condiciones ambientales.
- g) Medida de variables meteorológicas y químicas para parametrizar la velocidad de depósito de  $\text{NO}_x$  en presencia de materiales fotocatalíticos en condiciones ambientales controladas.
- h) Implementación de la química atmosférica urbana y la velocidad de depósito de  $\text{NO}_x$  en un modelo de dispersión de contaminantes a microescala.
- i) Seguimiento del efecto sumidero de  $\text{NO}_x$  de los materiales fotocatalíticos seleccionados aplicados en tres superficies diferentes (calzada, acera y fachada) en tres escenarios urbanos diferentes de Alcobendas (Madrid).

- j) Análisis de subproductos en los lixiviados y en el material particulado depositado y resuspendido.
- k) Extracción de muestras de los materiales fotocatalíticos para estudiar el envejecimiento real y la capacidad de regeneración.
- l) Modelización de los gradientes de contaminantes en los escenarios urbanos seleccionados de Alcobendas.
- m) Modelización del efecto individual y combinado de los materiales fotocatalíticos en los gradientes de contaminantes a nivel de distrito.
- n) Estimación del coste/beneficio de las actuales estrategias de control de NO<sub>x</sub> incluyendo el uso de materiales fotocatalíticos.
- o) Realización de una gran variedad de actividades de difusión.

## **RESULTADOS ESPERADOS**

Los resultados más relevantes esperados, algunos ya obtenidos como consecuencia del avance del proyecto, son:

- a) Ensayar y comparar la utilidad potencial de una amplia variedad de materiales fotocatalíticos comerciales que actúan como sumidero de NO<sub>x</sub> y seleccionar aquellos más prometedores para ser aplicados en superficies urbanas en condiciones reales.
- b) Obtener parametrizaciones de las velocidades de depósito de NO<sub>x</sub> en las superficies fotocatalíticas seleccionadas.
- c) Implementar esos materiales fotocatalíticos en escenarios urbanos reales y demostrar y cuantificar su capacidad descontaminante.
- d) Evaluar el impacto que la aplicación de estos productos podría tener relacionado con la generación de algunos subproductos (nitratos en los lixiviados, depósito y resuspensión de material particulado y su contenido en el catalizador fotoactivo dióxido de titanio y variación en la composición atmosférica de compuestos orgánicos volátiles).
- e) Desarrollar y poner a punto un prototipo, consistente en un modelo numérico a microescala, que trate la química atmosférica urbana y considere las velocidades de depósito de NO<sub>x</sub> en presencia de materiales fotocatalíticos aplicados sobre distintas superficies, capaz de calcular la dispersión de contaminantes gaseosos en zonas urbanas a estudio.
- f) Evaluar el impacto de purificación de aire de la aplicación de los materiales fotocatalíticos combinados en diferentes entornos urbanos a nivel de distrito mediante el uso de este prototipo.
- g) Tener una estimación del coste/beneficio de ésta y otras estrategias de reducción de los NO<sub>x</sub> en el aire urbano.
- h) Ofrecer a las autoridades locales una guía de recomendaciones centrada en la viabilidad y los protocolos óptimos de uso de materiales fotocatalíticos con propiedades descontaminantes como parte de una evaluación integrada de las estrategias de control de la contaminación atmosférica urbana.

## **CORSORCIO**

La viabilidad del proyecto, respaldada y cofinanciada por la Unión Europea, es posible gracias a la competencia de los socios beneficiarios que componen el consorcio de este proyecto, con amplia experiencia cada uno de ellos en su campo de actividad.

**INGENIERÍA Y ECONOMIA DEL TRANSPORTE, S.A. (INECO)**, socio coordinador del proyecto, es una empresa de ingeniería y consultoría del campo del transporte y las infraestructuras. Ha colaborado con el Ministerio de Transporte español y los principales gestores y operadores de infraestructuras del transporte (Aena, ADIF, RENFE) en los logros obtenidos en los últimos 40 años en el campo de las infraestructuras y transporte en España como, por ejemplo, el desarrollo de la red de alta velocidad (una de las mayores del mundo). Además, INECO está actualmente participando en importantes proyectos internacionales como, por ejemplo, la construcción de la línea de alta velocidad de Haramain en Arabia. Además, uno de los núcleos de la actividad de INECO es la I+D+i, invirtiendo en ella anualmente un 1,2% de sus ingresos. INECO tiene un área de medio ambiente formada por 120 personas con una formación y experiencia multidisciplinar. Este área se centra en el amplio sector del transporte y abarca todo el ciclo de vida, desde la concepción de la idea hasta el desmantelamiento de la instalación, pasando por el análisis de viabilidad, la planificación, el diseño del proyecto, la vigilancia durante la ejecución de la obra, la puesta en marcha, mantenimiento y explotación de la infraestructura. Esta visión global permite a INECO valorar adecuadamente los aspectos ambientales que deben ser estudiados y preservados en cada fase y circunstancia: medio físico biótico y abiótico, espacios naturales protegidos, calidad ambiental (ruido, emisiones a la atmósfera, calidad de las aguas y de suelos) y medio socioeconómico. Dentro del campo objeto del proyecto, INECO ha desarrollado diferentes análisis y estudios relativos a la determinación de las emisiones e inmisiones de los distintos modos de transporte, programas para la evaluación, control y reducción de emisiones de gases contaminantes en aeropuertos, estudios de sustitución progresiva de flotas de vehículos de los principales aeropuertos españoles, cálculo de huella de carbono o planes de movilidad urbana sostenible. INECO ha venido participando regularmente en los últimos 12 años de manera exitosa en proyectos del Programa Marco relacionando con el campo del transporte. Ha participado en más de 40 proyectos, 15 de ellos en el 7º Programa Marco y ha liderado 7 consorcios internacionales, como en el caso de los proyectos TITAN, GIANT y GRAIL. Por otro lado, INECO también ha participado exitosamente en proyectos del Programa Nacional de I+D+i como, por ejemplo, los proyectos Viadintegra, de la convocatoria INNPACTO o los proyectos TICLOG, Armónicos y Eurolazo, de la convocatoria de Cooperación Público-Privada para proyectos en el ámbito del transporte. Además, INECO tiene un presupuesto anual interno para financiar proyectos de innovación destinados a la generación de nuevos productos y servicios o a la mejora de procesos. Actualmente, INECO tiene unos 35 proyectos internos en cartera, parte de los cuales pertenecen al ámbito del medio ambiente.

**El Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)**, adscrito al Ministerio de Ciencia e Innovación, es un Organismo Público de Investigación de excelencia en materias de energía y de medio ambiente, así como en múltiples tecnologías de vanguardia y en diversas áreas de investigación básica. Desde su creación en 1951, entonces JEN, y desde 1986 como CIEMAT, lleva a cabo proyectos de investigación y desarrollo tecnológicos, sirviendo de referencia para representar

técnicamente a España en los foros internacionales y para asesorar a las administraciones públicas en materias de su competencia. El CIEMAT está diversificado tecnológica y geográficamente, para atender las necesidades de I+D en España en general y en sus Comunidades Autónomas en particular. La actividad del CIEMAT se organiza en torno a proyectos de investigación que sirvan de puente entre la I+D y el interés social. El equipo humano del CIEMAT está formado por unas 1200 personas (47% titulados universitarios). Los Departamentos de Medio Ambiente y de Energía del CIEMAT, que participan en este proyecto, desarrollan su labor investigadora desde hace más de 25 años en proyectos relacionados, entre otras áreas de interés, con la problemática de la contaminación atmosférica, su caracterización, su impacto y el desarrollo de herramientas y tecnologías de control, por un lado, y con la oxidación fotocatalítica de contaminantes inorgánicos (NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S) y de compuestos orgánicos volátiles (COV's) por otro. En particular, tres Unidades del Departamento de Medio Ambiente del CIEMAT trabajan en la medida de emisiones y el desarrollo de herramientas y tecnologías para su control, la caracterización de su comportamiento físico-químico en la atmósfera mediante la monitorización, y la modelización de su dispersión, para estudiar el impacto provocado por los contaminantes y como herramienta de pronóstico y control de la contaminación atmosférica. Para la realización de los trabajos, se dispone de instalaciones como: laboratorios específicos de emisiones, meteorología, monitores de gases y partículas, sistemas de teledetección y modelos numéricos a escala regional, mesoscala y urbana. Por su parte, el grupo "FOTOAIR-Tratamiento Fotocatalítico de Contaminantes en Aire" del Departamento de la Energía trabaja en el tratamiento fotocatalítico de contaminantes en aire, disponiendo de instalaciones para realizar ensayos normalizados y de detoxificación y desinfección solar en aire. Dentro del área propuesta, CIEMAT ha participado en más de 100 proyectos de I+D+i nacionales e internacionales, en colaboración tanto con organismos públicos como privados. Asimismo, ha colaborado y mantiene contacto a escala nacional e internacional con diferentes Institutos de Investigación y Universidades, y participa en Redes Temáticas y Acciones Internacionales Temáticas especializadas (CYTED, COST). Asimismo colabora en acciones formativas relacionadas con la contaminación atmosférica urbana.

El **Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)** fue creado en 1957 como un organismo autónomo y actualmente está adscrito orgánicamente al Ministerio de Fomento y funcionalmente a los Ministerios de Fomento y de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. El CEDEX es un organismo público de investigación y experimentación que provee apoyo multidisciplinar en las tecnologías de la ingeniería civil, la edificación y el medio ambiente asociado. Sus unidades técnicas especializadas, Centros y Laboratorios, alguno de los cuales cuenta con más de cien años de experiencia, proporcionan asistencia técnica de alto nivel, investigación aplicada y desarrollo tecnológico en las áreas propias del sector de la ingeniería civil, entre ellas carreteras, estructuras y materiales o técnicas aplicadas a la ingeniería civil y el medio ambiente.

Su participación en proyectos ligados con la afección al medio, dota a las técnicas de estudio de materiales de un componente que trasciende del mero comportamiento estructural y funcional. La participación activa en los proyectos FENIX, y CLEAM HRE en aspectos dedicados a la durabilidad y empleo de subproductos, o en DIRECT MAT, RECNHOR y PREDICEX dedicado más específicamente a la utilización de residuos o el EPOMM-PLUS sobre sostenibilidad urbana o el proyecto ERA-NET TRANSPOT, entre otros, muestran la capacidad, y experiencia del CEDEX en el estudio del comportamiento

de los firmes y de las estructuras y sus repercusiones a los usuarios y a la población afectada. Algunos de estos proyectos han dado lugar a la elaboración de normativa nacional para el empleo de determinados materiales.

El Laboratorio Central de Estructuras y Materiales y el Centro de Estudios del Transporte llevan a cabo los estudios mecánicos y de durabilidad de los productos fotocatalíticos aplicados sobre distintos tipos de paramentos horizontales. En concreto, el Laboratorio Central se encarga del estudio de las propiedades mecánicas y de durabilidad de los productos aplicados en materiales que se emplean en la construcción de aceras. Por otro lado, el Centro de Estudios del Transporte se encarga del estudio del comportamiento mecánico de los firmes en los cuales se aplican los productos fotocatalíticos. En ambos casos lo que se busca es verificar que los materiales empleados en la construcción de aceras y de firmes sobre los que se aplican estas soluciones, siguen manteniendo unas condiciones adecuadas de funcionamiento, de forma que no implique un riesgo para las autoridades competentes la utilización de estos productos, y cuantificar la durabilidad de los mismos para poder estimar el coste que supondría la implementación de estas medidas de reducción de contaminantes atmosféricos para los ayuntamientos. Estas son las Unidades que participan en el proyecto aportando su amplia experiencia y sus instalaciones, tanto de laboratorio como de modelización a escala real.

**Alcobendas** tiene una extensión de 4.412 hectáreas y cuenta en la actualidad con una población de 112.314 habitantes. Situada al norte de Madrid (España), actualmente se puede considerar una continuación de la citada ciudad. Comprende cinco áreas empresariales con importante presencia de sedes de empresas multinacionales. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), en su último informe sobre la región de Madrid, destaca a la ciudad de Alcobendas como uno de los activos económicos de la región. Así, se citan dos factores característicos de la ciudad: la gran inversión realizada en infraestructuras territoriales y el alto grado de desarrollo empresarial, propiciado por la ubicación en sus parques tecnológicos, de numerosos centros de investigación y plantas de producción. El **Ayuntamiento de Alcobendas** dispone en la actualidad de 1.393 empleados públicos que se encuadran en diferentes niveles, que responden a las categorías generales de la administración pública española y un presupuesto anual de 304,569 millones de euros (2009), gestionados a través de una estructura que reúne al Ayuntamiento y tres Patronatos: Patronato Municipal de Deportes, Patronato Sociocultural, Patronato de Bienestar Social y cuatro empresas públicas (Seromal -Servicio de Obras Municipales de Alcobendas-Emarsa -Gestión de la Recaudación Municipal de Alcobendas-, Sogepima-Sociedad de Gestión del Patrimonio Inmobiliario Municipal de Alcobendas- y Emvialsa -Empresa Municipal de la Vivienda de Alcobendas-). El Ayuntamiento de Alcobendas apuesta por la cultura de la calidad como forma de gestión. Trabaja con el Modelo Europeo de Excelencia como patrón de referencia, donde las herramientas de calidad (sistemas de indicadores, gestión por procesos, certificaciones ISO, cartas de compromiso, medición gracias al observatorio de la ciudad, laboratorio económico y brújula económica) están plenamente integradas en los trabajos cotidianos de la institución. Por último, hay que indicar que el Ayuntamiento de Alcobendas desarrolla políticas activas para el fomento de una Movilidad Urbana Sostenible, estando implantando en la actualidad el Plan de Movilidad Urbana Sostenible, el Plan Director de la Bicicleta y el Programa Camino al Cole, como programas más destacados.

## AVANCE DEL PROYECTO

### **A) Estudio de mercado y elección de materiales fotocatalíticos comerciales para su ensayo.**

El hito fundamental de esta Acción, ya finalizada, ha sido la selección de materiales fotocatalíticos a ensayar en las Acciones planteadas en el proyecto.

Para ello, primeramente, se ha procedido al estudio detallado del estado del arte y de los nuevos desarrollos e investigaciones publicados y recabados sobre los distintos materiales fotocatalíticos existentes en el mercado, así como de las diversas técnicas desarrolladas para su empleo en pavimentación de calzadas y aceras, en paramentos mediante ladrillo pintado o morteros y en pinturas para los diferentes elementos de mobiliario urbano. Esta tarea ha dado lugar al Informe “Estado del arte de los materiales fotocatalíticos depuradores de la atmósfera. Prestaciones para la aplicación en entornos urbanos”.

Dicho estudio ha permitido una selección razonable, siguiendo criterios técnicos de eficiencia, disponibilidad y coste, de las empresas productoras de materiales fotocatalíticos y tipos de productos sobre los que se han llevado a cabo los ensayos previstos en las acciones posteriores del proyecto. Dicha selección se ha visto concretada en un “Listado de materiales fotocatalíticos a ensayar”.

### **B) Selección de materiales fotocatalíticos (Parte I): Ensayos mecánicos y de durabilidad de mezclas bituminosas y hormigones.**

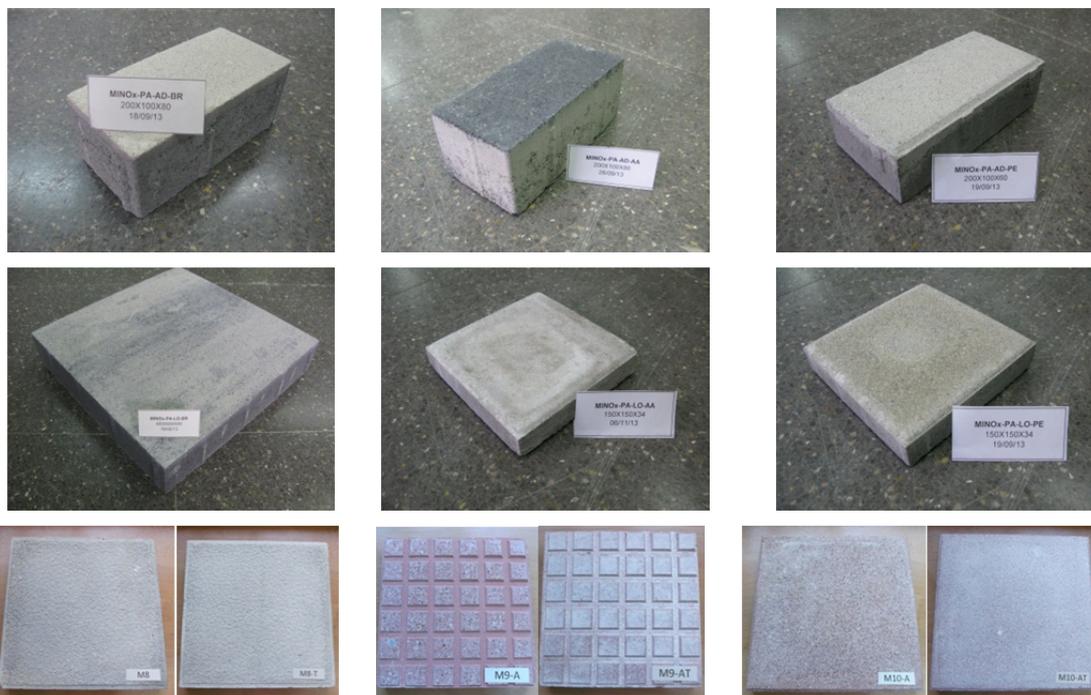
Los objetivos fundamentales de esta Acción han sido:

- Evaluación de las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas bituminosas e hidráulicas tratadas con aditivos fotocatalíticos.
- Verificación de la totalidad de los estándares de calidad exigibles por la normativa de aplicación para la puesta en obra de los citados materiales en condiciones óptimas de durabilidad y seguridad.

#### ***Participación del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales***

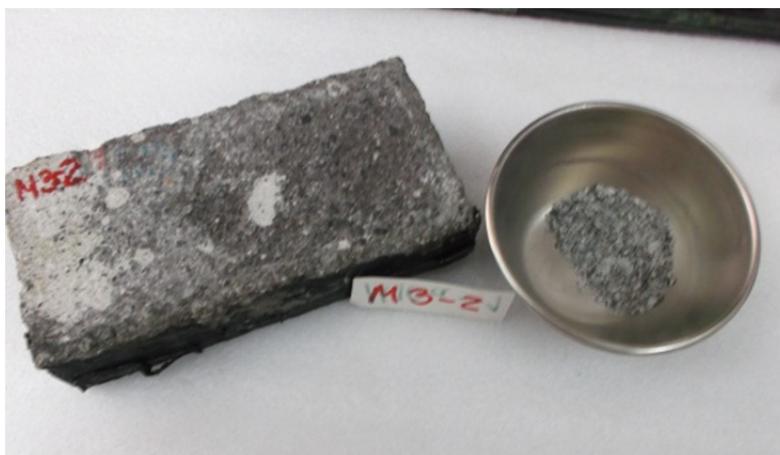
El Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX ha realizado un completo estudio sobre las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de distintos productos de hormigón para pavimentación de aceras: baldosas y adoquines. Este trabajo se engloba dentro de la tarea “Selección de materiales fotocatalíticos (Parte I): Ensayos mecánicos y de durabilidad de mezclas bituminosas y hormigones”.

En total se han ensayado 3 tipos de adoquines fotocatalíticos, 2 baldosas fotocatalíticas y 4 baldosas no fotocatalíticas aditivadas con sol-gel.



***Productos prefabricados de hormigón ensayados en el proyecto***

Para la validación de cada uno de los productos, se ha seguido el procedimiento de muestreo y criterio de conformidad de acuerdo a la normativa correspondiente (UNE-EN 1339:2004 para el caso de las baldosas de hormigón, UNE-EN1338:2004 para los adoquines y UNE-EN 13748 para baldosas de terrazo de uso exterior), evaluando las siguientes propiedades: forma y dimensiones, espesor de la doble capa, resistencia y carga de rotura, resistencia al desgaste, resistencia al deslizamiento inicial y al final de su vida útil, y resistencia climática. En el caso de algunos de los materiales aditivados con sol-gel, los ensayos se han realizado adicionalmente sobre muestras previas al tratamiento, para evaluar la posible influencia del producto fotocatalítico sobre algunas de las propiedades de los elementos prefabricados, especialmente aquellas relacionadas con la capa superficial de estos elementos, como son la resistencia climática, el desgaste y la resistencia al deslizamiento.



**Ensayos de deslizamiento y resistencia climática (resistencia al hielo-deshielo con sales fundentes)**



**Ensayo de resistencia al desgaste**



**Ensayo de resistencia a flexión en baldosas y carga de rotura en adoquines**



### **Participación del Centro de Estudios del Transporte**

El Centro de Estudios del Transporte participa en el proyecto a través de la realización de ensayos de laboratorio y a escala real con el objetivo de estudiar y valorar el efecto de la incorporación de los productos fotocatalíticos en las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas bituminosas. Estos trabajos se engloban dentro de las tareas del proyecto: "Selección de materiales fotocatalíticos (Parte I): Ensayos mecánicos y de durabilidad de mezclas bituminosas y hormigones" y "Estudio de la influencia de variables

determinantes de la actividad fotocatalítica en condiciones controladas y ensayos de regeneración: Ensayo acelerado de firmes a escala real”.

Se han estudiado 5 productos comerciales para aplicar sobre pavimentos bituminosos previamente seleccionados. Los productos fotocatalíticos se aplicaron sobre dos tipos de soporte distinto: 3 de ellos sobre una mezcla bituminosa discontinua tipo BBTM11B, 1 sobre una mezcla cerrada tipo AC16S y 1 sobre los dos tipos de soporte, en total 6 secciones con productos. La información disponible sobre la aplicación de estos productos indica que la presencia de huecos en el pavimento bituminoso facilita la fijación del producto sobre el mismo, pero la inclusión de otro tipo de soporte, la mezcla cerrada, se decidió debido a que es el tipo de pavimento que con más frecuencia se usa en las calles urbanas y el soporte influye bastante en la estabilidad del producto fotocatalítico por lo que se consideró conveniente estudiar soluciones existentes para este tipo de sustrato.



***Productos sobre mezcla discontinua***



***Productos sobre mezcla discontinua***



***Productos sobre mezcla cerrada***

La evaluación y validación de las propiedades mecánicas de cada uno de los productos se lleva a cabo mediante ensayos de laboratorio, mientras que el estudio de la durabilidad se realiza con el ensayo de desgaste en la Pista de Ensayo del CEDEX.

La Pista de Ensayo es una instalación singular ubicada en la Autovía de Colmenar Viejo km 18,2 donde se realiza el estudio a escala real del comportamiento de los firmes. Consta de dos tramos rectos unidos por dos tramos curvos de 75 metros de longitud cada uno que forman un circuito cerrado.



### ***Pista de Ensayo de firmes del CEDEX***

Dos equipos simuladores de tráfico circulan continuamente de forma controlada a velocidad variable aplicando cada uno 6,5 toneladas de carga que corresponde al semieje de un vehículo pesado. Intenta recoger de este modo la situación más agresiva de las condiciones de carga que habitualmente circulan por las carreteras.

El carretón de carga es eléctrico y está equipado con neumáticos convencionales que se sitúan de forma automática en diferentes posiciones transversales produciendo una banda rodada de aproximadamente 1 m de anchura. Todo el proceso se controla de forma automática por un programa informático específico que permite el funcionamiento continuo.

Para llevar a cabo el ensayo de desgaste se extienden los productos en distintas zonas de la Pista, dependiendo del tipo de sustrato sobre el que deban aplicarse, y se realizan auscultaciones periódicas para evaluar el comportamiento superficial de cada una de las secciones con respecto a las secciones de referencia o blanco de cada uno de los sustratos empleados. A medida que va circulando el vehículo sobre los productos, se extraen muestras de las zonas de ensayo para que CIEMAT evalúe la actividad fotocatalítica de los diferentes aditivos empleados en el pavimento conforme se produzca el desgaste de las secciones debido al paso de los vehículos.

El plan de auscultación sobre cada mezcla aditivada es el siguiente:

- Ensayo para medida de la capacidad drenante: Ensayo de permeabilidad.
- Ensayo para evaluar microtextura del pavimento (adherencia neumático pavimento): Medida del coeficiente de resistencia al deslizamiento con el Péndulo del TRRL.
- Ensayo para evaluar la macrotextura del pavimento (hidroplaneo): Ensayo del círculo de arena para la medida de la profundidad media de textura.
- Ensayo para evaluar la macrotextura del pavimento: Texturómetro láser.
- Ensayo para evaluar la capacidad portante: Deflectómetro de impacto.
- Ensayo para evaluar la regularidad transversal de las secciones: transversoperfilómetro.
- Inspección visual para la evaluación de la fisuración.
- Evaluación de la estabilidad del producto a través del análisis de imágenes.



***Medida del coeficiente de resistencia al deslizamiento con el Péndulo del TRRL, ensayo del círculo de arena para la medida de la profundidad media de textura y ensayo para evaluar la regularidad transversal de las secciones***

Las variables climáticas que pueden afectar al comportamiento de las mezclas, como la temperatura, la humedad, la radiación, la precipitación, la velocidad y dirección del viento son medidas y registradas gracias a una completa estación meteorológica.

Para la evaluación de las propiedades mecánicas del material se realizan ensayos de laboratorio sobre probetas fabricadas en laboratorio y sobre testigos extraídos de las secciones de la Pista. Entre los ensayos realizados se encuentran los siguientes:

- Ensayo de densidad y contenido de huecos de cada sección al principio y final del ensayo de desgaste.
- Ensayo de rigidez a diferentes temperaturas de cada sección.
- Ensayo de pérdida de partículas de cada sección.
- Ensayo de deformaciones plásticas de cada sección.



### ***Extracción y corte de testigos y catas para ensayos de laboratorio***

Todos estos trabajos permiten realizar un estudio detallado de la influencia de estos productos fotocatalíticos sobre las mezclas bituminosas empleadas en la construcción de firmes.

### **C) Selección de materiales fotocatalíticos (Parte II): Ensayos de actividad fotocatalítica y envejecimiento sobre mezclas bituminosas, hormigones y pinturas.**

Los objetivos fundamentales de esta Acción han sido:

- Evaluar la eficiencia fotocatalítica de los materiales fotocatalíticos comerciales preseleccionados en el estudio de mercado.
- Evaluar la modificación de actividad fotocatalítica de estos materiales sometidos tanto a desgaste por rodadura como a envejecimiento.
- De manera complementaria a los ensayos mecánicos y de durabilidad de mezclas bituminosas y hormigones, permitir la selección de tres tipos de materiales fotocatalíticos (mezcla bituminosa, hormigón y pintura) para ser implementados a escala real.

En el curso de esta Acción, desarrollada por el "Grupo FOTOAIR-Tratamiento Fotocatalítico de Contaminantes en Aire" del Departamento de Energía del CIEMAT, se ha ensayado, en condiciones controladas de laboratorio, siguiendo la norma ISO 22197-1, la actividad fotoactiva y capacidad descontaminante tanto de los distintos materiales comerciales ensayados por el CEDEX (hormigones y mezclas bituminosas) como, adicionalmente, de distintos tipos de pinturas fotocatalíticas comerciales.

Se ha estudiado, asimismo, la modificación que dicha capacidad sufre como consecuencia de su envejecimiento (influencia de humedad relativa e irradiación). Por otra parte, CIEMAT ha ensayado la actividad fotocatalítica de muestras de hormigones sometidos en el CEDEX a ensayos de desgaste y de materiales bituminosos sometidos en el CEDEX a ensayos de desgaste por rodadura.

Los ensayos de actividad fotoactiva se han ampliado a los materiales del Ayuntamiento de Alcobendas sobre los que van a implementarse los productos fotocatalíticos elegidos. Se han ensayado mediante ISO, además de probetas representativas de los materiales utilizados habitualmente por el Ayuntamiento de Alcobendas en aceras y fachadas, probetas procedentes de dos tramos de calzada distintos del Ayuntamiento de Alcobendas sobre los que previamente se había implementado una material fotocatalítico comercial que presenta en los ensayos buenos resultados de actividad fotoactiva, habiéndose estudiado su respuesta al desgaste por rodadura en calle.

Como mencionamos, de forma complementaria y paralela, se ha abordado el análisis de envejecimiento de todos estos materiales mediante la utilización de una cámara de envejecimiento acelerado (Atlas CM3000) y se han analiza tanto la posible pérdida de capacidad fotoactiva como los posibles cambios físico-químicos en condiciones drásticas de humedad relativa e irradiación mediante diferentes técnicas de caracterización. Adicionalmente, las muestras de materiales fotocatalíticos se han sometido a ensayos de envejecimiento en condiciones ambientales (intemperie), analizándose la posible pérdida de eficiencia fotocatalítica a lo largo del tiempo mediante el ensayo ISO citado.

Los resultados de los ensayos realizados por ambas instituciones (CEDEX y CIEMAT), en el curso de las Acciones desarrollas anteriormente, han permitido la selección de tres tipos distintos de materiales fotocatalíticos (mezcla bituminosa, hormigón y pintura) óptimos para ser implementados en tres emplazamientos diferentes de la ciudad de Alcobendas. Estos resultados se recogen, parcialmente, en el Informe “ Resultados de los ensayos de propiedades mecánicas, de durabilidad, de actividad fotocatalítica y de envejecimiento de materiales fotocatalíticos”

Por último, el CEDEX lidera la organización de una “Jornada de Diseminación” dirigida a los fabricantes de este tipo de productos comerciales, donde se expondrán los resultados de los ensayos descritos llevados a cabo por el CEDEX y el CIEMAT.

#### **D) Sistema experimental para la medida de la velocidad de depósito de NO<sub>x</sub> sobre superficies fotocatalíticas en ambiente exterior.**

El objetivo principal de esta Acción, desarrollada por las Unidades de “Emisiones Contaminantes” y “Caracterización de la Contaminación Atmosférica y COPs”, del Departamento de Medio Ambiente del CIEMAT, ha sido implementar un procedimiento para la medida de la velocidad de depósito seco de NO<sub>x</sub> sobre los materiales fotocatalítico instalado en una superficie de planta horizontal ubicada en ambiente exterior.

Se ha diseñado, instalado y puesto en operación un sistema para la determinación experimental del depósito seco de NO<sub>x</sub> sobre materiales fotocatalíticos en condiciones de ambiente exterior. Este sistema permite cuantificar el transporte de NO y NO<sub>2</sub> desde el aire hasta las superficies fotocatalíticas, en ausencia de precipitación, como consecuencia de la interacción de dichos gases con los centros activos de TiO<sub>2</sub> presentes en dichas superficies.



El sistema experimental implementado se basa en la aplicación de un método consistente en medir en el aire ambiente los gradientes verticales de temperatura y de concentración de la sustancia depositable, para llegar a inferir, posteriormente, el flujo de depósito seco de dicha sustancia empleando la teoría del transporte por difusión turbulenta. Para poder implementar este método, el emplazamiento de medida debe satisfacer un conjunto de requisitos estrictos en sus condiciones de contorno, tanto físicos como químicos, relacionados con el comportamiento de la atmósfera en la zona en que está situado, condicionando fuertemente la elección del emplazamiento experimental. Desde el punto de vista práctico, estas exigencias implican, entre otras cosas, que el lugar de medida debe ser un espacio situado sobre una superficie plana y horizontal, suficientemente amplia y razonablemente alejada tanto de obstáculos que perturben los flujos de aire como de cualquier tipo de fuente emisora de las sustancias depositables y de cualesquiera otras que puedan reaccionar con ellas. La calidad de los datos de flujo de depósito que se puedan obtener depende crucialmente del cumplimiento de estas condiciones de contorno. El escenario elegido para el desarrollo de la Acción es una zona interior al recinto del CIEMAT que cumple los requisitos mínimos exigibles desde el punto de vista físico y que se encuentra lejos de la influencia directa de las vías de tráfico exteriores al CIEMAT.

El dispositivo experimental diseñado e implementado ha consistido en la preparación de una superficie cuasi-circular cubierta por un material fotocatalítico que constituye una auténtica “isla fotocatalítica” en cuyo centro geométrico se ha situado sistema experimental de medida de depósito. La torre de medida consta de un mástil soporte de que cuenta con un conjunto de sensores meteorológicos y de sondas para el muestreo continuo de aire ambiente instalados a distintas alturas sobre la misma vertical. Con este sistema de medida se puede determinar el gradiente vertical de temperatura, la humedad ambiente, la radiación solar global en superficie y la velocidad y dirección del viento. Las muestras de aire obtenidas continuamente a los distintos niveles son transportadas por tubos de teflón hasta un punto exterior a la superficie fotocatalítica, lejos de su influencia, en donde se sitúa la caseta de control del experimento. Adicionalmente, se ha situado una sonda de muestreo de aire en un punto de referencia exterior fuera de la isla y a una altura suficientemente elevada, constituyendo el nivel referencia a efectos de la concentración de  $\text{NO}_x$ . En el interior de la caseta se encuentra el monitor analizador de  $\text{NO}_x$ , el sistema de aspiración de las líneas de aire de muestra y el sistema de selección secuencial de la muestra a analizar en cada momento. También se encuentra en la caseta el ordenador que implementa el programa con las funciones de control del conjunto del experimento y de adquisición de datos.

Todos los componentes del sistema experimental son chequeados periódicamente para garantizar su correcto funcionamiento. El sistema creado es versátil y admite la posibilidad de modificar su geometría.

El CIEMAT ha generado el entregable. “Software de control, adquisición y tratamiento de datos para la obtención de velocidades de depósito seco: SIADAT (Sistema de Información y Análisis de Datos”).

### **Caracterización del efecto descontaminante de los materiales fotocatalíticos en ambiente real.**

En la actualidad, el sistema experimental para la medida de la velocidad de depósito de  $\text{NO}_x$  sobre superficies fotocatalíticas en ambiente exterior, desarrollado e implementado por CIEMAT, se encuentra plenamente operativo en las instalaciones de dicho Centro, realizando medidas en continuo sobre una isla fotocatalítica constituida por los materiales seleccionados para su implementación en calle. Se espera, para cada material seleccionado, que la superficie presente una actividad suficiente para, como resultado, confirmar su capacidad como sumidero de  $\text{NO}_x$  en ambiente real, caracterizar el efecto macroscópico inducido por el material dispuesto en la zona de experimentación sobre la distribución vertical de concentración de  $\text{NO}_x$  ambiental, observar y medir la formación de un gradiente neto de concentración de  $\text{NO}_x$  sobre el material fotocatalítico aplicado y, por último, obtener la velocidad efectiva de depósito seco de  $\text{NO}_x$  como función de las distintas variables ambientales que mayor influencia tengan sobre dicha velocidad.

### **Implementación de la química reactiva y velocidad de depósito de $\text{NO}_x$ en un modelo CFD**

El principal objetivo de esta Acción, desarrollada por la Unidad de “Modelización de la Contaminación Atmosférica” del Departamento de Medio Ambiente del CIEMAT, con la colaboración de INECO, es la preparación de un modelo CFD (“Computational Fluid Dynamics”) utilizado para simular la dispersión de contaminantes atmosféricos reactivos. Para alcanzar el objetivo definido se han realizado dos estudios consecutivos: Implementación y validación de química reactiva simple considerando el equilibrio e introducción de mecanismos químicos más complejos.

El proceso a seguir para la implementación de la química reactiva atmosférica se ha basado en el desarrollo del mismo escenario propuesto en estudios anteriores con distintos modelos CFD. De esta forma es posible realizar una comparación de los resultados obtenidos con los existentes en la bibliografía antes de abordar la introducción de mecanismos químicos más complejos.

El estudio se ha centrado en un escenario simplificado compuesto por una calle con un edificio a ambos lados, donde el viento incide perpendicularmente a la misma y se han considerado las emisiones propias del tráfico. Además de simular el transporte y la difusión atmosférica de los contaminantes, se ha introducido un mecanismo químico simple considerando el equilibrio fotoestacionario entre el ozono ( $\text{O}_3$ ), monóxido de nitrógeno ( $\text{NO}$ ) y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ).

Mediante las simulaciones realizadas, se obtiene la evolución del transporte de los contaminantes dentro de la calle. Entre las características destacables de estos resultados se encuentra el gradiente de concentración encontrado en el suelo entre

ambos lados de la calle, siendo mayor la concentración en la zona de sotavento que en la de barlovento. Además se observa un decrecimiento vertical de la concentración de NO y NO<sub>2</sub> en ambas partes de la calle. Mediante el análisis de los perfiles verticales de NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> tomados a un metro de distancia de cada edificio se desprende la diferencia de concentraciones de NO y NO<sub>2</sub> entre las aceras de la calle, que pueden alcanzar un factor 2 como se ha establecido en la bibliografía.

En este primer estudio se ha conseguido reproducir el mismo escenario incluyendo un mecanismo químico simple propuesto en investigaciones anteriores. Sobre esta base, se ha podido proceder a implementar mecanismos químicos más complejos representativos de la química atmosférica urbana y se ha estudiado el mecanismo químico condensado más adecuado para el objetivo del proyecto.

Paralelamente, se ha comenzado a trabajar en la implementación en el modelo de CFD de las velocidades de depósito ( $V_d$ ) determinadas por la presencia de los materiales fotocatalíticos. Se ha estudiado el estado del arte y simulado un sumidero localizado en las celdas computacionales más próximas a la superficie del dominio, representándose el flujo de depósito de NO y NO<sub>2</sub> ( $F = -V_d C_i$ , donde  $C_i$  es la concentración de cada contaminante,  $i$ ). Los valores de estas velocidades de depósito se parametrizarán gracias a los experimentos en condiciones ambientales que se están llevando a cabo en ambiente exterior en el CIEMAT.

### **Seguimiento, difusión y gestión del proyecto**

El consorcio del proyecto, con la participación de todos los socios beneficiarios del mismo, y bajo la coordinación de INECO como socio coordinador, viene llevando a cabo otras acciones y tareas comprometidas relacionadas con diferentes relevantes aspectos. Esbozamos a continuación las principales líneas de actuación contempladas en curso, en el marco de las cuáles se está desarrollando una intensa labor.

Acciones de seguimiento:

- Seguimiento del impacto del proyecto sobre el problema ambiental abordado
- Seguimiento del impacto socioeconómico del proyecto
- Seguimiento del impacto del proyecto sobre los materiales ensayados

Acciones de comunicación:

- “Plan de Comunicación y Difusión del proyecto” como parte de los entregables comprometidos.
- Página Web del proyecto
- Paneles informativos
- Informes oficiales

El “Inception Report” ha sido evaluado ya por la Comisión Europea y se ha dado el visto bueno al estado de avance del proyecto, respaldando la continuación del mismo.

- Otras tareas de comunicación: soportes físico y electrónico, congresos y conferencias, cursos y sesiones informativas

Gestión del proyecto.

Creación de redes con otros proyectos.

## ACCIONES FUTURAS

El consorcio del LIFE MINOX-STREET ha conseguido, gracias a la capacidad, experiencia y espíritu de colaboración de los socios que lo integran, un significativo avance en las acciones comprometidas y los resultados esperados. Sin embargo, queda mucho trabajo por desarrollar y dudas que despejar para poder seguir avanzando en el conocimiento del comportamiento de los materiales fotocatalíticos en ambiente real y poder ofrecer resultados concluyentes, basados en ensayos y experimentos rigurosos, tanto a las autoridades que intervienen como gestoras de la calidad del aire como a ciudadanos, fabricantes y organismos y empresas del sector I+D+i.

Las futuras acciones comprometidas se refieren a dos pilares de actuación fundamentales e interconectados: la caracterización del efecto descontaminante de los materiales fotocatalíticos en ambiente real y la modelización de los contaminantes atmosféricos a escala urbana teniendo en cuenta la presencia de estos materiales.

Próximamente, el CIEMAT comenzará a realizar distintas campañas experimentales en diferentes escenarios urbanos de Alcobendas en los que se van a implementar los materiales fotocatalíticos seleccionados en diferentes tipos de superficies para estudiar y documentar de manera desacoplada (independiente) y secuencial en el tiempo, sus efectos ambientales. Estos escenarios se han elegido de conformidad con el Ayuntamiento de Alcobendas, atendiendo a diferentes criterios de garanticen su correcto funcionamiento (orientación, geometría, flujo de tráfico, idoneidad para la ubicación de la instrumentación, posibilidad de la puesta en obra, etc.).

Alcobendas se convierte así en el emplazamiento de desarrollo de estas campañas. Dependiendo del material fotocatalítico seleccionado para cada una de las aplicaciones previstas, la manera de implementación variará de acuerdo con sus características concretas y se realizará siguiendo las recomendaciones de los fabricantes y contando con la experiencia y participación de los expertos en ejecución de obras viarias del Ayuntamiento de Alcobendas. El Ayuntamiento de Alcobendas dota al proyecto, además, del conocimiento de base que se requiere sobre la ciudad para poder desarrollar las tareas comprometidas. Además, este Ayuntamiento pondrá a disposición información sobre calidad del aire, aforos de tráfico, localización de red de pluviales y depuradoras, etc. y realizará la gestión y contacto con los entes públicos y privados que puedan verse involucrados en el desarrollo de las campañas experimentales. Con objeto de complementar esta información, INECO colaborará activamente en la estimación de las emisiones procedentes del tráfico rodado utilizando datos de tráfico monitorizados en tiempo real.

Estas campañas experimentales permitirán al CIEMAT la validación y puesta a punto del prototipo numérico desarrollado en la acción de implementación de la química gaseosa reactiva urbana y velocidad de depósito en un modelo CFD, más arriba descrita, con objeto de simular la dispersión de contaminantes en atmósfera urbana y el efecto potencial de la implementación de materiales fotocatalíticos a escala de distrito y poder desarrollar, finalmente, la guía para el uso de materiales fotocatalíticos comprometida en el proyecto, cuyo responsable es INECO.