



## Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas

**Autor:** Marisol Faraldos (ICP-CSIC)

**Institución:** Asociación Ibérica de Fotocatálisis (AIF)

**Otros autores:** Ana Bahamonde (ICP-CSIC); Ana Iglesias (ICP-CSIC); Jaime Carbajo (ICP-CSIC); Gianni Rovito (Consultor); David Almazán (Eptisa)

## Resumen

El objeto de este documento, predominantemente divulgativo, es facilitar a la sociedad en general, y a los técnicos y profesionales de los sectores de Obra Civil y Urbanismo, en particular, la función, las condiciones, el diseño y la aplicación de productos fotocatalíticos o 'descontaminantes', sobre las infraestructuras urbanas de nuestras ciudades, para disfrutar así de una mayor calidad del aire al respirar. Estos materiales fotocatalíticos, cuando son expuestos a la luz del sol, son capaces de eliminar los contaminantes adsorbidos sobre su superficie, que posteriormente son arrastrados por la lluvia.

Para ello será necesario abordar conceptos básicos, como la calidad del aire urbano y en interiores, sus efectos sobre la salud de los ciudadanos; la fotocatalisis, los materiales fotocatalíticos y su aplicación en infraestructuras urbanas de interior y exterior; la legislación actual o los protocolos de medición y control de estos productos, y cuestiones tan fundamentales, como saber qué, cómo, cuándo, dónde y porque aplicar estos productos.

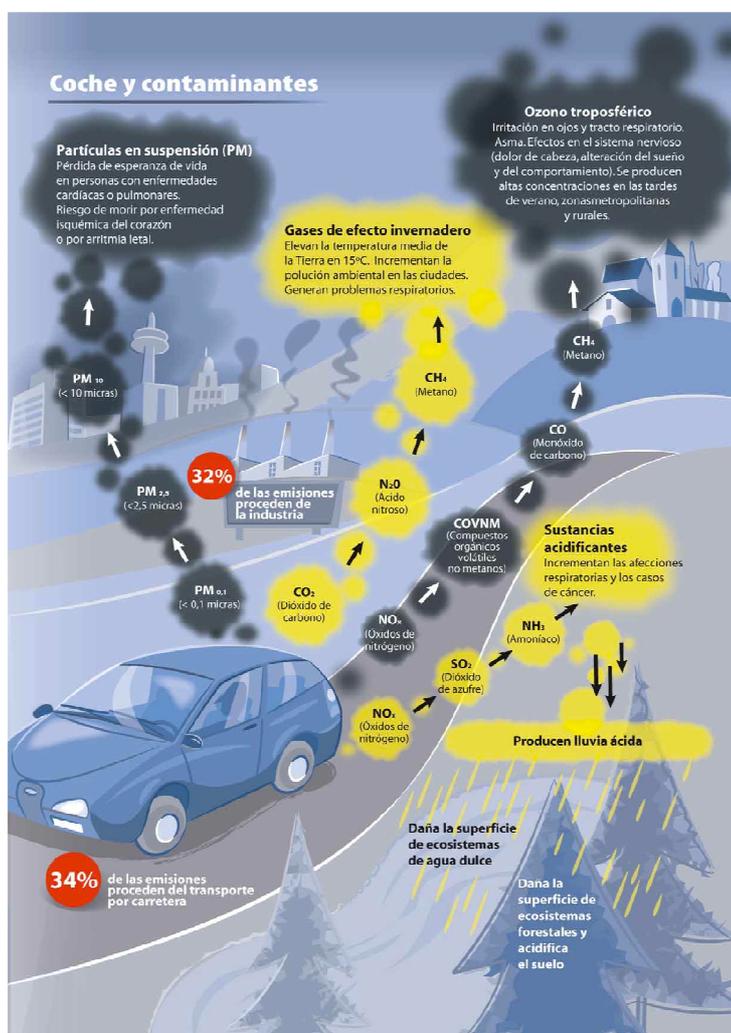
Por tanto, se hablará de las ventajas del empleo de estos productos fotocatalíticos, pero también de sus retos futuros, incluyendo ejemplos de investigaciones llevadas a cabo por la comunidad científica en los últimos años.

**Palabras claves:** Fotocatálisis, Descontaminación, NOx, Calidad, Aire, Urbano, Pliego

## 1. INTRODUCCIÓN: LA CALIDAD DEL AIRE URBANO

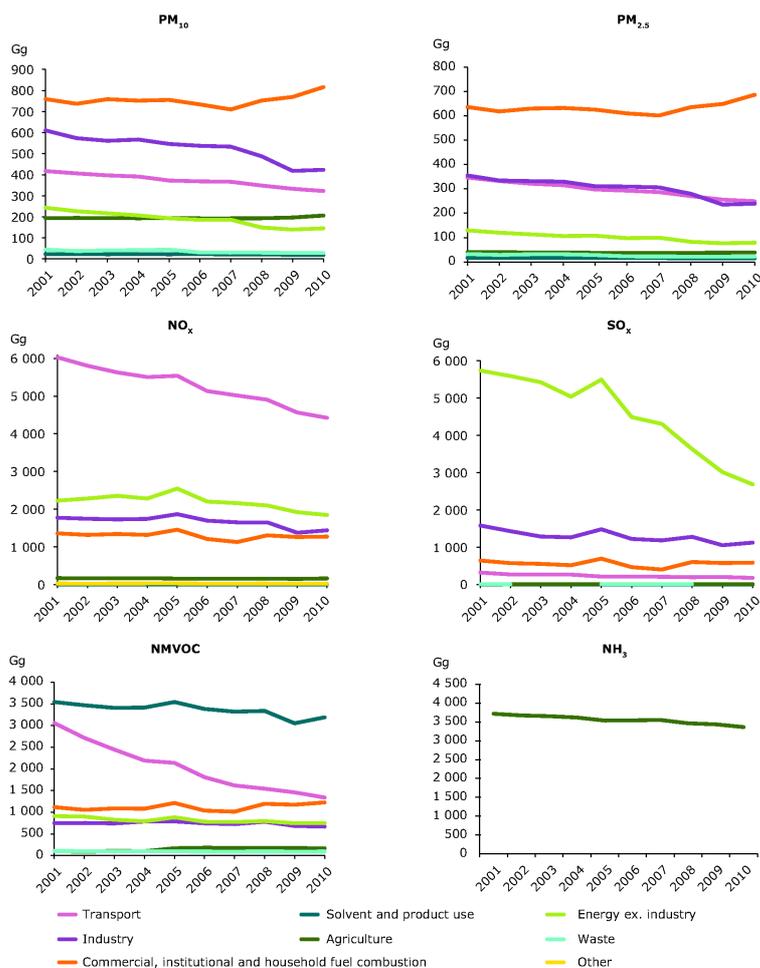
La contaminación atmosférica provoca unas 370.000 muertes prematuras en la UE y en torno a 16.000 en España, según datos de la Comisión Europea. Teniendo en cuenta que como mínimo multiplica por 4 las causadas por los accidentes de circulación, este problema adquiere una dimensión suficientemente importante para que su alcance sea estudiado y analizado con detalle. El tráfico es, según la Agencia Europea del Medio Ambiente, una de las mayores fuentes de contaminación atmosférica en Europa, seguido de las centrales térmicas y de las plantas industriales.

En España, el 34% de las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) provienen del tráfico. Además del  $\text{NO}_x$ , los contaminantes atmosféricos con mayor impacto sobre la salud son las partículas en suspensión (PM) que emiten los automóviles y la industria, junto al dióxido de azufre de los combustibles fósiles y el diésel.



Contaminación ambiental originada por el tráfico. (DGT)

Un estudio realizado en 2008 evaluó el impacto de las partículas en suspensión (PM) sobre la salud de los ciudadanos en 26 ciudades de 12 países europeos, entre ellas Barcelona, Bilbao, Madrid, Sevilla y Valencia. Reducir los niveles de PM<sub>2,5</sub> (partículas en suspensión menores de 2,5 µm) a 20 µg/m<sup>3</sup>, en cada ciudad, evitaría 11.375 muertes prematuras según este estudio (*"Aphis 3". Air Pollution and Health: A European Information System*).



*Evolución de contaminantes (partículas en suspensión: PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>; óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y de azufre (SO<sub>x</sub>), compuestos orgánicos distintos de metano (NMVOC) y amoníaco (NH<sub>3</sub>)) en el ambiente, por fuentes de emisión, entre 2001-2010. (Agencia Europea del Medio Ambiente)*

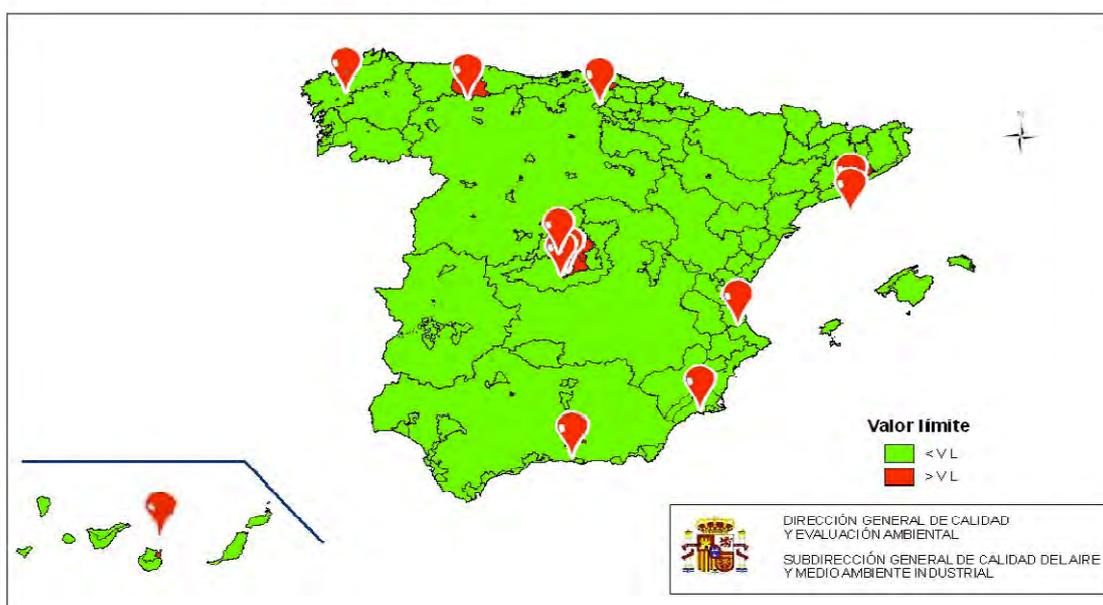
La calidad del aire en zonas urbanas se ve gravemente afectada por el tráfico que es la principal fuente de emisiones atmosféricas de material particulado (incluyendo las partículas de los motores, del desgaste de frenos, ruedas y firme de rodadura, así como determinados metales relacionados con el desgaste mecánico) y gases como los NO<sub>x</sub> (término genérico que incluye NO y NO<sub>2</sub>). Las partículas en suspensión y NO<sub>x</sub>, junto al ozono y amoníaco, son los parámetros críticos en el cumplimiento de la legislación de la calidad del aire en ciudades de España y de Europa en general. Por otro lado, los NO<sub>x</sub> contribuyen a la contaminación fotoquímica del aire, dando lugar al llamado "smog

*fotoquímico*”. Este término hace referencia a una mezcla compleja de productos que se forman a partir de la interacción de la luz solar con dos de los compuestos principales de los gases de escape de los automóviles, monóxido de nitrógeno e hidrocarburos. Su interacción en presencia de la luz solar da lugar a la formación de nieblas altamente oxidantes que han provocado episodios de contaminación muy graves en el pasado, en grandes ciudades como Tokio o Los Ángeles. El oxidante formado principalmente es ozono, con cantidades variables de otros compuestos, entre los que se incluyen los nitratos de peroxiacilo (PAN).

En zonas urbanas, aproximadamente el 50% de las emisiones de  $\text{NO}_x$  se produce por combustión en los motores de los vehículos, siendo otras fuentes de emisión las centrales eléctricas y otras fuentes industriales (U.S. EPA, 1998). Los niveles elevados de  $\text{NO}_x$  además de influir en los niveles de ozono (contaminante secundario que se genera en la atmósfera por reacción de  $\text{NO}_2$  y precursores gaseoso orgánicos), y en la formación de lluvia ácida, pueden perjudicar la salud pública afectando especialmente el sistema respiratorio (Mauzerall y col., 2004).

**Zonas con superación de alguno de los Valores límite de dióxido de nitrógeno**

**Datos 2009**



Diagnóstico de la situación:  $\text{NO}_2$ . Total de población afectada: 14.000.000 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

Aun reconociendo la diversidad de fuentes de emisión, el tráfico es una de las principales fuentes que afectan a los niveles de exposición de la población urbana a los contaminantes atmosféricos. Ello se debe a que la emisión se produce a gran proximidad de la población y de forma muy dispersa en la urbe.

Aunque los automóviles cada vez cumplen legislaciones medioambientales más exigentes, el crecimiento continuado de su número, además del uso permanente y progresivamente indiscriminado, y de la proliferación creciente de los vehículos diésel en el conjunto del parque, generan una situación de una progresiva complejidad.

Así el diseño y arquitectura de las ciudades españolas difiere de la de otros países europeos, en cuanto a la mayor densidad de edificios de apartamentos y a la altura de éstos, lo que provoca un efecto de pantalla en las emisiones producidas por el tráfico. Ello dificulta la dispersión de contaminantes e incrementa marcadamente los niveles en aire ambiente respecto a otras estructuras urbanas europeas que se caracterizan por mayores espacios verdes, menor densidad y construcciones bajas.

Dicho de otra forma, la contaminación relacionada con el tráfico es emitida muy cerca de donde vivimos, trabajamos y andamos. Estudios científicos han mostrado que los contaminantes que son directamente emitidos por motores, como son las partículas ultrafinas o algunos gases, adquieren concentraciones muy altas a lo largo de las calles por un efecto “cañón” y a menudo alcanzan concentraciones 10 veces mayores que en otros lugares. Las concentraciones de estos contaminantes disminuyen notablemente después de los primeros 50 o 100 metros alcanzando los mismos niveles de fondo que en áreas más alejadas de estas calles. Numerosos estudios recientes han confirmado el paralelismo de problemas de salud asociados a la proximidad de focos de elevada densidad de polución ambiental. Estos estudios sugieren por lo tanto que existen efectos adversos adicionales en salud derivados de la mezcla de contaminantes debidos al tráfico que alcanzan altas concentraciones a lo largo de las calles. Los coches diésel, camiones y autobuses emiten especialmente altas concentraciones de hollín que contienen cientos de sustancias muy tóxicas que podrían ser causantes de una gran variedad de enfermedades.

Algunos estudios epidemiológicos y toxicológicos han encontrado claras conexiones entre niveles de contaminación atmosférica e ingresos en hospitales y número de muertes en pacientes, mostrando cómo niveles elevados de contaminación en el aire que respiramos provocan problemas cardio-respiratorios, especialmente en niños, ancianos y gente enferma (*Pope y Dockery, 2006*). Dichos problemas en la salud incluyen arritmias, reducción de la capacidad pulmonar, asma, bronquitis crónica, sinusitis, tos, y alergias. Es importante considerar que estas reacciones en nuestra salud no sólo dependen de la masa de material inhalado, sino también de la composición de dicho material (*Adamson y col., 1999, 2000; Dye y col., 2001; Ghio y Devlin, 2001; Moreno y col., 2004*). Sin embargo aun hoy existe controversia sobre qué característica físico/química/morfológica hace que unas partículas sean más nocivas que otras.

*Efectos de la contaminación debida al tráfico urbano sobre la salud*

### **Convivir con el tráfico urbano ¿Qué sabemos sobre los efectos en la salud?**

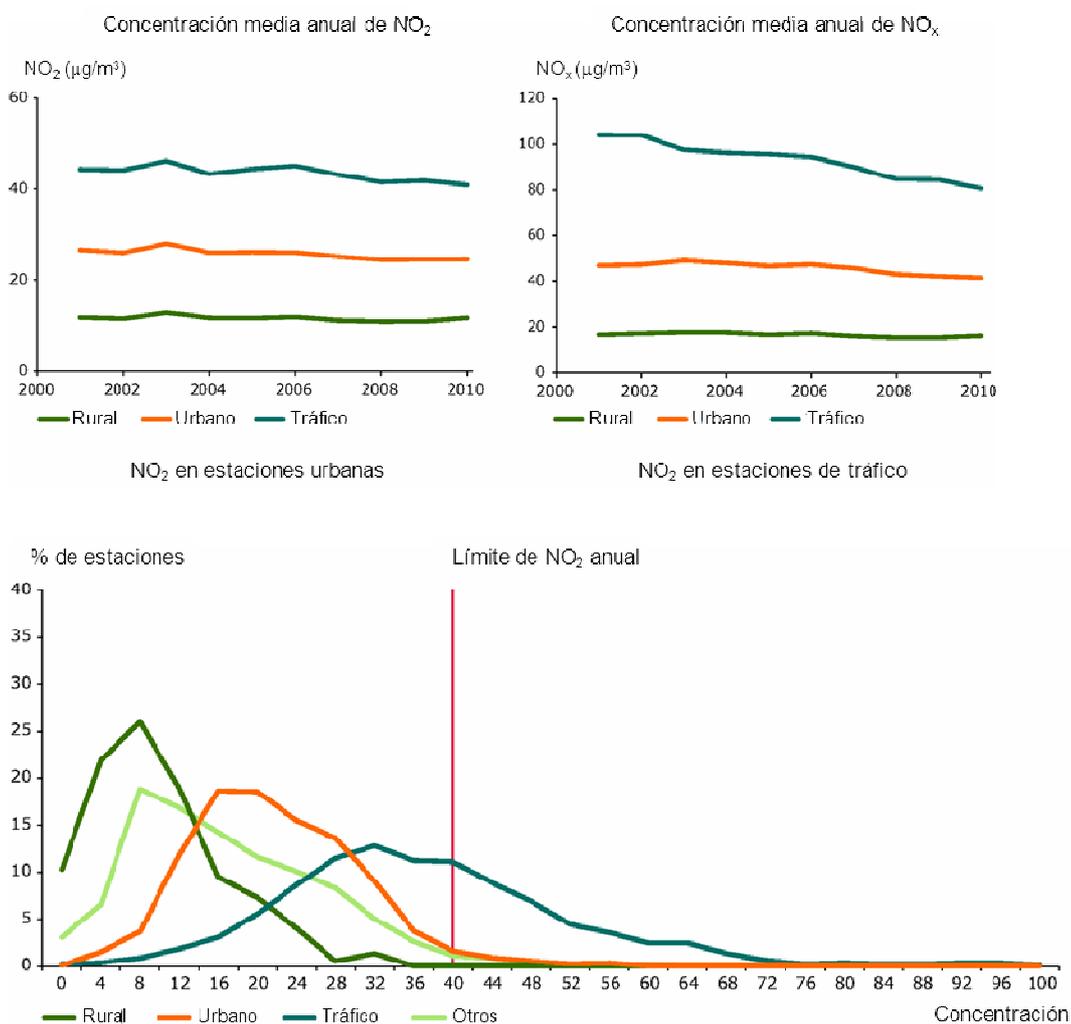
Cuando se habita cerca de zonas con elevado tráfico se observa más frecuentemente:

1. Personas con problemas respiratorios, infartos y reducción de la esperanza de vida.
2. Niños con síntomas de bronquitis.
3. Mujeres embarazadas que tienen bebés de un peso menor al esperado
4. Niños con un desarrollo de su capacidad pulmonar más lento.

Niños

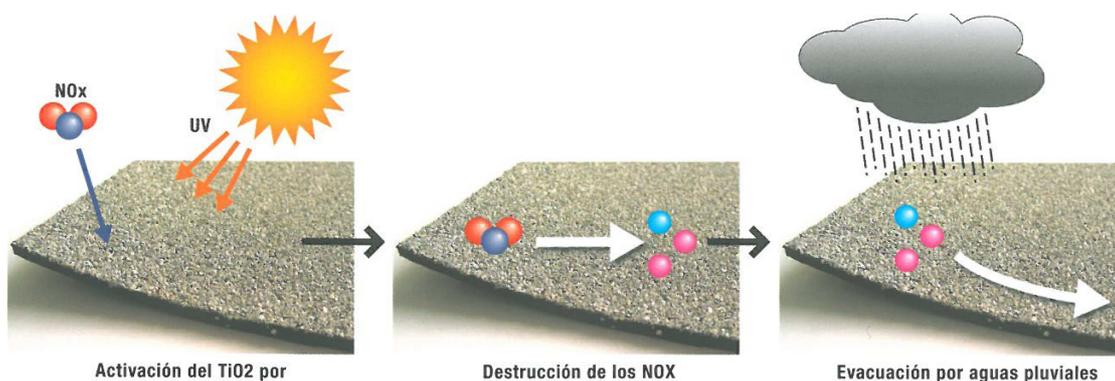
En base a estos antecedentes se antoja imprescindible citar algunas medidas, probadas científicamente hasta la fecha, que permiten disminuir la contaminación en las ciudades, mejorando la calidad del aire:

- Prohibición de circulación de transporte privado en días de elevada contaminación.
- Implantación de zonas peatonales.
- Limitar la velocidad de circulación.
- Promoción e incentivación de medios de transporte alternativos: metro, tranvía, bicicletas, vehículos públicos y privados de hidrógeno, pilas o eléctrico, etc.
- Empleo de productos fotocatalíticos en elementos constructivos que permitan reducir las concentraciones de contaminantes en el aire de las ciudades.



*Evolución de los niveles de NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en diferentes entornos medioambientales durante el período 2000-2010 (gráficos superiores). Situación de los niveles de NO<sub>2</sub> respecto al valor límite anual (gráfico inferior). (Agencia Europea de Medio Ambiente)*

Mientras que muchas ciudades adoptan medias pasivas frente a la contaminación del aire urbano, orientadas a no incrementar los niveles de contaminantes monitorizados, el empleo de productos fotocatalíticos es una de las pocas medidas activas que consigue paliar los daños originados por estos contaminantes reduciendo su concentración ambiental.



Nota : La concentración de nitratos producidos por foto catálisis es inferior a la de cualquier agua mineral embotellada. No tiene impacto alguno en la calidad de las aguas pluviales (Cf. informe del laboratorio de análisis).

*Esquema de funcionamiento y limpieza de un producto fotocatalítico aplicado sobre una infraestructura*

## 2. FOTOCATÁLISIS Y SU APLICACIÓN A INFRAESTRUCTURAS URBANAS.

La fotocatalisis se puede definir como una reacción de oxidación que se produce cuando la radiación solar activa un catalizador (principio fotocatalítico, usualmente dióxido de titanio o derivado) en presencia de oxígeno. Este proceso propicia la descomposición y eliminación de los contaminantes y evita la acumulación de especies o partículas indeseables en el material. Un factor fundamental es la adsorción de moléculas contaminantes sobre la superficie del catalizador donde tiene lugar la reacción.

Los procesos fotocatalíticos basados en las propiedades del dióxido de titanio han captado un enorme interés desde 1972, cuando este fenómeno fue descubierto. Sin embargo, la aplicación de la oxidación fotocatalítica a los materiales de construcción no se ha producido hasta la última década. No obstante, hoy en día, los materiales fotocatalíticos son aplicados para tratamientos de autolimpieza (*self-cleaning*), anti-vaho (*self-fogging*) y anti-reflejos (*anti-reflecting*) sobre cristal con relativa frecuencia, asimismo, la degradación de contaminantes en ambientes de interior es otra área donde las tecnologías fotocatalíticas pueden resultar muy útiles debido a los prolongados tiempos que pasan las personas del mundo industrializado en ambientes cerrados (oficinas, industrias, centros comerciales, vivienda, etc.).

La actividad fotocatalítica del dióxido de titanio ha sido extensivamente estudiada en aplicaciones de esterilización, desinfección y descontaminación. Estudios previos indican que los materiales de construcción que contienen dióxido de titanio, cuando son expuestos a la radiación solar, pueden oxidar eficientemente los contaminantes adsorbidos sobre su superficie (óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, COVs, formaldehído, emisiones industriales, etc). Especialmente relevantes son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) que representan algunos de los agentes contaminantes del aire más

abundantes, directamente relacionado con la formación de smog, generación de ozono y efectos directos sobre la salud humana. Los procesos de oxidación heterogénea fotocatalítica representan una vía prometedora para solventar los problemas causados por los  $\text{NO}_x$  mediante su conversión fotoquímica a nitratos, compuestos solubles que pueden ser arrastrados por el agua de lluvia o riego (*Dalton y col. 2002*). Las concentraciones de  $\text{NO}_x$  suelen ser suficientemente bajas para que, incluso con elevados niveles de conversión a nitratos, no represente un problema para el tratamiento del agua en las EDAR (Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales).

Para que estas reacciones de oxidación fotocatalítica sean eficientes son necesarias concentraciones relativamente bajas de dióxido de titanio, recubrimientos fotocatalíticos del orden de 600 nm - 1  $\mu\text{m}$  ya demuestran elevada actividad. (*Olabarrieta y col. 2012, Faraldos y col. 2012*).

Actualmente ya existen algunas compañías que comercializan cementos y otros materiales de construcción fotocatalíticos para su aplicación en fachadas, calles, aceras, cubiertas, etc., existiendo múltiples ejemplos de su aplicación en Europa y Japón (*Proyecto Picada, Italcementi, Cristal Global, AIF, Chen y col. 2009*)

Por otro lado, se han realizado múltiples estudios intentando aumentar la eficiencia de los catalizadores bajo la radiación visible. En algunos casos se han usado óxidos semiconductores alternativos (óxidos de estaño, de zinc, de tungsteno etc.), dopaje del óxido de titanio con metales (tungsteno, hierro, etc.), dopaje con no metales (carbón, nitrógeno, azufre...) o mezclas de estas soluciones. A pesar de ello, hasta ahora la mayoría de estos esfuerzos no han dado lugar a materiales que mejoren los resultados de los catalizadores basados en dióxido de titanio.

En la literatura científica se encuentran múltiples contribuciones analizando el efecto que tienen sobre el rendimiento fotocatalítico en laboratorio variables como: caudal de aire contaminado, concentración inicial de contaminante, humedad relativa, intensidad de radiación, longitud de onda de la radiación, concentración de catalizador en el material de construcción, tamaño de partícula, fase cristalina,... (*Ballari y col. 2010*).

El rendimiento de la fotocatalisis en aplicaciones urbanas puede verse afectado por factores medioambientales como la intensidad de la radiación incidente, humedad relativa, temperatura y viento, pero también depende de otros factores intrínsecos del fotocatalizador cuando está asociado a un soporte a base de cemento, como porosidad, tipo y tamaño de los agregados, método de aplicación, cantidad aplicada y envejecimiento (*Shen y col. 2012*). Asimismo, la adsorción de contaminantes sobre los centros activos de los composites  $\text{TiO}_2$ -cemento se ha identificado como el factor determinante de la eficiencia fotocatalítica (*Chen et al. 2011*).

### **3. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS FOTOCATALÍTICOS APLICADOS SOBRE INFRAESTRUCTURAS URBANAS**

A continuación se proceden a describir los productos para la construcción existentes en la actualidad, y diseñados a partir de dióxido de titanio, a los que se les atribuyen las siguientes ventajas desde el punto de vista medioambiental, una vez aplicados sobre infraestructuras urbanas:

- Reductores de las concentraciones de  $\text{NO}_x$  que emite el tráfico rodado de las ciudades y también de las concentraciones de COVs (compuestos orgánicos volátiles).
- Reductores de “Efecto Albedo”, especialmente en el caso de los pavimentos bituminosos, pues una vez aplicado el producto sobre dicho soporte, su tonalidad se vuelve más clara, disminuyendo la capacidad de calentamiento del firme y por ende de las ciudades.
- Reducen la capacidad adherencia de partículas extrañas, polvo o impurezas sobre las superficies donde se aplican estos productos, de manera que su limpieza, y por tanto su estética, es más duradera que con un producto convencional.
- Capacidad de reducción de olores, precisamente debido a la resistencia a la adherencia de partículas o sustancias orgánicas sobre las superficies de aplicación de estos productos.

### 3.1. Pavimentos bituminosos drenantes percolados con lechada fotocatalítica

Se trata de una capa de rodadura constituida por una mezcla bituminosa drenante, cuyos huecos se rellenan mediante percolación a partir de una lechada fabricada con cemento y resina, y cuyo objetivo es obtener una superficie de rodadura impermeable, que reduzca las concentraciones de gases contaminantes emitidas por el tráfico, de manera que se mejore la calidad del aire en el entorno de su aplicación.



*Proceso de extendido y percolación de lechada fotocatalítica sobre un pavimento drenante*

### 3.2. Sprays fotocatalíticos para pavimentación de calles y aceras

Los *sprays* fotocatalíticos son tratamientos superficiales fotocatalíticos anticontaminación basados en las propiedades del dióxido de titanio. Su aplicación sobre los pavimentos de calles, aceras y carreteras (incluso carriles ciclistas) permite reducir la contaminación atmosférica.



*Proceso de pulverización de spray fotocatalítico sobre pavimento existente (Izda.).  
Detalle de acabado de extendido de spray fotocatalítico en aceras en Milán (Dcha.).*

### **3.3. Losas fotocatalíticas para pavimentación de aceras**

Se trata de un pavimento, normalmente de aceras peatonales, a partir de losas de hormigón descontaminante, de medidas y color a definir, que dota a la superficie exterior de un área ecoeficiente.



*Detalle de acabado de pavimentación de aceras peatonales*

### **3.4. Revestimiento de fachadas con materiales cerámicos fotocatalíticos**

El revestimiento consiste en un material cerámico porcelánico descontaminante, en forma de placas, dotando al edificio de una envolvente ecoeficiente capaz de reducir los gases  $\text{NO}_x$  y disminuir el  $\text{HNO}_3$  (causantes de lluvia ácida) presentes en el aire. Se trata de un revestimiento con capacidad fotocatalítica permanente, que no requiere de suministro de energía o instalación adicional para su permanente función descontaminante.



*Ejemplo de acabado de revestimiento de fachadas con materiales cerámicos fotocatalíticos*

### **3.5. Revestimiento de fachadas con mortero fotocatalítico**

Se trata de un mortero tradicional que incorpora un fotocatalizador, dióxido de titanio, y que se encuentra dentro de la división de los morteros tradicionales.



*Ejemplo de aplicación de mortero fotocatalítico sobre muros de contención*

### **3.6. Impermeabilización de cubiertas con productos fotocatalíticos**

Se trata de láminas asfálticas de impermeabilización autoprotegidas con un gránulo formulado con dióxido de titanio (fotocatalizador) en forma de anatasa.



*Ejemplo de aplicación de cubiertas de impermeabilización fotocatalíticas en edificios urbanos*

### **3.7. Pinturas en polvo fotocatalíticas para envolventes metálicas de edificación.**

El revestimiento en polvo fotocatalítico aplicado sobre cualquier envolvente metálica como chapas perforadas, metal expandido, etc, confieren al edificio una envolvente ecoeficiente capaz de adsorber y reducir los gases  $\text{NO}_x$  y disminuir el  $\text{HNO}_3$  (causantes de lluvia ácida) presentes en el aire. El revestimiento aprovecha la aportación de la luz solar para transformar las concentraciones de gases  $\text{NO}_x$  en residuos inertes como nitritos y nitratos.

Su incorporación a la envolvente del edificio lo dota de una capacidad medioambiental activa.



*Aplicación de pinturas fotocatalíticas en envolventes metálicas de edificación*

### 3.8. Otros productos

Además es posible encontrar hoy en día en el mercado productos fotocatalíticos más específicos, como las pinturas para interiores, los esmaltes ultralavables al agua para interiores o los tratamientos fotocatalíticos para las placas fotovoltaicas, por poner algunos ejemplos.

### 3.9. Concepto de isla fotocatalítica

Se ha comentado anteriormente el estado del arte de los productos fotocatalíticos aplicados sobre las infraestructuras urbanas, pero de manera individual.

Pero, ¿qué ocurriría si los aplicáramos todos conjuntamente sobre un barrio o zona localizada de una ciudad con altas cotas de contaminación por tráfico? Precisamente esto es lo que se conoce como concepto de “Isla Fotocatalítica”. Se trata de una medida pionera en España, pero que por ejemplo en países como Japón está ampliamente extendida, que consiste en aplicar este tipo de productos sobre una zona muy localizada, que puede ser una calle o un barrio, donde se den cita todas las aplicaciones anteriormente mencionadas, de tal forma que se crea una especie de “eco-barrio” o “calle descontaminante”. Estos conceptos están íntimamente relacionados con las “*smart cities*” que aunque van más allá de estas aplicaciones, parten de la base de crear espacios que mejoren la eficiencia energética en las ciudades.



*Simulación de aplicación del conjunto de materiales fotocatalíticos sobre un barrio genérico de una ciudad, creando una isla fotocatalítica*

El concepto de “Isla Fotocatalítica” se podría aplicar sobre calles o barrios ya existentes, a nivel de conservación y mantenimiento, o bien sobre nuevas urbanizaciones.

En el caso de infraestructuras existentes, podrían aplicarse *sprays* sobre el firme o la acera existente, siempre y cuando se encuentren en buen estado y sin necesidad de colocar pavimentos nuevos, repintado sobre el mobiliario urbano (a nivel de conservación), rehabilitación de fachadas existentes o impermeabilización de cubiertas existentes. De esta forma un barrio o calle actual podría ser convertido fácilmente en una isla fotocatalítica.

Lo interesante de estas experiencias sería establecer un protocolo de medidas de niveles de contaminación en la zona donde se pretendiera ubicar la isla fotocatalítica, con objeto de comparar estos resultados con los que se obtendrían una vez llevada a cabo la citada isla. Estos protocolos se pueden diseñar específicamente, como se puede observar en el apartado de Control de Calidad (Anexo I) de esta misma Guía.

En el caso de nuevos planes urbanísticos o la creación de nuevas calles o urbanizaciones a menor escala, tendría más sentido incorporar directamente en los proyectos de construcción este tipo de materiales, fotocatalíticos, con el objetivo principal de respirar un aire más limpio dentro de una ciudad, zona o barrio con problemas de contaminación.

Previamente a la etapa de proyecto, se recomienda que las Administraciones Públicas o los Promotores Privados se pongan en manos de Asociaciones o Ingenierías especializadas que les asesoren en cuanto a las localizaciones y diseños de estas islas fotocatalíticas.

## **4. LEGISLACIÓN**

### **4.1. Legislación sobre la calidad del aire**

La normativa desarrollada por España y por la Unión Europea se han fundido en un Real Decreto que estipula los valores límite permitidos de algunos contaminantes atmosféricos habituales en los ambientes urbanos:

- La Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa ha venido a modificar el anterior marco regulatorio comunitario.
- Para trasponer al derecho español la Directiva 2008/50/CE y desarrollar la Ley 34/2007 en los aspectos relativos a calidad del aire, el 28 de enero de 2011 se aprobó el nuevo Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire, en el que se dictaminan valores de referencia de los contaminantes atmosféricos en condiciones ambientales para la protección de la salud.

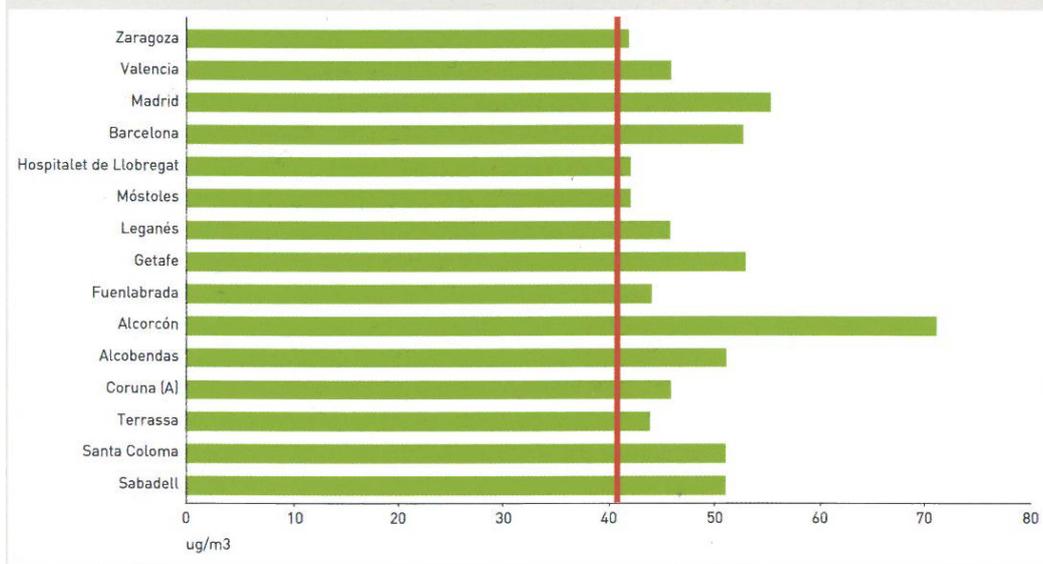
Contaminante	Valor límite diario Periodo de promedio: 24h	Valor límite anual Periodo de promedio: 1 año civil	Umbral de alerta
PM10 Partículas en suspensión <10µm	50 µg/m <sup>3</sup> No podrá superarse en más de 35 ocasiones por año	40 µg/m <sup>3</sup>	
PM2,5 Partículas suspensión <2,5µm	25 µg/m <sup>3</sup>	25 µg/m <sup>3</sup> Margen de tolerancia: 20% el 11 de junio de 2008, que se reducirá el 1 de enero siguiente y en lo sucesivo, cada 12 meses, en porcentajes idénticos anuales hasta alcanzar un 0 % el 1 de enero de 2015. El valor correspondiente para 2011 es de 3 µg/m <sup>3</sup>  28 µg/m <sup>3</sup> Valor límite para 2011	
Dióxido de azufre	350 µg/m <sup>3</sup> No podrá superarse en más de 24 ocasiones por año civil	125 µg/m <sup>3</sup> No podrá superarse en más de 3 ocasiones por año civil	500 µg/m <sup>3</sup> Cuando durante 3 horas consecutivas se exceda dicho valor cada hora
Dióxido de nitrógeno	200 µg/m <sup>3</sup> No podrá superarse en más de 18 ocasiones por año civil	40 µg/m <sup>3</sup>	400 µg/m <sup>3</sup> Cuando durante 3 horas consecutivas se exceda dicho valor cada hora
Monóxido de carbono	10 mg/m <sup>3</sup> Periodo de promedio: máxima diaria de las medias móviles octohorarias		
Benceno		5 µg/m <sup>3</sup>	

Contaminante	Valor objetivo Parámetro: máxima diaria de las medias móviles octohorarias	Umbral de información Parámetro: promedio horario	Umbral de alerta Parámetro: promedio horario
Ozono	120 µg/m <sup>3</sup> No podrá superarse en más de 25 días por cada año civil de promedio en un periodo de 3 años	180 µg/m <sup>3</sup>	240 µg/m <sup>3</sup>

Valores de referencia según Real Decreto 102/2011

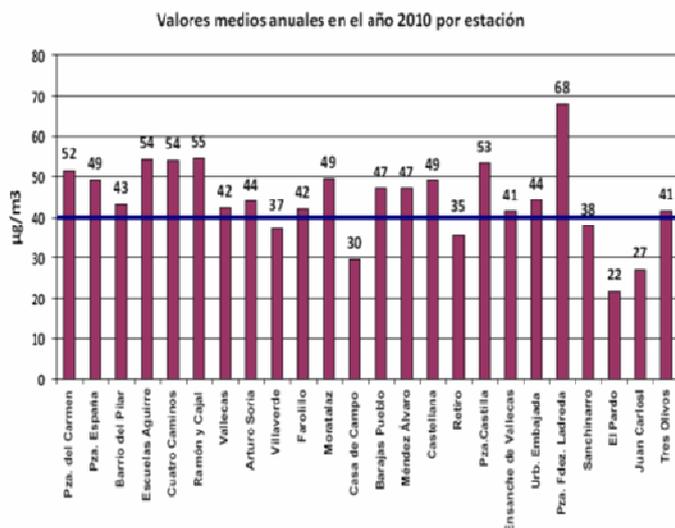
Para situar la calidad del aire en nuestras ciudades tomando como referencia los umbrales máximos admisibles de NO<sub>2</sub> recomendados por la UE (40 µg/m<sup>3</sup>), podemos comparar este valor con las concentraciones de NO<sub>2</sub> registradas en el año 2007 en varios Municipios de España, donde se observa un reiterado incumplimiento de este límite:

MUNICIPIOS ESPAÑOLES QUE SUPERAN EL VALOR LÍMITE DE CONCENTRACION (40 µg/m<sup>3</sup>) DE NO<sub>2</sub>. AÑO 2007.



FUENTE: Elaboración OSE a partir de Base de datos de calidad del aire del MARM, 2009

Si se comparan datos correspondientes a diferentes estaciones de medición de Calidad del aire en Madrid-Capital en concentraciones de NO<sub>2</sub>, tomados en el año 2010 se puede observar que el aire de nuestro entorno urbano tiene que mejorar su calidad, puesto que muchos de los municipios superan el valor máximo permitido por la normativa. Por tanto sería recomendable tomar medidas activas (no sólo que no contribuyan a aumentar la contaminación, sino que la combatan) para reducir los niveles de contaminante nocivos para la salud humana.



Fuente: Dirección General de Calidad, Control y Evaluación Ambiental. Servicio de Calidad del Aire. Magrama, Octubre 2012

ESTACION	Media µg/m³	Máximo µg/m³
PZA. DEL CARMEN	52	197
PZA. ESPAÑA	49	272
BARRIO DEL PILAR	43	310
ESC. AGUIRRE	54	300
CUATRO CAMINOS	54	306
RAMÓN Y CAJAL	55	435
VALLECAS	42	242
ARTURO SORIA	44	264
VILLAVERDE	37	257
FAROLILLO	42	187
MORATALAZ	49	199
CASA CAMPO	30	156
BARAJAS PUEBLO	47	215
MÉNDEZ ÁLVARO	47	282
CASTELLANA	49	291
RETIRO	35	177
PZA. CASTILLA	53	236
ENSANCHE DE VALLECAS	41	250
URB. EMBAJADA	44	219
FDZ. LADREDA	68	340
SANCHINARRO	38	290
EL PARDO	22	114
JUAN CARLOS I	27	149
TRES OLIVOS	41	180

El límite anual fijado (valor promedio anual) por directiva europea ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), para la protección de la salud pública, está en consonancia con otros países como Japón, que tiene un promedio diario (24 horas) de óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) entre  $75\text{-}113 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , o el que tienen la mayoría de países latinoamericanos, idéntico al de Estados Unidos,  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

#### 4.2. Legislación sobre nanopartículas

Respecto al uso y regulación de nanopartículas, cabe señalar que no existe todavía normativa en España ni en la Unión Europea, aunque se está trabajando intensamente en las distintas Comisiones. Se han editado varios informes analizando algunos efectos que pueden producir las nanopartículas en el ambiente y las precauciones que se deberían tomar durante su manipulación (EASHW, ECHA, EU nanotechnology, JCR 2012).

Según la Unión Europea, se considera nanomaterial cualquier material natural, accidental o manufacturado que contenga partículas aisladas, agregadas o aglomeradas en el rango de  $1\text{-}100\text{nm}$ , siempre que más del 50% de las partículas tengan al menos una dimensión en este rango (Commission Recommendation 2011, EU Nanotechnology, Cefic 2012).

### 4.3. Legislación sobre evaluación de actividad fotocatalítica

Se han publicado varias normas ISO (*International Organization for Standardization*) tratando de unificar y regular los ensayos que determinan la actividad fotocatalítica de los materiales y su cuantificación (*Mills y col. 2012*):

- ISO 22197-1:2007. "*Fine Ceramics, advanced technical ceramics – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials. Part 1: Removal of nitric oxide*", ISO, Ginebra, 2007.
- ISO 22197-2:2011. "*Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials – part 2: Removal of acetaldehyde*", ISO, Ginebra, 2011
- ISO 22197-3:2011. "*Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials – part 3: Removal of toluene*", ISO, Ginebra, 2011.
- ISO 27447:2009. "*Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for antibacterial activity of semiconducting photocatalytic materials*", ISO, Ginebra, 2009.
- ISO 27448:2009. "*Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for self-cleaning performance of semiconducting photocatalytic materials – Measurement of water contact angle*", ISO, Ginebra, 2009.
- ISO 10678:2010. "*Fine ceramics, advanced technical ceramics – Determination of photocatalytic activity of surfaces in an aqueous medium by degradation of methylene blue*", ISO, Ginebra, 2010.
- ISO 10677:2011. "*Fine ceramics, advanced technical ceramics – Ultraviolet light source for testing semiconducting photocatalytic materials*", ISO, Ginebra, 2011.
- ISO 10676:2010. "*Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for water purification of semiconducting photocatalytic materials by measurement of forming ability of active oxygen*", ISO, Ginebra, 2010.

Algunos países (Japón, Italia, Francia) tienen sus propias normas que sirvieron de base para la elaboración de las normas internacionales.

## 5. ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD O DE EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA

### 5.1. Ensayos de Laboratorio

En la actualidad, en Europa existen tres Normas de ensayos de laboratorio para el análisis de la capacidad fotocatalítica de los materiales, a saber:

- **Norma Francesa: XP B44-011:2009-12-01:** *Photocatalyse – Méthode d’essai pour l’évaluation des matériaux photocatalytiques vis-à-vis de la dégradation des NOx – Méthode à un seul passage en mode tangentiel.*
- **Norma Italiana: UNI 11247/2010:** *Determinazione dell’indice di abbattimento fotocatalitico degli ossidi di azoto in aria da parte di materiali inorganici: metodo di prova in flusso continuo.*
- **Norma Internacional: ISO 22197-1/2007:** *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials —Part 1: Removal of nitric oxide.*

En España no existe una normativa oficial de ensayo en la actualidad, y por esta razón se está trabajando tanto con la normativa internacional, como con la normativa italiana a la hora de analizar la eficiencia en la reducción de concentraciones de óxidos de nitrógeno.

Se han realizado varios estudios comparativos para ver la sensibilidad de los resultados en función de la normativa utilizada, a través de los cuales, se ha observado que los resultados de eficiencia fotocatalítica, es decir, las capacidades de reducción de concentraciones de NO<sub>x</sub>, pueden llegar a ser muy distintas, dependiendo de la adaptación de la Norma de ensayo empleada. Por esta razón, en la actualidad, existen varios grupos de trabajo a nivel nacional e internacional (AENOR, CEN, *European Federation of Photocatalysis*) que están trabajando en este sentido, con objeto de unificar y normalizar este tipo de pruebas.

### 5.2. Ensayos “*in situ*”

Con objetivo de determinar el efecto descontaminante de los productos fotocatalíticos aplicados sobre infraestructuras urbanas, más allá de los ensayos de laboratorio, se han desarrollado varias modalidades de ensayos de medidas “*in situ*”, que no poseen ningún tipo de certificación (ambiental, calidad, etc), ni se encuentran amparados por ningún marco legal, pero sin embargo permiten conocer de una manera más ajustada a la realidad, el funcionamiento de estos productos, así como su eficacia a lo largo del tiempo.

#### 5.2.1. Ensayo “*in situ*” diseñado por el Centro de Investigación de EUROVIA (Francia)

El ensayo, que tiene como base las normas de laboratorio actualmente en vigor, consiste en colocar una cámara hermética sobre la superficie de ensayo, a través de la cual se introduce aire artificialmente contaminado, hasta llegar a una concentración constante tipo, medida en µg/m<sup>3</sup>, que simula la concentración de gases NO<sub>x</sub> típica de una calle urbana.

Una vez que el aire artificialmente contaminado pasa por la cámara, se mide la concentración de NO<sub>2</sub> a la salida de la misma. El tipo de intensidades y radiaciones lumínicas durante el ensayo están controladas y se hacen variar, con objeto de simular días de luminosidad variable a escala real (nublados 0,5 mw/cm<sup>2</sup> y soleados 3mw/cm<sup>2</sup>).



*Ensayo "in situ" de determinación de eficiencia fotocatalítica*

### **5.2.2. Ensayo a escala real 1:1 – Cámara Euphore – CEAM, Valencia (España)**

La Fundación CEAM (Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo) sita en el Parque Tecnológico de Paterna (Valencia) ha realizado un novedoso ensayo, pionero en el sector, a escala 1:1, para la evaluación de la actividad fotocatalítica de materiales.



*Cámara EUPHORE, CEAM, Valencia.*

Durante seis días, las 24 horas de cada día, se introducen en la cámara monitorizada EUPHORE piezas de muestras con características fotocatalíticas, donde se introduce la misma composición química y cantidad de aire ambiental que existe en una zona representativa, tomada en la ciudad de Valencia.

De ese modo se mide la reducción de concentraciones de  $\text{NO}_x$  por efecto de la aplicación de estos productos.

### **5.2.3. Ensayo “*in situ*” desarrollado a partir del Proyecto PICADA (*Photo-catalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment*)**

Se trata de un proyecto de investigación europeo que contribuyó al desarrollo de productos fotocatalíticos aplicados a las infraestructuras urbanas, para reducir los niveles de contaminación de gases  $\text{NO}_x$  en entornos con disposición en “*street canyon*”, es decir, con alto grado de confinamiento por la configuración de las edificaciones de las ciudades. Este proyecto estaría considerado como un paso intermedio entre los estudios realizados en laboratorio y las mediciones “*in situ*” en condiciones reales.

El proyecto consistió básicamente en comparar las mediciones de contaminantes de  $\text{NO}_x$  en una calle, donde no se incorporaron materiales fotocatalíticos, con otra de similares características físicas y ambientales, donde sí se colocaron productos fotocatalíticos a modo de morteros sobre los paramentos verticales que confinaban las calles (ver foto abajo).

Los resultados obtenidos del estudio concluían que se habían obtenido altas reducciones de concentraciones de  $\text{NO}_x$ , por comparación con las calles donde no se habían empleado estos productos.



*Diseño del Proyecto PICADA, simulando configuración de calles urbanas a modo de "street canyon"*

#### **5.2.4. Ensayo "in situ" con estaciones móviles durante un tiempo determinado**

Existen protocolos de control de eficiencia tras la aplicación de productos fotocatalíticos que evalúan su poder descontaminante. Estos estudios, aunque tampoco están normalizados en la actualidad, permiten conocer con alto grado de exactitud, en condiciones reales, el potencial de reducción de concentraciones contaminantes.

Normalmente para la realización de estos trabajos se cuenta con dos estaciones móviles (para tomar datos durante 8 semanas: 4 semanas antes y 4 después del tratamiento), una estación móvil (instalada en una zona cercana sin tratamiento en el pavimento, para utilizar los datos recogidos como valores de referencia) y una estación móvil instalada en la zona donde se aplique el tratamiento recogiendo datos antes y después del tratamiento fotocatalítico.

#### **5.2.5. Otros estudios "in situ"**

##### **- Borough of Camden, Londres, Reino Unido**

En 2006, el Ayuntamiento de Camden en colaboración con consultores del Imperial College de Londres, llevó a cabo un ensayo de descontaminación ambiental usando adoquines en *Southampton Row, Bloomsbury*. Se incorporó a las baldosas un dióxido de titanio especialmente diseñado, cubriendo aproximadamente 1.200 m<sup>2</sup>. Se monitorizó la concentración de NO<sub>x</sub> mediante quimioluminiscencia, concluyendo que la contaminación en el área se vio reducida en más del 20%.

##### **- Paris, Francia**

Durante 2007, se llevó a cabo otro ensayo en el interior de un aparcamiento en París. Debido al bajo nivel de luz en el área se usaron dos tipos de pinturas incorporando un fotocatalizador muy activo en su matriz. El ensayo se prolongó durante 12 meses y la acumulación de nitratos fue el indicador de la eficiencia del recubrimiento para la eliminación de NO<sub>x</sub>. Mensualmente se tomaron muestras y se cuantificó la formación de

nitrito frente a una referencia de la misma área. El análisis demostró que los niveles de NO<sub>x</sub> se redujeron entre 53-99% dependiendo del tipo de pintura y el nivel de luz recibido.

- **Central St. Martins College of Art & Design, Londres, Reino Unido**

Otro ensayo conducido por el Ayuntamiento de Camden y el *King College* se realizó sobre un muro. Durante un año, previamente a la aplicación del recubrimiento fotocatalítico, se monitorizaron los contaminantes para tener un blanco de referencia. Posteriormente se aplicó el recubrimiento transparente sobre la superficie de la pared y se colocaron dos detectores de quimioluminiscencia para monitorizar NO y NO<sub>2</sub>, a diferentes distancias del muro, para detectar cambios en los niveles de contaminación. Paralelamente se monitorizaron los mismos contaminantes en un área cercana para efectos comparativos. Los datos meteorológicos como la velocidad y dirección del viento, precipitaciones, temperatura y humedad fueron recogidos cada 15 minutos. Esta toma de datos se prolongó durante dos años tras la aplicación del recubrimiento catalítico y los resultados mostraron una reducción de NO<sub>x</sub> del 35-65% dependiendo de la estación y condiciones meteorológicas, equivalente a una capacidad para reducir NO<sub>x</sub> de 200g/m<sup>2</sup>/año (*Cristal Global, 2012*).

## 6. FACTORES A TENER EN CUENTA EN SU APLICACIÓN:

### 6.1. Dispersión de contaminantes. Emisión e inmisión

- **Emisión**; es la cantidad de contaminante emitido desde cualquier medio emisor (fuente contaminante) en un período de tiempo determinado. Se suele expresar en µg/m<sup>3</sup> o en ppm. Ejemplo la cantidad de contaminante que sale del tubo de escape de un coche o de la chimenea de una fábrica.
- **Inmisión**; es la cantidad de contaminante que llega al receptor una vez transportados y difundidos por la atmósfera. Por ejemplo la cantidad de contaminante presente en un centro de trabajo, la calle o cualquier otro lugar.

**La dispersión de los contaminantes**, para evitar valores altos de inmisión en un lugar determinado, depende de las características de las emisiones, de las condiciones atmosféricas y de características geográficas y topográficas.

La previsión y cuantificación del impacto ambiental atmosférico, se realiza mediante la aplicación de software de cálculo capaz de realizar una modelación suficientemente representativa de los procesos de emisión y dispersión de los contaminantes, en las dimensiones temporal y espacial.

Los modelos son una vía de evaluar el impacto a escala local, regional y global de una determinada fuente y constituyen un instrumento válido para ser aplicado en la planificación y en la adopción de medidas correctoras. Con ellos se identifica y se disciernen aquellas zonas con mayor incidencia de la contaminación atmosférica.

El desarrollo de metodologías para estimar la concentración de contaminantes generados por fuentes móviles (*Pal Arya 1999*), está muy relacionado con el conocimiento acerca del régimen de vientos imperantes y la estabilidad atmosférica, ya que la concentración de contaminantes guarda una relación directa con el número de fuentes que estén emitiendo, pero es inversamente proporcional a la intensidad del viento. La permanencia de los contaminantes está relacionada con la capacidad de la atmósfera para

dispersarlos, con su reactividad y con el lavado que efectúa la lluvia, que contribuye a disminuir la concentración de contaminantes, además de otros factores. Hoy en día aún existe un conocimiento incompleto de todos los procesos físicos y químicos involucrados en el transporte, dispersión, transformación y deposición de los contaminantes. Esto es debido a que la turbulencia atmosférica es función de un gran número de factores de estabilidad, los cuales no pueden ser totalmente cubiertos por los modelos.

También resulta imprescindible realizar la identificación del tipo de vía y sus características, tales como ancho, cantidad de vías, pendientes, carriles no utilizados para el tráfico, velocidades permitidas, paradas de automóviles y autobuses, semáforos, tipos de vehículos que circulan, cantidad de los mismos, perfil de conducción por la vía, combustibles utilizados, características del combustible, cantidad de vehículos con dispositivos de reducción de emisiones, número de automóviles con aire acondicionado, estado técnico del vehículo...

Por tanto, la dispersión de los diferentes contaminantes emitidos por fuentes móviles, puede ser modelada de manera adecuada aunque compleja, mediante sistemas de cómputo (*Bailey 2003*). Muchos de ellos, como los propuestos por la EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*), tienen carácter de código libre, y han sido mejorados mediante versiones sucesivas. Tal es el caso de CALINE 2, CALINE 3, CAL3QHC, CAL3QHCR y CALINE 4 (*Benson 1989*).

### **6.1.1. Factores que influyen en la dinámica de dispersión: Características de las emisiones, condiciones atmosféricas, características geográficas y topográficas**

#### **6.1.1.1. Características de las emisiones**

- Naturaleza del contaminante. Si es un gas permanecerá en la atmósfera mucho más tiempo que si es una partícula (sólido o líquido) que se deposita más rápidamente.
- Temperatura de emisión. En el caso de contaminantes gaseosos, si su temperatura en el momento de salir a la atmósfera es mayor que la del aire circundante, el contaminante ascenderá hasta las capas altas facilitándose su dispersión. Por el contrario, si su temperatura es menor que la del aire circundante se acumulará en las partes bajas de la atmósfera.
- Velocidad de salida del contaminante. A mayor velocidad, más rápido asciende y, en caso de inversión térmica, mayor probabilidad hay de que atraviese la capa invertida y pueda dispersarse más fácilmente.
- Altura del foco de la fuente emisora. A mayor altura, mayor facilidad para que se produzca la dispersión del contaminante (chimeneas de gran altura donde hay más viento o simplemente a mayor altura que la que suele producirse la capa de inversión facilitará la dispersión de los contaminantes).

#### **6.1.1.2. Condiciones atmosféricas: temperatura del aire y sus variaciones con la altura, inversión térmica, precipitaciones, insolación**

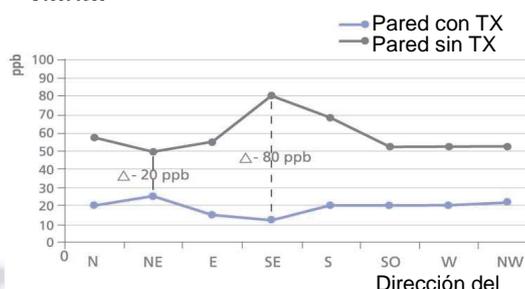
La capacidad de la atmósfera para dispersar y diluir los contaminantes viene determinada por las condiciones atmosféricas locales.

Los factores de la atmósfera que más influyen son:

- Temperatura del aire y sus variaciones con la altura: El Gradiente Térmico Vertical (GTV). Si con la altura la temperatura va disminuyendo en suficiente proporción, los contaminantes ascenderán con el aire y según lo hagan se irán expandiendo, disminuyendo su concentración, hasta alcanzar la estratosfera, donde los vientos en altura los dispersarán totalmente. Por el contrario, hay dificultad para que se produzca la dispersión de los contaminantes cuando no hay corrientes ascendentes de aire. Una situación especialmente grave se da cuando hay inversión térmica (zona donde el aire asciende en altura en lugar de descender), ya que los contaminantes quedan atrapados cerca de la superficie. Los anticiclones favorecen la formación de nieblas contaminantes. Sin vientos importantes, temperaturas bajo cero y una gran estabilidad atmosférica no hay dispersión ni dilución de contaminantes. Con anticiclones es más probable que se den situaciones de inversión térmica, donde las temperaturas a nivel del suelo son inferiores a las temperaturas en altura. Las inversiones se dan frecuentemente durante la noche, como consecuencia del enfriamiento del suelo; también por el movimiento de una masa de aire desde una zona cálida a otra fría o por el choque de dos masas de aire con humedad, presión y temperaturas diferentes (una masa polar y otra tropical).
- Velocidad del viento. Determina una mayor o menor rapidez en la dispersión de los contaminantes.
- Dirección del viento. Determina el área hacia donde se pueden desplazar los contaminantes emitidos.



Concentración media de NO<sub>x</sub> según el viento



Resultados experimentales del Proyecto PICADA

*Influencia de la dirección del viento en los niveles de contaminación. (Italcementi. Resultados científicos. Proyecto PICADA)*

- Precipitaciones. Producen un efecto de lavado sobre la atmósfera, arrastrando los contaminantes al suelo. La baja tasa de precipitación registrada, especialmente en el centro y sur de España, impide el lavado atmosférico e influye en la importancia de procesos de resuspensión por el tráfico rodado del material particulado depositado en los firmes de carretera.

- Insolación. La radiación solar favorece las reacciones que dan lugar a algunos contaminantes secundarios (reacciones fotoquímicas). La elevada radiación solar en los meses estivales se traduce en un incremento de los niveles de partículas secundarias (como sulfato y nitrato), NO<sub>2</sub> y ozono. Estos incrementos se ven aún más acentuados por la baja capacidad dispersiva de la atmósfera en verano. Por tanto, las estructuras urbanas y el clima del sur de Europa hacen que la misma emisión del tráfico produzca un mayor impacto en los niveles de contaminantes en aire ambiente respecto al centro y norte de Europa.

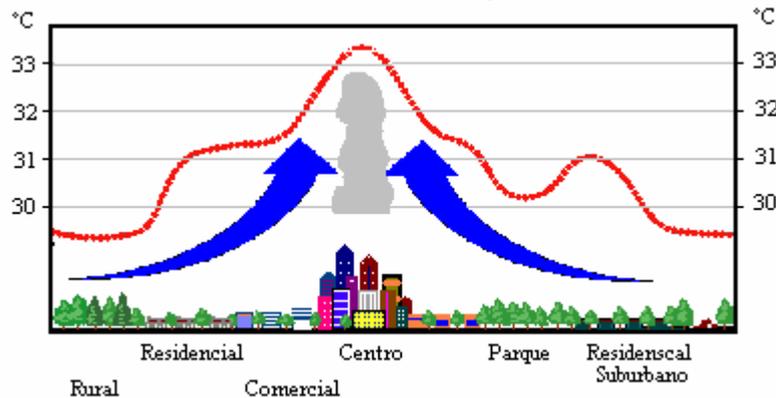
#### **6.1.1.3. Características topográficas y geográficas: existencia o no de brisas marinas, existencia de valles, presencia de masas vegetales, presencia de núcleos urbanos (isla de calor)**

La situación geográfica y el relieve tienen una influencia en el origen de brisas, que arrastran los contaminantes o provocan su acumulación.

La **presencia de masas vegetales** disminuye la cantidad de contaminación en el aire, al frenar la velocidad del viento, facilitando la deposición de partículas.

La **topografía** puede favorecer las situaciones de inversión térmica, bien por la presencia de montañas costeras que dificultan la acción de las brisas marinas, o configurando valles profundos en los que, en invierno, la insolación llega con dificultad al fondo del valle.

- Islas de calor. Las áreas urbanas producen calor (además del calor producido dentro de la ciudad por las actividades humanas, tenemos que materiales de construcción como el ladrillo, el asfalto y el cemento que absorben y retienen el calor de manera más eficiente que el suelo y la vegetación) y contaminación, además sus construcciones frenan los vientos suaves. Se observa que las ciudades suelen tener varios grados más de temperatura que en las afueras, por eso se les llama islas de calor. Al tener el aire mayor temperatura en la ciudad que en su periferia, el aire caliente urbano asciende y es sustituido por aire de la periferia (donde suelen haber industrias contaminantes) que se introduce en la ciudad; al enfriarse el aire urbano que ascendió, desciende por la periferia de la ciudad, el cual volverá al centro urbano cerrando el ciclo. Por tanto, en ausencia de vientos fuertes y lluvias la dispersión de los contaminantes no es fácil, ya que el carácter cíclico de los vientos dificulta la dispersión de los contaminantes produciendo lo que se conoce como cúpula de contaminantes que rodea la ciudad (en ocasiones desde lejos antes de entrar con el coche a la ciudad se puede distinguir la cúpula de contaminantes que envuelve algunas ciudades)



*Isla de calor producida en las áreas urbanas. En ausencia de lluvias y vientos da lugar a una cúpula de contaminantes*

- **Brisa montaña-valle.** En zonas de valles y laderas se generan las llamadas brisas de valle y montaña. Durante el día las laderas se calientan y se genera una corriente ascendente de aire caliente, mientras que en el fondo del valle (al no darle el Sol) se acumula aire frío y se origina una situación de inversión que impedirá la dispersión de los contaminantes. Durante la noche sucede lo contrario: el aire de las laderas se enfría debido al enfriamiento terrestre, el aire desciende al valle desde las colinas más altas. Durante las noches, como por la ladera desciende aire frío se crea una situación de inversión térmica, que provoca la acumulación de contaminantes. Las montañas y los valles se calientan de manera desigual a lo largo del día. Este calentamiento diferencial genera vientos ascendentes durante el día y descendentes a lo largo de las laderas de montaña. Los valles forman a menudo una especie de circo con laderas en todas las direcciones.
- **Brisa marina.** En las zonas costeras se originan sistemas de brisas que durante el día desplazan los contaminantes hacia el interior (la tierra se calienta más y el aire asciende, provocando que sea sustituido por aire que viene del mar), mientras que durante la noche, al invertirse la circulación de las mismas (la tierra se enfría más y el mar está más caliente), la contaminación se desplaza hacia el mar. Las brisas marinas favorecen la dispersión de los contaminantes (sin la brisa marina habría menos viento), pero este carácter cíclico hace que los contaminantes no se dispersen completamente.

## 6.2. Durabilidad de materiales fotocatalíticos:

### 6.2.1. Formación de nitratos

La aplicación de cementos o materiales fotocatalíticos con dióxido de titanio en zonas urbanas, es una tecnología que mejora la calidad del aire en áreas muy contaminadas. El uso de esta tecnología permite degradar un amplio rango de contaminantes atmosféricos, como NO y NO<sub>2</sub> emitidos por los automóviles.

La formación de nitratos originados en la reducción de la contaminación de óxidos de nitrógeno en aire tanto en materiales con recubrimientos fotocatalíticos como en cementos fotocatalíticos para infraestructuras urbanas, dan lugar a concentraciones muy poco significativas. Estos valores representan concentraciones de nitratos en aguas prácticamente despreciables o apenas cuantificables a la hora de tratar los residuos acuosos de zonas urbanas en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR).

A modo de ejemplo, si tenemos en cuenta la ciudad de Madrid (España), con una población de 3.265.038 (2011, Wikipedia), con un consumo de agua diario de 979.511,4 m<sup>3</sup>/día (usando 300 L/heq/día), y considerando una superficie fotocatalítica de 1.000.000 m<sup>2</sup>, donde se aplicaría el proceso fotocatalítico estudiado de la reducción de la concentración de óxidos de nitrógeno en aire, se podrían llegar a formar en torno a 0,06 g de nitrato/m<sup>2</sup> de superficie (valor que depende obviamente del material fotocatalítico utilizado). Este dato de nitratos superficiales podría dar lugar a una concentración de nitratos en agua de 1,47 mg/L al lavar con agua de la superficie fotocatalítica considerada. La cual es despreciable si tenemos en cuenta que el límite para consumo humano de nitratos es de 50 mg/L (RD 140/2003). (*Datos suministrados por el Laboratorio de Análisis y Ensayos de la Fundación CARTIF*)

No obstante, los materiales fotocatalíticos para infraestructuras urbanas, basados en dióxido de titanio como catalizador, pueden llegar a adsorber superficialmente nitratos formados en la eliminación de los NO<sub>x</sub>, lo cual podría provocar, en el caso de exposiciones muy prolongadas, un cierto grado de nitrificación en su superficie con la consiguiente pérdida parcial o total de su actividad fotocatalítica a lo largo del tiempo. A la pérdida de la actividad de un catalizador heterogéneo se le denomina comúnmente desactivación del catalizador, y su posible regeneración, para recuperar de nuevo sus propiedades catalíticas, depende en gran medida del tipo de mecanismo que originó esta pérdida de actividad. En primer lugar, si la desactivación del catalizador ha tenido lugar por "fouling" o ensuciamiento de la superficie del fotocatalizador, éste podría ser regenerado "in situ" mediante lavados periódicos con agua, recuperando de nuevo sus propiedades fotocatalíticas. Sin embargo, cuando el material fotocatalítico es sometido a altas concentraciones de óxidos de nitrógeno durante periodos muy prolongados de tiempo en ausencia de lluvias, podría llegar a tener lugar un fenómeno químico que diese lugar a una pérdida permanente de sus propiedades fotocatalíticas (Richardson 1989). En estas condiciones, se adsorberían concentraciones tan altas de nitratos que podrían provocar una serie de reacciones químicas con la consiguiente formación de nitratos de titanio muy estables, originando un fenómeno de desactivación química permanente del material fotocatalítico que difícilmente podría ser regenerado para recuperar de nuevo sus propiedades fotocatalíticas. Para evitar este fenómeno de desactivación química permanente, muy perjudicial en los materiales fotocatalíticos de infraestructuras urbanas,

sería necesario establecer un protocolo de lavados periódicos y controlados, que evitase la adsorción prolongada de elevadas concentraciones de nitratos, eliminado de este modo parte o todos los nitratos adsorbidos en su superficie con las aguas de lavado.

No obstante, y de acuerdo con la bibliográfica científica y distintos análisis realizados en laboratorios de control de calidad, según la norma ISO 22197-1/2007, se obtienen diferencias significativas en el rendimiento fotocatalítico de eliminación de NO<sub>x</sub> según se trate un recubrimiento fotocatalítico o de un cemento fotocatalítico para infraestructuras urbanas.

A modo de ejemplo, a continuación se presentan los resultados de valores del rendimiento fotocatalítico de eliminación de NO<sub>x</sub> realizados según el ensayo estándar de la norma ISO 22197-1/2007. La muestra estudiada ha consistido en una probeta de aluminio recubierta con pintura fotocatalítica. El ensayo fotocatalítico se ha llevado a cabo utilizando una radiación UV de 1 mW/cm<sup>2</sup>, sobre una superficie de 0,03 m<sup>2</sup> de la probeta irradiada completamente. La longitud de onda media de la radiación estudiada ha sido de 360 nm, y el caudal de aire contaminado con óxidos de nitrógeno con el que la probeta ha estado en contacto ha sido de 1 NL/min. En la tabla vienen resumidos los resultados obtenidos para diferentes valores de la humedad relativa.

*Ensayo estándar de rendimiento fotocatalítico de eliminación de NO<sub>x</sub>.*

	<b>HUMEDAD RELATIVA (%)</b>			
	5 %	25 %	50 %	75 %
Concentración NO <sub>x</sub> entrada (ppm)	1,03	0,99	0,98	1,00
Concentración NO <sub>x</sub> salida (ppm)	0,359	0,332	0,335	0,336
Eliminación NO <sub>x</sub> (%)	65,4	65,8	64,5	66,4
Eliminación NO <sub>x</sub> (ppm)	0,61	0,62	0,61	0,62
Eliminación NO <sub>x</sub> (mg/h/m <sup>2</sup> )	2,46	2,47	2,42	2,50

Análisis de nitratos: 1,2 mg

Al comparar los valores de rendimiento fotocatalítico de eliminación de NO<sub>x</sub> se observa que los rendimientos o porcentajes de eliminación de óxidos de nitrógeno apenas varían con la humedad relativa, lo que determina la poca o escasa influencia de este parámetro en la reducción final de NO<sub>x</sub> para este recubrimiento fotocatalítico en las condiciones estudiadas.

Por otro lado si se analizan los rendimientos fotocatalíticos obtenidos con esta misma probeta, en las mismas condiciones de humedad relativa y para dos concentraciones de entrada de NO<sub>x</sub> (ver tabla), se observa que después de realizar el protocolo de lavado según la norma ISO 22187-1/2007, la muestra sometida a una mayor concentración de óxidos de nitrógeno presenta un menor rendimiento de reducción de óxidos de nitrógeno. Sin embargo si se comparan los rendimientos fotocatalíticos obtenidos antes y después de lavado con un 50 % de humedad relativa, y con concentraciones similares de entrada de NO<sub>x</sub> en torno a 1 ppm (ver tablas), apenas se aprecian diferencias significativas en los

rendimientos finales (64,5 frente a 64,2 después de lavado), lo que apunta a que el procedimiento de lavado es adecuado para evitar la pérdida de las propiedades fotocatalíticas del recubrimiento analizado por saturación de nitratos.

*Ensayo estándar de rendimiento fotocatalítico de eliminación de NO<sub>x</sub> después de lavado: Influencia de la concentración de entrada de NO<sub>x</sub>.*

	<b>HUMEDAD RELATIVA (50 %)</b>	
Concentración NO <sub>x</sub> entrada (ppm)	1,03	6,03
Concentración NO <sub>x</sub> salida (ppm)	0,37	3,27
Eliminación NO <sub>x</sub> (%)	64,2	45,80
Eliminación NO <sub>x</sub> (ppm)	0,66	2,76
Eliminación NO <sub>x</sub> (mg/h/m <sup>2</sup> )	2,49	10,38

De este modo, a partir de todos los resultados obtenidos del rendimiento fotocatalítico de eliminación de NO<sub>x</sub> con la probeta de aluminio recubierta con pintura fotocatalítica estudiada en este caso, puede concluirse que parámetros como la humedad relativa del aire prácticamente no afectan al rendimiento fotocatalítico final, mientras que altas concentraciones de NO<sub>x</sub> si dan lugar a menores rendimientos de eliminación, como cabría esperar. En todos los casos, el protocolo de lavado según la norma ISO 22197-1/2007 resulta satisfactorio para evitar la pérdida de propiedades fotocatalíticas del recubrimiento fotocatalítico estudiado para infraestructuras urbanas.

Por otro lado, Dylla y col. (Dylla y col. 2010) estudiaron como afectan distintos parámetros de operación a la efectividad de la reducción de NO<sub>x</sub> para otro tipo de materiales fotocatalíticos sobre hormigón. El cemento base analizado en este estudio fue un hormigón común tipo el más utilizado en Lousiana (USA), donde se introdujo una capa superficial de material fotocatalítico de 10 mm de espesor consistente en una mezcla de un TiO<sub>2</sub> comercial (Cristal Millenium PC105) con el cemento base del estudio. Se prepararon dos probetas con dos contenidos de TiO<sub>2</sub>, 3% y 5 % en peso respecto al cemento. Las medidas de fotoactividad de estos materiales fotocatalíticos se realizaron según el ensayo estándar de la Industria Japonesa JIS TR Z 0018, equivalente a la norma ISO 22197-1. Se estudiaron, entre otros parámetros, el nivel de humedad relativa en los gases de entrada, concentración de entrada de óxidos de nitrógeno, así como distintas mezclas de hormigón, incluyendo los contenidos de recubrimientos de dióxido de titanio y tamaños de agregados. De todo este estudio se pueden extraer las principales conclusiones:

- Con la mezcla de hormigón que no presentaba finos en su composición se obtuvieron los mejores resultados del rendimiento fotocatalítico de eliminación de óxidos de nitrógeno.
- Un aumento del porcentaje de  $\text{TiO}_2$  del 3 % al 5 % no mejoro sensiblemente el rendimiento fotocatalítico final de la eliminación de  $\text{NO}_x$ , aunque es necesario justificar la efectividad de todos los costes finales.
- Al aumentar el porcentaje de humedad relativa se observó una disminución del rendimiento fotocatalítico de la eliminación de  $\text{NO}_x$ . Este efecto puede tener lugar porque el agua inhibe la adsorción de los óxidos de nitrógeno sobre el recubrimiento fotocatalítico, afectando negativamente a la velocidad de reducción de  $\text{NO}_x$ .
- Cuando la concentración de entrada de óxidos de nitrógeno aumenta, el porcentaje de eficiencia en la eliminación de  $\text{NO}_x$  disminuye, como cabría esperar, ya que el tiempo de residencia es menor, y por tanto tiene lugar una menor adsorción de concentración de contaminante sobre el recubrimiento fotocatalítico.

Finalmente Ballari y col. (*Ballari y col. 2010*) han estudiado la degradación fotocatalítica de  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  analizando la influencia de distintos parámetros operacionales como la concentración de entrada de contaminante, la humedad relativa y la irradiancia utilizada. Dos tipos de adoquines de hormigón, uno normal y otro con una capa de material fotocatalítico han sido estudiados. El adoquín fotocatalítico estaba constituido por una doble capa con una capa superior del material fotocatalítico, el cual viene preparado a partir de una mezcla de polvos de hormigón con polvos de dióxido de titanio antes de añadir el agua. Finalmente se obtiene un adoquín fotocatalítico con un 5,9 % de  $\text{TiO}_2$  en peso. Las principales conclusiones obtenidas a lo largo de este trabajo son:

- Reacciones en fase homogénea han sido observadas al alimentar  $\text{NO}_2$  al fotoreactor bajo irradiación con luz UV.
- El  $\text{NO}_2$  fue detectado como producto intermedio en el proceso fotocatalítico, especialmente en el caso de reacciones lentas, o cuando el  $\text{NO}_2$  no fue alimentado al sistema. En estos casos el  $\text{NO}_2$  que se produjo en el fotoreactor durante la oxidación fotocatalítica, no pudo ser completamente transformado a nitratos.
- El hecho de que se observase la producción de  $\text{NO}$  cuando solo se alimentó al sistema  $\text{NO}_2$  en elevadas concentraciones, o en condiciones de elevada humedad relativa, demuestra que la fotólisis homogénea del  $\text{NO}_2$  es el proceso fotocatalítico dominante en el proceso global de la reducción fotocatalítica de óxidos de nitrógeno.
- En otras condiciones de operación, una importante rendimiento fotocatalítico de la reducción de  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  fue alcanzado al utilizar el cemento fotocatalítico con el recubrimiento de  $\text{TiO}_2$ .

Los recubrimientos fotocatalíticos y los cementos fotocatalíticos “autolimpiables” son una tecnología emergente que puede llegar a ser fabricada utilizando un fotocatalizador como es el  $\text{TiO}_2$ . Aunque esta nueva tecnología de recubrimientos y cementos fotocatalíticos representa un potencial importante desde el punto de vista medioambiental, para el control de la contaminación atmosférica, una serie de parámetros de operación y de diseño en su preparación pueden llegar a afectar su fotoeficiencia final. Por lo que se

recomienda realizar nuevos estudios para considerar parámetros y factores tales como por ejemplo el estudio de nuevos métodos de preparación de cementos fotocatalíticos, o la influencia de la presencia de distintos contaminantes, como por ejemplo Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) en la concentración de entrada. Además, estudios de investigación a escala real son absolutamente necesarios para validar la eficiencia de esta tecnología, incluyendo desde el análisis de su durabilidad como de su estabilidad a tiempos muy largos de exposición donde estén presentes todos los contaminantes atmosféricos.

### 6.2.2. Abrasión superficial

Los pavimentos fotocatalíticos tienen la ventaja de mitigar las emisiones procedentes del tráfico debido a su proximidad a elevadas concentraciones de contaminantes y su gran superficie de contacto. Sin embargo, las nanopartículas que contienen pueden ser liberadas al ambiente por abrasión debida al tránsito o por erosión climatológica y se pueden propagar en forma de aerosol o suspendidas y arrastradas por el agua, por tanto su estudio debería incluir todo el ciclo de vida (*Dylla y col. 2012*). (Se recomienda que este apartado sea leído en conjunto con el epígrafe 9. Efectos sobre la salud humana y el medioambiente, de la presente Guía)

La presencia de dióxido de titanio en las aplicaciones sobre pavimentos percolados, además de reducir los niveles de contaminantes en el aire urbano, también contribuye al aumento de la durabilidad de la capa de rodadura, pues desarrolla una alta capacidad mecánica y una buena resistencia al ataque de productos químicos y al envejecimiento del ligante, además reduce los fenómenos de sobrecalentamiento de los núcleos urbanos (*Almazán y col. 2012*). Aunque el uso de nanopartículas en la producción de materiales con propiedades fotocatalíticas puede provocar una pequeña liberación de las mismas al medio ambiente, es durante la fabricación de nanopartículas y su aplicación mediante mezclado en seco, *spray*, etc cuando se produce el máximo riesgo para la salud humana.

Se han realizado ensayos de laboratorio comparando actividades similares con y sin el empleo de nanopartículas de óxido de titanio, analizándose el tamaño de las partículas generadas y liberadas al entorno sin que se haya relacionado su utilización con un detrimento en la salud de los trabajadores. Considerando que un proceso libera nanopartículas si se identifica un incremento de la concentración de las mismas comparado con el mismo proceso llevado a cabo sin nanopartículas (*Brouwer y col. 2009*), se pueden utilizar agentes mitigantes durante el proceso, por ejemplo, el empleo de agua durante la manipulación de nanopartículas reduce la exposición a las mismas, como se concluye de un estudio que evalúa y compara las concentraciones de nanopartículas liberadas durante las actividades de mezclado de materiales de construcción en seco y en húmedo (*Dylla y col. 2012*), esto es debido a un incremento del tamaño medio de partícula.

Los recubrimientos fotocatalíticos tienen la ventaja de inmovilizar las nanopartículas en un soporte y por tanto, limitar su liberación al medio ambiente. La adhesión del recubrimiento al soporte proporciona una evaluación de las nanopartículas liberadas, aunque la cuantificación simulando un medio real tampoco es una tarea sencilla, pues hay que tener en cuenta múltiples factores: viento, agua, luz, tránsito, etc.

Los tests de envejecimiento en laboratorio demuestran un mayor deterioro para los recubrimientos de mayor espesor, con pérdidas de la adhesión ligado a una disminución

de actividad fotocatalítica. Esta liberación de partículas del recubrimiento podría decrecer y estabilizarse después de las primeras semanas de uso como se ha observado previamente en pinturas (*Olabarrieta y col. 2012*). Otros tests demostraron un deterioro de la actividad fotocatalítica debida a la acumulación de suciedad (polvo, aceites, grasas,...) y contaminantes. En estos casos un simple lavado con agua mejora considerablemente la eficiencia fotocatalítica (*Shen y col 2012*).

La seguridad de los nanocomposites está asociada a un fotocatalizador más firmemente unido al soporte que mejore la durabilidad en las agresivas condiciones medioambientales (*Chen y col. 2011*). Hasta ahora la aplicación del fotocatalizador mediante spray presenta eficiencia en cuanto a costes y propiedades de adhesividad con el soporte y durabilidad frente a cargas de tráfico y fenómenos meteorológicos. La pérdida de actividad fotocatalítica en estos materiales está íntimamente ligada a la curva de desgaste de los áridos gruesos, o lo que es lo mismo, a la resistencia de los mismos al pulimento acelerado motivado por el paso del tráfico (*Almazán y col. 2012*).

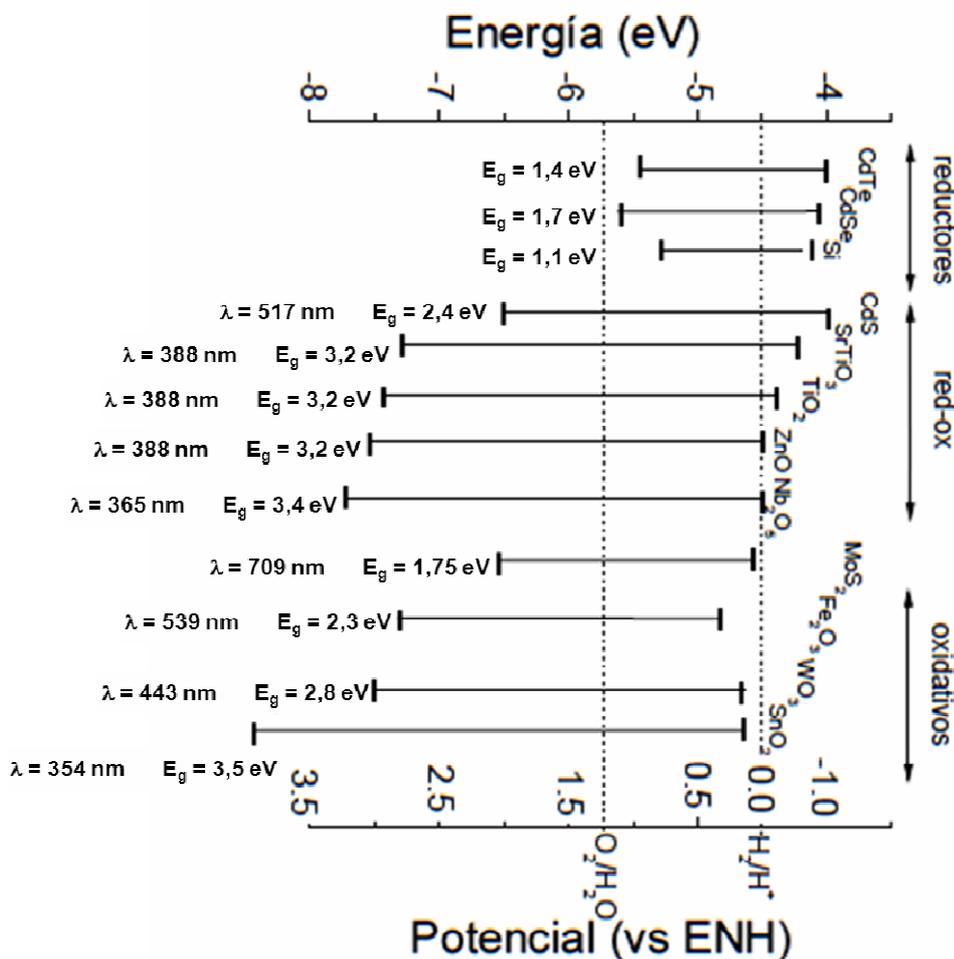
Por otro lado y consecuencia de este desgaste debido al uso en superficies transitadas deben desarrollarse aplicaciones sencillas para mantenimiento y restauración de estos recubrimientos, con el fin de garantizar una larga vida de actividad fotocatalítica.

### 6.3. Luz

La longitud de onda de la radiación luminosa utilizada para activar el proceso fotocatalítico desempeña un papel imprescindible para que se inicie la reacción de oxidación fotocatalítica. El dióxido de titanio se activa con longitudes de onda correspondiente a radiación UV-A (320-400 nm), pero existen otros compuestos que presentan actividad fotocatalítica a otras longitudes de onda. Aunque se ha estudiado la actividad fotocatalítica de otros óxidos (óxido de zinc, de estaño, de tungsteno, etc.) y sales (seleniuro de cadmio, sulfuro de cadmio, etc.), en general, los mejores resultados se obtienen con óxidos de titanio dopados con algún metal (plata, oro, etc.), no metal (carbón, nitrógeno, etc.) o mezclado con otros óxidos (óxido de zirconio, óxido de zinc, etc.).

Cuando estos materiales van a utilizarse en exteriores, lo más interesante es desarrollar fotocatalizadores que se puedan activar con la longitud de onda del espectro solar, de forma que pueda aprovecharse al máximo la radiación del sol. Actualmente no existe un catalizador que presente con la radiación visible una actividad fotocatalítica equivalente al dióxido de titanio en el UV-A.

Cuando estos materiales se utilizan en interiores la radiación puede seleccionarse con las limitaciones debidas al uso de radiaciones nocivas para la salud (UV-B (320-280 nm), UV-C (280-200 nm), UV lejano (200-10 nm)). En estos casos se puede controlar tanto la intensidad como la longitud de onda de la radiación seleccionando las fuentes de luz más adecuadas.



*Posición relativa de los bordes de las bandas de conducción y de valencia ("band gap") de algunos compuestos semiconductores que pueden actuar como fotocatalizadores con la radiación UV-Vis.*

Por otro lado, se han realizado múltiples estudios intentando aumentar la eficiencia de los catalizadores bajo la radiación visible. En algunos casos se han usado óxidos semiconductores alternativos (óxidos de estaño, de zinc, de tungsteno etc.), dopaje del óxido de titanio con metales (tungsteno, hierro, etc.), dopaje con no metales (carbón, nitrógeno, azufre,...) o mezclas de estas soluciones. A pesar de ello, hasta ahora la mayoría de estos esfuerzos no han dado lugar a materiales que mejoren significativamente los resultados de los catalizadores basados en dióxido de titanio.



Experimento en el interior de un túnel en Milán, Porpora St. (Italcementi)

#### 6.4. Color

Estos materiales de construcción con propiedades fotocatalíticas mantienen su actividad cuando el soporte es coloreado. Los colorantes empleados en la formulación deben de ser pigmentos inorgánicos para evitar la propia degradación de la molécula orgánica y la pérdida de su capacidad colorante debido a la actividad fotocatalítica (*Italcementi 2012*). Los pigmentos a base de óxidos de hierro (*Rockwood*) se han aplicado recientemente a fotocatalizadores muy efectivos. Estos compuestos inorgánicos desarrollan colores muy oscuros (granates, marrones, negros).



Algunos ejemplos de gamas cromáticas de productos fotocatalíticos

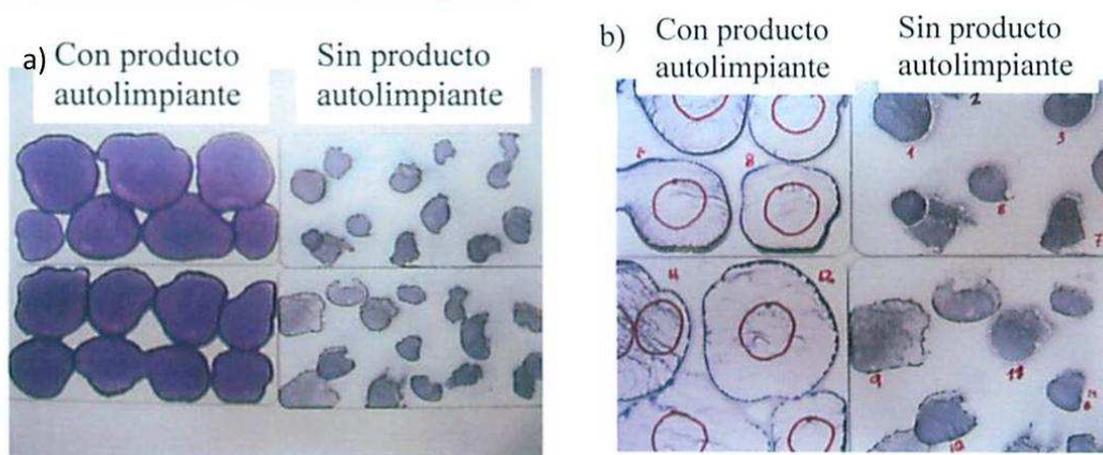
### 7. OTRAS APLICACIONES DE LOS MATERIALES FOTOCATALÍTICOS EN INFRAESTRUCTURAS URBANAS: “Materiales auto-limpiables” (*Self-cleaning materials*) y eliminación de contaminantes atmosféricos

En los últimos años, el empleo de  $\text{TiO}_2$  en materiales de construcción ha surgido como una prometedora aplicación para el desarrollo de infraestructuras y edificios más sostenibles. En este contexto, los cementos y otros materiales fotocatalíticos, bajo irradiación UV, poseen una cierta capacidad “auto-limpiable” y son, asimismo, capaces de

degradar distintos contaminantes atmosféricos. Fundamentalmente, las ventajas de estos materiales son el aumento de la calidad del aire en el entorno y la mejora del aspecto visual de las infraestructuras disminuyendo, de este modo, la necesidad de mantenimiento de los materiales (Pichat y Col. 2012).

En la actualidad, existen varias infraestructuras construidas con materiales basados en cementos que contienen  $TiO_2$ , entre estos destaca La iglesia “*Dives in Misericordia*” (Roma, Italia) o el edificio público “*Cité de la musique et des Beaux-Arts*” (Chembéry, Francia), asimismo, el  $TiO_2$  se ha empleado en distintos edificios en Bélgica, Francia, China, Italia, Japón, Marruecos o Mónaco. A pesar de que algunos casos como los edificios de Chambéry y Roma han mostrado resultados muy interesantes en el mantenimiento del color original del material, determinar la eficiencia “auto-limpiable” y/o descontaminante de los materiales fotocatalíticos es un problema complejo, y se deben realizar mayores esfuerzos para obtener datos más concluyentes. Por otro lado, es preciso establecer métodos estandarizados que permitan comparar la eficacia de estos materiales y la estabilidad de los mismos a lo largo del tiempo (Maury y Col. 2010).

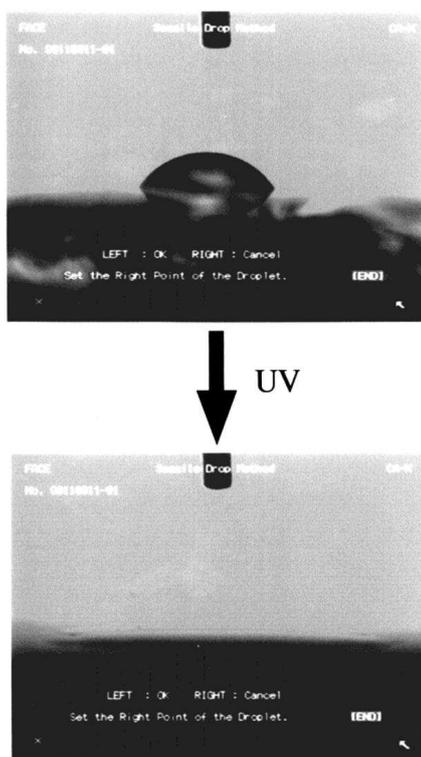
Con el fin de ilustrar el proceso “auto-limpiable” y la capacidad de eliminación de contaminantes, se presenta en la figura un ensayo de eliminación de azul de metileno (colorante modelo) en un material fotocatalítico. En la figura siguiente se pueden observar las fotografías de dos materiales (a), uno de ellos tratado con un producto fotocatalítico, sobre los que se aplicó el azul de metileno y en las fotografías de la derecha (b) se muestran los materiales tras 209 h de irradiación UV. Cabe destacar que, inicialmente el azul de metileno se dispersa en mayor medida en el producto fotocatalítico debido, probablemente, a un mayor carácter hidrófilo del material. La exposición a la luz UV (ver figura) da lugar a la degradación del azul de metileno en el material fotocatalítico produciendo una disminución muy notable de la coloración inicial en el material recuperando en gran medida su aspecto original.



Fotografías de muestras de un material tratado y sin tratar con producto fotocatalítico a las que se les aplicó gotas de azul de metileno: a) Sin exposición UV,  $t=0$ , b) Exposición UV,  $t=209h$ . (Informe Técnico del Instituto Tecnológico de la construcción-AIDICO)

### 7.1. “Self-Cleaning materials”: Materiales con capacidad “auto-limpiable”

El empleo de  $\text{TiO}_2$  en materiales de construcción (“Self-Cleaning materials”) permite mantener limpias las infraestructuras (Othani, 2011). Estas aplicaciones requieren una activación del  $\text{TiO}_2$  por efecto de la luz UV del sol que, con ayuda de la lluvia y la humedad del ambiente, permite oxidar los compuestos orgánicos, eliminando en parte depósitos que son visualmente indeseables. Además, la presencia de especies inorgánicas totalmente oxidadas -Nitratos, sulfatos, carbonatos- en los materiales puede disminuir gracias a la eliminación de la materia orgánica dado que ésta puede actuar como un “adherente” para estas especies inorgánicas. Por otro lado, el  $\text{TiO}_2$  permite un aumento del carácter hidrófilo del material (“mayor afinidad al agua”) (Sakai y Col., 2003), de modo que las gotas de agua se extienden en la superficie del material en forma de película, evitando la deposición de partículas o sustancias en la superficie, y facilitando el lavado (Pichat, 2012).



Fotografías tomadas durante medidas del ángulo de contacto del agua en film de  $\text{TiO}_2$  antes y después de irradiación UV ( $20 \text{ mW/cm}^2$  durante 1 h). (Sun y Col. 2001)

Una ilustración muy clara del aumento de la hidrofiliidad del material en presencia de  $\text{TiO}_2$  se puede ver en la figura superior, en estas fotografías se presenta un film de  $\text{TiO}_2$  sobre vidrio en el que el ángulo de contacto de una gota de agua pasa de  $54^\circ$  a  $0^\circ$  al exponer el material a la luz UV. En este sentido, durante la irradiación se producen cambios superficiales en el  $\text{TiO}_2$ , donde las moléculas de agua tienden a formar enlaces de hidrógeno con los grupos OH (Sun y Col. 2001), lo que explica que las gotas de agua aisladas formen una película favoreciendo el lavado del material.

## 7.2. Eliminación de contaminantes en el aire: “Air cleaning materials”

Por otro lado, la capacidad de eliminación de contaminantes en aire del proceso fotocatalítico, es bien conocida. En este sentido, el proceso fotocatalítico, emplea la radiación ultravioleta como fuente de excitación del catalizador ( $\text{TiO}_2$ ), sobre el que se adsorben distintos gases -oxígeno ( $\text{O}_2$ ), vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), y también las especies contaminantes del aire-, estos gases participan en distintas reacciones de oxidación-reducción capaces de degradar los contaminantes produciendo finalmente especies inocuas como  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  e iones inorgánicos (Tompkins y Col. 2005).

Algunos autores (Lawryc y Col. 1996; Obee y Col. 1995; Cassar y Col. 2003) señalan que las matrices  $\text{TiO}_2$ /cemento pueden eliminar junto a los  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  otros compuestos orgánicos volátiles (COVs) como el benceno y el tolueno, cloruros orgánicos, aldehídos, o los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) presentes en la atmósfera. Además, el  $\text{TiO}_2$  es comúnmente aplicado en desinfección degradando bacterias, endosporas, hongos (Chen y Col. 2009; Howard y Col. 2011).

El número de contaminantes atmosféricos que pueden ser degradados con aplicaciones  $\text{TiO}_2$ /UV es extraordinariamente extenso dado que, a priori, prácticamente cualquier compuesto orgánico es susceptible de ser oxidado mediante fotocatalisis heterogénea. Algunos ejemplos del amplio abanico de sustancias son los trabajos de Tompkins (Tompkins y Col. 2005) donde se recogen hasta 60 referencias en las que se estudia la eliminación de distintos compuestos orgánicos e inorgánicos en fase gas. Otra buena idea del potencial que tienen estos materiales para la eliminación de contaminantes en el aire es la tabla inferior, recogida en el trabajo de Carp (Carp y Col. 2004) donde se muestran distintos estudios de fotodegradación en fase gas con materiales basados en  $\text{TiO}_2$ .

*Compuestos fotodegradados en fase gas con materiales basados en  $\text{TiO}_2$ . (Parcialmente adaptada de Carp y Col. 2004)*

Compuesto	fotocatalizador	
Hidrocarburos	Metano	$\text{TiO}_2$
	Etano	$\text{TiO}_2$
	Propano	$\text{TiO}_2$ ; $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$
	n-Butano	$\text{TiO}_2$
	Hexano	$\text{TiO}_2$
	Heptano	$\text{TiO}_2$
	Ciclohexano	$\text{TiO}_2$
	Etileno	$\text{TiO}_2$ ; $\text{TiO}_2$ /Borosilicato; anillos vidrio; $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$
	Propeno	$\text{TiO}_2$
	Metilacetileno	V- $\text{TiO}_2$
	Ciclohexeno	$\text{TiO}_2$
	Benceno	$\text{TiO}_2$ /zeolitas; $\text{TiO}_2$
	Tolueno	$\text{TiO}_2$ ; $\text{TiO}_2$ /sílice;
		$\text{TiO}_2$ /vidrio, silicio, alúmina;

		TiO <sub>2</sub> /sílice; PET+celulosa
Compuestos Halogenados	DCH (diclorometano)	TiO <sub>2</sub>
	Triclorometano	TiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Fibra vidrio
	TCE	TiO <sub>2</sub> ; TiO <sub>2</sub> /monolito
	PCE	TiO <sub>2</sub>
	Cloruro de Vinilo	TiO <sub>2</sub> ; TiO <sub>2</sub> /sílice
	1,3-diclorobenzeno	TiO <sub>2</sub>
	Dietilamina	TiO <sub>2</sub>
	Propilamina	TiO <sub>2</sub>
	Piridina	TiO <sub>2</sub>
Compuestos Hidroxilados	Metanol	TiO <sub>2</sub>
	Etanol	TiO <sub>2</sub> ; Pt/TiO <sub>2</sub> ; Fe/TiO <sub>2</sub>
	2-Propanol	TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ; TiO <sub>2</sub>
	Butanol	TiO <sub>2</sub> /zeolitas
	tert-Butil-alcohol	Pt/TiO <sub>2</sub>
	Dietiléter	TiO <sub>2</sub>
	Metil-butil-éter	
Compuestos Sulfurados	Sulfuro de Dietilo	TiO <sub>2</sub>
	Sulfuro de 2-Cloroetil etilo	TiO <sub>2</sub>
Compuestos con Silicio	1,3,5,7-Tetrametilciclotetrasiloxano	TiO <sub>2</sub>
	Octametiltrisiloxano	TiO <sub>2</sub>
Aldehídos, cetonas	Formaldehído	TiO <sub>2</sub> ; SiO <sub>2</sub> o WO <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub>
	Acetaldehído	TiO <sub>2</sub> ; Pt/TiO <sub>2</sub> ; V, Cr, Mn, Fe; Ni-TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ; TiO <sub>2</sub> /papel
	Propionaldehído	TiO <sub>2</sub> /mordenita; TiO <sub>2</sub> ; Pt/TiO <sub>2</sub>
	Metil-etil cetona	TiO <sub>2</sub> /zeolitas
	Metil-isobutil cetona	TiO <sub>2</sub>
Derivados Halogenados de Ácido Carboxílico	Ácido Dicloroacético	TiO <sub>2</sub>
Compuestos Inorgánicos	NO <sub>x</sub>	TiO <sub>2</sub> ; TiO <sub>2</sub> /hidroxiapatita; TiO <sub>2</sub> /zeolita; Pt/TiO <sub>2</sub>
	O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub> /Sustrato de vidrio; Pt/TiO <sub>2</sub>
Compuestos Orgánico-inorgánico	NO + BTEX	TiO <sub>2</sub> (interior)
	NO + BTEX + SO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub> /AC (interior); TiO <sub>2</sub> /fibra de vidrio

## 8. IMPLICACIONES AMBIENTALES Y DE SALUD MOTIVADAS POR EL EMPLEO DE PRODUCTOS FOTOCATALÍTICOS EN INFRAESTRUCTURAS URBANAS

El dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) se usa principalmente como pigmento debido a su brillo, elevado índice de refracción y resistencia a la decoloración. La producción global de  $\text{TiO}_2$  para todos los usos es del orden de millones de toneladas por año. Cerca del 70% de todo el  $\text{TiO}_2$  producido se usa como pigmento de pinturas, también se usa en vidrios, esmaltes, plásticos, papel, fibras, alimentos, medicamentos, cosmética y pasta de dientes. Otros usos de  $\text{TiO}_2$  incluyen aplicaciones antimicrobianas, catalizadores para purificación del aire y agua, aplicaciones médicas y almacenamiento de energía (*Weir y col. 2012*).

A pesar de que los productos fotocatalíticos a partir de dióxido de titanio se llevan empleando desde hace muchos años en numerosos aspectos de nuestra vida cotidiana, también desde hace unos años se ha abierto un debate acerca de las implicaciones que este tipo de productos pudieran tener sobre el medio ambiente o sobre la salud humana, tanto en fase de fabricación (en plantas de producción), como en fase de explotación, es decir, una vez aplicado el producto sobre el activo de turno de la infraestructura urbana. Dado que el principio activo para la fabricación del fotocatalizador puede estar constituido por distintas composiciones granulométricas de partículas, con tamaños muy diversos, desde hace décadas la comunidad científica lleva realizando estudios e investigaciones toxicológicas para conocer la influencia de las partículas más finas del dióxido de titanio sobre el medioambiente y sobre la salud humana en las fases anteriormente mencionadas.

No tendría ningún sentido poner en funcionamiento una serie de productos que permiten reducir la contaminación de las ciudades, si como contrapartida tuvieran efectos perjudiciales sobre la salud.

Por eso mismo, es responsabilidad de la Asociación Ibérica de Fotocatálisis, exponer en el presente documento algunas de las investigaciones más relevantes llevadas a cabo hasta el momento, así como, sus incertidumbres y nuevos retos en este sentido.

Las nanopartículas tienen tres vías de acceso a las personas: inhalación, dérmica e ingestión (*Hoerr y col. 2009*), de todas ellas la inhalación es la más común en trabajadores relacionados con la fabricación y aplicación de nanopartículas. El uso de óxido de titanio nanoparticulado ha experimentado un enorme aumento en los últimos años, con aplicaciones en alimentación, cosmética, tejidos y materiales de construcción, lo que podría favorecer que las cantidades liberadas al medio ambiente puedan adquirir dimensiones de riesgo potencial para la salud (*Wiesner y col. 2009*).

Los riesgos de las nanopartículas de óxido de titanio son prácticamente desconocidos (*Tsuji y col. 2006*), y, aunque determinados estudios realizados inducen a pensar que el óxido de titanio es potencialmente tóxico, hay muy poca información disponible sobre las dosis y características de la exposición a estos materiales (*Farre y col. 2011, EASHW 2012*). Algunos estudios realizados hasta el momento concluyen que la exposición durante la fabricación de pavimentos fotocatalíticos no excede la concentración máxima permitida (*Broekhuizen y col. 2011*) aunque los niveles de nanopartículas detectados en condiciones reales durante la aplicación de un recubrimiento fotocatalítico mediante spray fueron superiores a las determinadas en la simulación de laboratorio, probablemente

debido a las turbulencias y al tráfico rodado. Sin embargo, los pavimentos ya recubiertos no produjeron un incremento en el nivel de nanopartículas atmosférico (*Dylla y col. 2012*).

Algunos estudios han relacionado las nanopartículas de óxido de titanio con posibles efectos adversos en pulmones de ratón, órganos de pez y algas, también se ha descrito una probable relación con el asma, la enfermedad de Crohn y un efecto carcinogénico, pero es imprescindible diseñar protocolos estandarizados para analizar con mayor precisión la toxicidad de estos nanomateriales en humanos (*Olabarrieta y col. 2012*), pues actualmente no hay ningún estudio concluyente al respecto.

En primer lugar cabe destacar que la mayoría de las incertidumbres que pueden existir hoy en día, respecto a las implicaciones en la salud y el medioambiente, por el empleo de productos fotocatalíticos, proviene de la ausencia de regulación y estandarización de normas y leyes, a nivel regional, nacional e internacional.

En segundo lugar, como se ha comentado anteriormente, la comunidad científica ha llevado a cabo numerosos estudios toxicológicos en los últimos años, en humanos y otros seres vivos, para tratar de dar una respuesta concluyente a este debate. Sin embargo, dada la gran cantidad de parámetros influyentes en estos estudios, resulta realmente complicado establecer un dictamen lo suficientemente contundente como para zanjar el citado debate.

A continuación se exponen algunos de los estudios toxicológicos más relevantes realizados en los últimos años por el Instituto Nacional Americano de Seguridad y Salud Ocupacional y un consorcio formado por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer:

### **8.1. Estudio 1 realizado por el Instituto Nacional Americano de Seguridad y Salud Ocupacional sobre trabajadores con alta exposición a la fabricación de dióxido de titanio en plantas de fabricación**

Entre los años 1984 y 2008 se han llevado a cabo seis importantes investigaciones epidemiológicas en trabajadores con alta exposición a la fabricación de dióxido de titanio. Las conclusiones de los resultados de estos estudios, que han sido publicadas en el año 2011, en un informe redactado por el *American National Institute of Occupational Safety and Health* (NIOSH, en adelante), establecen el siguiente dictamen “En general, no existen pruebas concluyentes que establezcan una relación directa entre la exposición de los trabajadores a las partículas de dióxido de titanio liberadas durante su fabricación, con la mortalidad de los mismos por cáncer de pulmón”.

Por lo tanto, hasta la fecha, no se han detectado efectos adversos sobre la salud de estos trabajadores, a pesar de que sus niveles de exposición son muy superiores a los que puedan tener los ciudadanos, una vez que estos productos son aplicados sobre las infraestructuras urbanas. El nivel de exposición medio al que están sometidos los trabajadores de las plantas de producción de dióxido de titanio es de unos 3,1 mg/m<sup>3</sup> de aire.

### **8.2. Estudio 2 realizado por Emilie Lebrun sobre animales vivos**

Existen publicaciones, como la de la autora Emilie Lebrun y col. donde se citan concretamente dos experimentos realizados sobre animales vivos. El primero de ellos, realizado sobre ratones (*Fabien y col. 2008*), donde los autores consiguen demostrar que no se encontraron restos de dióxido de titanio en el cerebro de estos animales, tras

administrarles, por vía intravenosa, una dosis de 5 mg/kg. En el segundo estudio (Ma y col. 2010) las dosis de dióxido de titanio se administraron por vía gástrica mediante 14 dosis de 150 mg/kg. Esta dosis acumulada, sería la equivalente a 2,1 gr de dióxido de titanio por kilogramo de peso del ratón. Extrapolando esta dosis a un humano de 50 kg de peso, equivaldría a 105 g de dióxido de titanio, lo cual es una aberración en términos de exposición real a este tipo de sustancias, ya que el orden de magnitud habitual está en torno a 10 mg/kg.

En la actualidad, la NIOSH recomienda mantener cierto nivel de proporción para cada vez que se realicen estudios con animales, con respecto a las exposiciones reales a las que se ven sometidos los humanos, con objeto de que las conclusiones obtenidas sean lo más realistas y fiables posibles. Ya que si, por ejemplo, forzáramos a un ratón a ingerir 3 litros de agua diarios, con seguridad esta ingesta le acarrearía problemas de salud, y sin embargo, no por eso podríamos concluir que el agua es un compuesto que puede generar ciertos riesgos de salud en los humanos, por extrapolación.

### **8.3. Estudio 3 realizado por Organización Mundial de la Salud y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer sobre trabajadores con alta exposición a la fabricación de dióxido de titanio en plantas de fabricación**

El Volumen 93 IARC *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, presentado en Lyon (Francia) en el año 2010, por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, expone uno de los estudios más completos realizados sobre humanos en plantas de fabricación de dióxido de titanio durante más de 40 años.

Chen y Fayerweather (1988) dirigieron un estudio epidemiológico que pretendía determinar la incidencia entre los casos de mortalidad y detección de cáncer entre 1576 empleados expuestos a las partículas que se generaban durante los procesos de producción del dióxido de titanio a lo largo de más de un año en dos plantas de Estados Unidos. La información de los casos de cáncer detectados y de las defunciones, tanto de los trabajadores en activo, como de los jubilados fue facilitada por los registros de las propias Compañías productoras, que disponían de datos desde el año 1956.

A partir de estas informaciones se calcularon unos ratios, los correspondientes a los casos de cáncer y los de los registros de defunción, que posteriormente fueron comparados con los ratios típicos esperados por las propias Compañías y con los obtenidos en todas las Plantas de Estados Unidos.

Los índices de mortalidad obtenidos en las Plantas fueron inferiores a los esperados. Sólo se detectaron 9 casos de fallecimiento por cáncer de pulmón entre los trabajadores, frente a los más de 17 casos obtenidos en todas las Plantas de Estados Unidos, en el mismo periodo de tiempo, y frente a los más de 15 casos esperados por la propia Compañía, también en el mismo periodo.

Cabe señalar, que los niveles de exposición de los trabajadores, y algunos otros factores intervinientes no se detallan en este estudio y que los casos de cáncer detectados en los empleados en activo se emplearon tanto para casos observados por las Compañías, como para el cálculo de los ratios esperados por las mismas.

A modo de curiosidad, se realizó un estudio en paralelo con el personal expuesto con mayor edad de las dos plantas, observando que el riesgo por cáncer de pulmón no se incrementó ante ninguno de los formatos (a nivel de tamaño de partículas) de dióxido de titanio. Pero al igual que ocurre en el caso anterior, este estudio presentó ciertas limitaciones, tal como la ausencia de información en cuanto a niveles de exposición, entre otros.

#### 8.4. Otros estudios

El  $\text{TiO}_2$  es, probablemente, el nanomaterial más estudiado, debido a su ampliamente extendido empleo como cremas solares con alto factor de protección. La penetración de las partículas nano- $\text{TiO}_2$  a través de la piel sana está completamente descartada, como potencial efecto adverso sobre la salud humana, como se desprende de las conclusiones finales del proyecto FP6 Nanoderm.



*Las nanopartículas en cosmética están consideradas como inocuas para la salud, pues la piel humana es una excelente barrera de protección ante las mismas.*

Por su parte, el nano- $\text{TiO}_2$  inhalado se dice que podría alcanzar el flujo sanguíneo y ser transportado por todo el organismo. Las conclusiones de los estudios llevados a cabo a este respecto, sin embargo, concluyen que el número de partículas localizadas en el cuerpo humano es muy inferior a la dosis inicial. Es más, muchos estudios no han encontrado efectos adversos, o estos han sido totalmente irrelevantes. El único posible efecto adverso que se ha detectado es la inflamación de vías respiratorias después de la inhalación de nano- $\text{TiO}_2$ . Aunque este aspecto tendría que verificarse con nuevos estudios.

#### 8.5. Conclusiones

Por todo lo indicado, es necesario realizar más estudios que cuantifiquen y caractericen tanto la exposición a nanopartículas como su transporte y transformación en el medio ambiente y cómo pueden influir estos procesos en la toxicidad de las mismas (Lee y col. 2009).

La información facilitada por las compañías a través de las Hojas de Seguridad de materiales (*Material Safety Data Sheets*, MSDS) es gestionada por la Agencia Europea

de Productos químicos (*European Chemicals Agency, ECHA*), pero no todas las sustancias químicas están sujetas a esta obligación (*Vogelezang-Stoute y col. 2010*). La UE está trabajando en la elaboración de una completa normativa en el tema de nanopartículas tanto su definición, métodos de medida y cuantificación, aplicación, etiquetado, seguridad, etc. (*EU nanotechnology, JCR 2012*).

A la luz de estas investigaciones, el comité científico y de normalización (ISO TC 229) es consciente de la dificultad de la comparación entre resultados de investigaciones nanotoxicológicas, por ello está promoviendo la estandarización de los materiales que componen los principios activos para formar catalizadores y sus procesos de transformación como punto de partida para permitir la comparación de los resultados de estas investigaciones:

*“Los efectos sobre la seguridad y salud ocupacionales de los nuevos nanomateriales son básicamente desconocidos. Esto puede ser atribuido a que el desarrollo de la nanotecnología es reciente, lo que implica la ausencia de información disponible en exposición humana y en el ambiente de trabajo. Como consecuencia, nuestra capacidad para predecir cuidadosamente el impacto de la exposición a algunos nanomateriales sobre la salud de los trabajadores es, en estos momentos, limitada por las tecnologías disponibles en la actualidad, en particular, nuestra capacidad para medir nanopartículas en el ambiente de trabajo (o en el medio ambiente). Además, la capacidad del cuerpo humano para reconocer y responder adecuadamente a los principales nanomateriales es esencialmente desconocida, en la actualidad.”*

Esto implica que el conocimiento científico no es capaz, en la actualidad, de caracterizar, evaluar y resolver la mayoría de los problemas relacionados con la nanotecnología, por lo que la necesidad de llevar a cabo un mayor número de estudios sobre aspectos éticos, sociales y legales de la nanotecnología es enorme.

Para solucionar estos problemas, la NanoCommission (BMU, 2008) está solicitando desde hace unos años, una caracterización mínima de los materiales nanoparticulados para obtener estudios comparables sobre su comportamiento y efectos, que como mínimo identifique los siguientes parámetros:

- Composición química, pureza, impurezas.
- Tamaño de partícula y granulometría.
- Superficie específica y morfología (fases cristalinas, formas).
- Química superficial, recubrimiento.
- Extensión de la aglomeración/agregación, o tamaño de partícula en condiciones experimentales.
- Solubilidad en agua.

Criterios similares de caracterización han sido recomendados por otros autores (*MINChar Initiative, 2008; OCDE, 2008; Stone y col. 2010*).

En definitiva, la mayor parte de los estudios e investigaciones realizados hasta la fecha, ponen la atención sobre la inconsistencia de los mismos, lo cual puede ser debido al número de factores a estudiar y las diferentes condiciones experimentales empleadas.

Actualmente la comunidad científica está trabajando en el desarrollo de una metodología de evaluación de riesgos potenciales que relacione los tiempos de exposición con los

efectos adversos de las partículas de dióxido de titanio, en función de sus tamaños (polvo, micrométrico, nanométrico o ultrafino), su forma, su composición química, sus grados de impureza, su superficie específica, su recubrimiento o su solubilidad en agua.

## **9. RETOS FUTUROS**

Después de analizar una extensa documentación sobre fotocátalisis aplicada a infraestructuras urbanas, podemos proponer algunos estudios que ayuden a esclarecer campos poco desarrollados en este tipo de aplicaciones. En este sentido cabría destacar:

- Desarrollo de fotocatalizadores con mayor/mejor aprovechamiento del espectro solar.
- Mejora de las propiedades de adherencia entre el fotocatalizador y el sustrato para aumentar la durabilidad y evitar, en lo posible, la liberación de nanopartículas al medio ambiente.
- Desarrollo de métodos eficientes y escalables para evaluar la actividad fotocatalítica, propiedades autolimpiantes, adhesión fotocatalizador-soporte, durabilidad y ecotoxicidad.
- Estudios de los posibles efectos nocivos de las nanopartículas fotocatalíticas liberadas realizados en concentraciones ambientales dentro de parámetros reales.

**10. ANEXO I:** Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares de los Principales Materiales Fotocatalíticos para la Construcción.

## **PAVIMENTOS BITUMINOSOS DRENANTES PERCOLADOS CON LECHADA FOTOCATALÍTICA**

### **1. DEFINICIÓN Y CONDICIONES GENERALES.**

#### **1.1. Definición**

Se trata de una capa de rodadura, de 4 cm de espesor, constituida por una mezcla bituminosa drenante, cuyos huecos se rellenan mediante percolación a partir de una lechada fabricada con cemento y resina, y cuyo objetivo es obtener una superficie de rodadura impermeable, que reduzca las concentraciones de NOx emitidas por el tráfico, de manera que se mejore la calidad del aire en el entorno de su aplicación.

#### **1.2. Condiciones Generales**

La aplicación de este pavimento tiene lugar en dos fases: la puesta en obra de una mezcla soporte abierta, tipo drenante y, la aplicación por percolación, a través de los huecos existentes en la misma, de una lechada especial fabricada con resinas sintéticas y cemento.

Este tipo de pavimentos han de ser colocados sobre un soporte estable, impermeable y convenientemente dimensionado, para evitar las degradaciones superficiales y el agotamiento estructural prematuro por fatiga. Además, será de gran importancia su perfecta adherencia al soporte (en este caso, capa intermedia de mezcla bituminosa).

La granulometría de la mezcla drenante debe estar formada por áridos de granulometría discontinua, con tamaño máximo igual o inferior a 16 mm, de tal forma que permita obtener un volumen de huecos sobre mezcla superior al 22%.

La mezcla final deberá tener una resistencia a compresión simple mínima de 3 MPa, medida según la Norma NLT-161/98, y una resistencia a compresión diametral mínima de 0,80 MPa, medida según la Norma NLT-346/90, en ambos casos, determinadas a la edad de 28 días.

La aplicación en obra de este tipo de pavimentos, como capa de rodadura, se restringe a pendientes transversales y longitudinales inferiores al 4%, pues de lo contrario se dificultaría la percolación de la lechada.

#### **a) Mezcla Bituminosa drenante**

Serán de aplicación todas las especificaciones relativas a mezclas drenantes incluidas en el Artículo 543 del PG-3, modificado según la O.C. 24/2008.

El betún a emplear será de tipo BM-3c y deberá cumplir las especificaciones del Artículo 215 del PG-3.

#### **b) Lechada**

La lechada está constituida por cemento, arena, filler, agua, resina y, si es necesario, por aditivos (retardador de fraguado o acelerador de fraguado).

Es imperativo presentar una fórmula de trabajo, que simule las condicionantes de ejecución en fase de construcción, a la aprobación del Director de las Obras, previamente a su aplicación, que como mínimo incluirá la siguiente información (referida a las normas europeas UNE-EN o en caso que no sea posible, adjuntando las Normas a las que se haga referencia):

- Definición de las características de los materiales constituyentes - tipo de áridos, filler, tipo de cemento, resina o similar, tipo de aditivos y agua- de la propia lechada

- Definición de umbrales de viscosidad o fluidez
- Dotación óptima de lechada tras presentar distintos tanteos (incluyendo contenidos de cemento, agua, resina, aditivos, árido, filler y relación agua cemento).
- Definición del modelo de central de fabricación y el tiempo de mezclado asociado al proceso de fabricación elegido y el peso de cada amasada.
- Se deberá definir el equipo de extendido y compactación de la lechada (el tonelaje de este último es especialmente importante) que se vaya a utilizar.

Especificaciones de los materiales constituyentes:

- **Cemento:** Se podrán emplear cementos comunes de tipo CEM I ó CEM II, a excepción de los CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T y CEM II/B-T, con una resistencia mínima a compresión de 32,5 MPa . Se podrán emplear otros tipos de cementos, previa aprobación por parte del Director de las Obras.
- **Árido Fino.** La arena a emplear será procedente de machaqueo, silícea, limpia y fina y preferentemente, ensacada. En el caso de que ésta se suministre a granel, el contenido de agua de la arena ha de ser determinado previamente antes de proceder a la fabricación de una amasada. En cualquier caso el equivalente arena deberá ser superior a 50.
- El filler deberá ser silíceo, con un cernido mínimo de un 75% por el tamiz de 63 micras y ensacado. Es especialmente importante que el contenido de filler sea inferior al 4% en masa, sobre la mezcla.
- **Agua.** Se empleará agua potable, exenta de aceites, sal, ácidos alcalinos, materia orgánica o cualquier otra sustancia perjudicial.
- La resina sintética o similar, debe presentar sus correspondientes certificados de calidad, incluyendo ensayos y condiciones de aplicación
- **Aditivo.** Retardador o acelerador de fraguado, caso de ser necesarios, debe presentar sus correspondientes certificados de calidad, incluyendo ensayos y condiciones de aplicación

## 2. CONDICIONES DEL PROCESO DE EJECUCIÓN

### 2.1. Fabricación

#### a) **Mezcla bituminosa drenante**

Se realizará bajo las condiciones establecidas en el Artículo 543 del PG-3, modificado según la O.C. 24/2008.

#### b) **Lechada**

La lechada puede ser fabricada directamente en la obra, utilizando equipos de mezclado autopropulsados o bien en central de hormigón y transportado a obra, mediante camión hormigonera.

En caso de optar por fabricación en central, el amasado se realizará a velocidad máxima, en un tiempo a determinar en la fórmula de trabajo. La lechada obtenida debe de poder ser aplicada dentro de los 45 minutos siguientes a su fabricación.

Cuando la fabricación se realice en obra, el tiempo mínimo de amasado será de 5 minutos a velocidad máxima, aunque este aspecto deberá quedar definido en la fórmula de trabajo, aprobada por el Director de las Obras.

Con independencia del método empleado para la fabricación, el orden apropiado de introducción de los componentes (a respetar estrictamente) será el siguiente:

1. agua
2. resina
3. aditivo (sí fuera necesario)
4. arena
5. filler
6. cemento

La lechada debe de ser homogénea, “cremosa” y muy fluida. Cualquier “grumo” será eliminado por un nuevo amasado.

La relación agua/cemento (A/C) máxima será de 0,7.

La dotación de lechada deberá estar comprendida entre los 14 y los 18 kg/m<sup>2</sup>

Se debe prever un 5% más de componentes para fabricar la lechada, para prevenir las pérdidas ocasionales.

## **2.2. Puesta en Obra**

### **a) Mezcla bituminosa drenante**

Se atenderá a lo dispuesto en el Artículo 543 del PG-3, modificado según la O.C. 24/2008.

### **b) Lechada**

Previamente a la aplicación de la lechada, se comprobará que la mezcla bituminosa drenante está limpia, reemplazando o limpiando cualquier zona contaminada con agua o aire comprimido. Si se utilizara agua en la limpieza, o si el soporte se hubiera mojado, es preciso aguardar hasta que esté completamente seco antes de extender la lechada.

Desde la puesta en obra de la mezcla drenante hasta la aplicación de la lechada deberá transcurrir un periodo de tiempo no inferior a 24 horas.

La lechada se aplicará sobre el soporte a temperatura ambiente (preferiblemente alrededor de 20/25°C), evitando las temperaturas excesivamente altas (> 40°C) y bajas (< 5°C). En cualquier caso esta circunstancia ha de estar prevista en el diseño de la fórmula de trabajo.

La lechada no se podrá aplicar en caso de que la mezcla drenante esté saturada de agua, en tiempo lluvioso, o bajo amenaza de lluvias.

La extensión se debe realizar con extendedora, evitando que las juntas de la lechada y la mezcla drenante se superpongan, y sólo se debe recurrir a la aplicación manual para las bandas de los extremos, el contorno de las construcciones metálicas y los espacios restringidos.

No se aplicará en ningún caso lechada fresca sobre una zona ya extendida en la que haya comenzado el fraguado, con objeto de evitar la formación de peladuras.

Se deberá emplear un rodillo vibrante autopropulsado, de doble llanta y peso igual o inferior a 2 toneladas, y ajustado a alta frecuencia y baja amplitud, para esparcir la lechada sobre el soporte. Para ello se habrá de garantizar, por parte del personal aplicador, que siempre haya una pequeña acumulación, en forma de “arrollamiento” de lechada delante del rodillo. Este aspecto es esencial para una buena percolación. Al menos se deberán dar dos pasadas de rodillo.

Mediante el rodillo, se deberá vibrar en toda la superficie de aplicación, hasta que el soporte no tenga indicios de la existencia de huecos o burbujas de aire en superficie, y

quede saturada la mezcla drenante, evitando una utilización prolongada del rodillo en modo vibración, ya que que podría dañar la mezcla final.

Se deberá prestar especial atención a la percolación en las juntas de construcción, pues se trata de una zona crítica que puede generar problemas de percolación. Para minimizar estos problemas se comenzará a pasar el rodillo por estas zonas, preferiblemente.

Se permitirá el uso de la placa vibrante, exclusivamente, para aquellas zonas inaccesibles al rodillo compactador.

En el caso de que se interrumpiera el extendido de la lechada, por cualquier circunstancia (final del día, descansos para el almuerzo, etc), será obligado terminar completamente la zona en curso, incluyendo el pisado con rodillo, dejando una junta transversal, perpendicular al sentido de avance de la circulación. La junta transversal resultante ha de ser delimitada con papel adhesivo resistente a la tracción, al alargamiento y a la rotura. En el momento que se reanuden los trabajos se retirará el papel y se tratará como una junta de construcción.

Una vez que toda la superficie de aplicación, al final de cada jornada de trabajo, haya sido convenientemente recubierta con la lechada, se debe evacuar, mediante un barrido el exceso de lechada con objeto de evitar la formación de microfisuras. Este barrido puede comenzar, una vez que haya pasado el rodillo por toda la superficie a pavimentar, antes del fraguado completo de la lechada.

Se deberán proteger los bordillos, las alcantarillas, etc. que podrían estar en contacto o ser ensuciados por la lechada durante su aplicación.

Dentro de las doce horas siguientes a la aplicación de la lechada, se incorporará sobre el pavimento un riego de curado con un producto filmógeno, con una dotación comprendida entre 0,25 y 0,33 l/m<sup>2</sup>, con objeto de evitar las posibles fisuras de retracción que pudieran formarse.

### **2.3. Apertura al tráfico**

La apertura al tráfico rodado se realizará en un periodo de tiempo no inferior a catorce (14) días, salvo indicación contraria por parte del Director de las Obras.

No se permitirá el tráfico peatonal hasta 24 horas después de su terminación.

Dependiendo de la calidad del acabado de la superficie de rodadura, podrá ser necesario ejecutar un granallado sobre la misma, con objeto de proporcionar una adecuada textura que permita a los usuarios circular en buenas condiciones de adherencia neumático-pavimento. En cualquier caso, este aspecto quedará a juicio del Director de las Obras.

## **3. CONTROL DE CALIDAD**

### **a) Mezcla bituminosa drenante**

Se estará a lo dispuesto en el Artículo 543 del PG-3, modificado según la O.C. 24/200, aunque específicamente se realizarán al menos dos tomas de muestras durante el extendido sobre las que se realizarán ensayos de extracción de ligante, según la UNE EN 12697-39, análisis granulométricos, según la UNE EN 12697-2 y ensayos de Pérdida de Partículas según la UNE EN 12697-17.

Previamente al extendido de la lechada se realizará una campaña de control de la permeabilidad de la mezcla bituminosa drenante, mediante aparato permeámetro LCS, según la NLT-327/00, de tal forma que se confirme en todos los ensayos que se supera el 22% de huecos sobre mezcla. Este aparato debe contar con los certificados de calibración pertinentes, antes de proceder al ensayo. Se realizará al menos un ensayo

cada 350 metros cuadrados de superficie a pavimentar. En caso de no cumplirse este requisito en obra, quedará a juicio del Director de las Obras las acciones a adoptar. Es fundamental para asegurar la buena calidad del tratamiento una alta regularidad de los espesores de la mezcla. Por esta razón será necesario un control exhaustivo de los espesores extendidos.

#### **b) Lechada**

Se deberán realizar al menos 3 ensayos de determinación del equivalente arena de la arena a emplear en la lechada, según la UNE-EN-933-8.

Se realizarán otros 3 ensayos de determinación de la densidad aparente en tolueno del *filler* a emplear para la fabricación de la lechada, según la NLT-176.

Sobre el cemento se realizará una (1) determinación de la resistencia mecánica según la UNE-EN 196-1:2005.

Sobre la lechada obtenida, se realizará un ensayo de fluidez en la fabricación de cada amasada, y previamente a su vertido en obra, con objeto de verificar su validez. Este ensayo se determinará por el método que especifique el Director de las Obras.

Caso de fabricarse la lechada en una central de hormigón, se deberán verificar los siguientes aspectos:

- la cuba de agitación está limpia y no contiene piedras.
- los materiales empleados en la central corresponden a los del estudio de formulación.
- la central fabrica la fórmula solicitada – tomando en cuenta el contenido de agua de la arena utilizada durante la fabricación.
- la cantidad de lechada pedida para una amasada es correcta.
- la arena no está contaminada por otros áridos.

Para realizar el control de la dotación de lechada, durante el proceso de ejecución, se deberán contabilizar las amasadas y hacer un cálculo periódicamente, de la siguiente forma:

$$\text{Control de dotación (kg/m}^2\text{)} = \frac{\text{Número de amasadas} \times \text{Peso de una amasada (kg)}}{\text{Superficie cubierta (m}^2\text{)}}$$

Este control permitirá tener cierto orden de magnitud sobre las posibles variaciones de espesor de la mezcla bituminosa drenante, de las variaciones de su contenido de huecos y de la fluidez o viscosidad de la lechada.

Caso de utilizarse cementos con adiciones, se vigilará la presencia de manchas lechosas en la superficie, que señalan un exceso de agua en la lechada o una incompatibilidad del cemento y la resina.

#### **c) Pavimento terminado**

Una vez terminadas las obras de pavimentación, se tomarán testigos del paquete de mezcla bituminosa, mediante equipo mecánico a rotación, con broca de 100 mm de diámetro útil, de manera que se verifiquen los siguientes parámetros:

- Que el espesor de las capas de mezcla bituminosa se ajuste a los planos del proyecto
- Que la adherencia entre las capas de mezcla bituminosa es correcta, visualmente.
- Que la resistencia a compresión simple de los testigos extraídos de la capa de rodadura superan las exigencias establecidas en las condiciones generales del presente Pliego.

- Que la resistencia a compresión diametral de los testigos extraídos de la capa de rodadura superen las exigencias establecidas en las condiciones generales del presente Pliego.
- El porcentaje de huecos rellenos por la lechada.

Se tomará un testigo cada 350 m<sup>2</sup> de superficie pavimentada, sobre los que se efectuarán los ensayos de resistencia a compresión simple y diametral, sólo sobre la capa de rodadura, es decir, una vez discriminado el testigo, mediante cortadora. Previamente al ensayo de estos testigos se determinará la densidad de los mismos, con objeto de verificar el grado de percolación de la lechada, respecto a la fórmula de trabajo aprobada por el Director de Obra.

### **3.1. Criterios de Aceptación y rechazo**

#### **a) Mezcla bituminosa drenante**

Se estará a lo dispuesto en el Artículo 543 del PG-3, modificado según la O.C. 24/2008.

#### **b) Lechada**

Se deberá verificar en obra que la lechada está exenta de “grumos” y que la viscosidad o fluidez de la misma, se encuentra dentro de los límites establecidos por el fabricante, antes de su incorporación en obra.

Las acciones a adoptar, en cuanto al incumplimiento de cualquier especificación incluida en el presente artículo, quedarán a juicio del Director de las Obras.

### **4. MEDICIÓN Y ABONO**

\* m<sup>2</sup> capa de rodadura compuesta por pavimento anti-carburante de cuatro (4) cm de espesor.

La medición en metros cuadrados se obtendrá multiplicando los anchos de la capa de rodadura realmente construida de acuerdo con los planos especificados en el Proyecto, por la longitud que figura en los susodichos planos, o la medición deducida de los ensayos de control.

El precio incluye todos los materiales, mano de obra, maquinaria, transporte, medios materiales y auxiliares necesarios, así como todas las operaciones de fabricación y puesta en obra, tanto de la mezcla bituminosa drenante, como de la lechada, incluyendo el riego de curado superficial, los barridos y las reparaciones de irregularidades superiores a las tolerables y los trabajos de preparación de la superficie existente.

Son de abono independiente los riegos de adherencia.

No serán abonables los recrecidos laterales, ni los aumentos de espesores sobre los previstos en el proyecto.

## **SPRAYS FOTOCATALÍTICOS PARA PAVIMENTACIÓN DE CALLES Y ACERAS**

### **1. DEFINICIÓN Y CONDICIONES GENERALES.**

#### **1.1. Definición**

Los sprays fotocatalíticos son tratamientos superficiales fotocatalíticos anticontaminación basados en las propiedades del dióxido de titanio. Su aplicación sobre los pavimentos de calles, aceras y carreteras permite reducir la contaminación atmosférica, neutralizando determinados porcentajes de concentración de gases de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), entre otros contaminantes.

#### **1.2. Condiciones Generales**

Estos productos están diseñados por una formulación, específica y en ocasiones patentada, que le confiere al producto elevadas características fotocatalíticas, que permiten reducir determinados porcentajes de concentración de contaminantes atmosféricos como los óxidos de nitrógeno, de azufre y el ozono.

El spray fotocatalítico se formula a partir de una emulsión con base acuosa y dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) con estructura nanométrica que, en función de su formulación (adaptada a cada tipo de superficie de aplicación), penetra sobre la textura de aplicación, permitiendo conservar prácticamente inalteradas las características superficiales de la capa de rodadura, como la adherencia neumático-pavimento, el color y eventuales características específicas, como la capacidad drenante o fonoreductora. El aspecto del producto, una vez aplicado es de color gris-beige transparente.

El spray debe ser resistente al fuego y presentar un pH < 9.

Este producto puede ser empleado sobre rodaduras bituminosas y cementadas de cualquier tipología, sobre calles, carreteras, autovías, aparcamientos, carriles bici y aceras, y también sobre pavimentos industriales, zonas de carga, puertos y aeropuertos.

### **2. CONDICIONES DEL PROCESO DE EJECUCIÓN**

#### **2.1. Fabricación y puesta en obra**

El spray fotocatalítico es un producto premezclado y listo para su aplicación que se lleva a cabo mediante una maquinaria específica, patentada preferiblemente, dotada de un sistema automático de pulverización, cuyo caudal varía en función de la velocidad del camión. La aplicación sobre la rodadura se puede ejecutar mediante dos técnicas:

**a) En caliente**, sobre rodaduras de nueva ejecución, tras su compactación y previamente a la apertura al tráfico (el producto seca rápidamente)

Este tratamiento se lleva a cabo durante la fase de extendido de mezcla bituminosa, de acuerdo al siguiente protocolo de actuación:

1. Extendido de la capa de rodadura de mezcla bituminosa
2. Primera fase de la compactación de la rodadura
3. Pulverización del spray fotocatalítico sobre la capa de rodadura (que debe estar a una temperatura superior a 100°C)
4. Compactación final

5. Evaluación de la eficiencia fotocatalítica, mediante ensayos de laboratorio (con previa extracción de testigos), o mediante mediciones “in situ”

**b) En frío**, sobre pavimentos existentes, respetando los tiempos de secado del producto antes de la nueva puesta en servicio. Es aconsejable realizar la aplicación por la noche, con objeto de evitar afecciones al tráfico y a los usuarios.

1. Limpieza de la superficie de la rodadura o acera existente (con agua a presión, aire comprimido, barrido,...)
2. Pulverización del spray fotocatalítico sobre la rodadura o acera existente, mediante maquinaria patentada preferiblemente, que lo fabrica (micro-emulsión) y lo extiende. La formulación y la dotación del spray varía en función del tipo de soporte de aplicación.
3. Proceso de curado del producto pulverizado (alrededor de 2 horas), antes de la re-apertura al tráfico

### 3. CONTROL DE CALIDAD

El fabricante deberá presentar certificado de haber efectuado en un Laboratorio Oficial ensayos de eficiencia fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno, según Norma ISO 22197-1. Adicionalmente, se valorará la acreditación de la actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno, según la Norma UNI 11247-2010, o la acreditación del Ensayo Escala 1:1 con la Cámara Euphore de la Fundación CEAM.

Por otra parte, será obligatorio realizar tests de elución de nitratos y nitritos, después del ensayo de determinación de la eficiencia fotocatalítica del producto, según Norma ISO 22197-1.

Una vez terminadas las obras de pavimentación, se tomarán testigos del material constituyente de la superficie de rodadura, según su caso, mediante equipo mecánico a rotación, con broca de 100 mm de diámetro útil, de manera que se verifiquen los siguientes parámetros:

- Ensayos de eficiencia fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno, según Norma ISO 22197-1
- Ensayos de eficiencia fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno, según la Norma UNI 11247-2010.

Adicionalmente se realizarán los siguientes ensayos sobre la superficie de rodadura final:

- Ensayos de control de eficiencia fotocatalítica “in situ”
- Ensayos “in situ” de determinación de la textura por el método del círculo de la arena, según la NLT-335 (antes y después de aplicación)
- Determinación del coeficiente de rozamiento transversal, según la NLT-336. (antes y después de aplicación)

El tamaño de los lotes de cara a determinar la frecuencia de ensayo, quedará a juicio del Director de las obras, aunque se recomienda que se realice un ensayo “in situ” o extracción de testigos cada 350 m<sup>2</sup> de superficie pulverizada con spray fotocatalítico.

### **3.1. Criterios de Aceptación y rechazo**

Caso de que alguno de los ensayos de control de calidad, durante las obras no se ajuste a los requerimientos del presente Artículo, las actuaciones a llevar a cabo, quedarán a juicio del Director de las Obras.

### **4. MEDICIÓN Y ABONO**

\* m<sup>2</sup> capa de rodadura pulverizada con spray fotocatalítico. El precio incluye todos los materiales, mano de obra, maquinaria, transporte, medios materiales y auxiliares necesarios, así como todas las operaciones de fabricación y puesta en obra, los barridos y las reparaciones de irregularidades superiores a las tolerables y los trabajos de preparación de la superficie existente.

La medición en metros cuadrados se obtendrá multiplicando los anchos de la capa de rodadura realmente construida de acuerdo con los planos especificados en el Proyecto, por la longitud que figura en los susodichos planos, o la medición deducida de los ensayos de control.

## LOSAS PARA PAVIMENTACIÓN DE ACERAS

### 1. DEFINICIÓN Y CONDICIONES GENERALES.

#### 1.1. Definición

Se trata de un pavimento, normalmente de aceras peatonales, a partir de losas de hormigón descontaminante, de medidas y color a definir, que dota a la superficie exterior de un área ecoeficiente capaz de reducir las concentraciones de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos orgánicos en el aire provocados básicamente por los tubos de escape de los vehículos.

Esta solución que reduce la contaminación del aire mediante un agente descontaminante por fotocatalisis (Dióxido de titanio en forma anatasa). Bajo los efectos de la luz del sol, provoca una descomposición de los óxidos contaminantes (NOx) en subproductos que se evacúan por las aguas pluviales.

La propiedad fotocatalítica de estas losas (por la aportación de luz solar) provoca también un efecto autolimpiante de sustancias orgánicas y le confiere a la superficie propiedades biocidas.

#### 1.2. Condiciones generales

Podrán a tal fin emplearse losas de hormigón descontaminantes de los tipos señalados en los planos o cualesquiera otros que cumplan las condiciones señaladas y no presenten contraindicaciones por dimensiones o cualquier otra característica opuesta a lo expresado en los planos, contando en todo caso con el visto bueno de la Dirección de Obra.

### 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PRODUCTO

Las losas deberán cumplir las siguientes especificaciones técnicas de producto:

- Tolerancias dimensionales, longitud  $\pm 2\text{mm}$ , anchura  $\pm 2\text{mm}$  y espesor  $\pm 3\text{mm}$  conforme al marcado P, según Norma UNE- EN 1339:2004
- Diferencia máxima entre las dos diagonales de  $\pm 3\text{mm}$  conforme al marcado K, según la Norma UNE- EN 1339:2004
- Tolerancias de planeidad y curvatura: convexidad máxima 4.0mm y concavidad máxima 2.5mm, según la Norma UNE- EN 1339:2004
- Absorción de agua  $\leq 6\%$  conforme a la clase 2, según la norma UNE- EN 1339
- Resistencia a la flexión media  $\geq 5\text{ Mpa}$  conforme el marcado U, según la Norma UNE- EN 1339:2004
- La carga de rotura media  $\geq 14\text{kN}$  conforme el marcado 14, según la Norma UNE- EN 1339:2004
- Resistencia al desgaste por abrasión determinado mediante el ensayo de disco ancho  $\leq 20\text{mm}$  conforme al marcado I, según la Norma UNE- EN 1339:2004
- Resistencia al deslizamiento con un valor  $\geq 45\text{ USRV}$ , según la Norma UNE-EN 1339:2004
- Porcentaje de reducción de concentración de NOx  $> 8\%$  según la Norma UNE-ISO 22197-1:2007.

Otras características:

- Si se aditiva este producto con pigmentos para dar otra coloración al producto, se deberá asegurar una coloración estable en el tiempo.
- Normalmente se recomienda el uso de árido granítico en la fabricación de la losa.
- Puede contener un 15% de áridos reciclados procedentes de la construcción y demolición.

Las losas descontaminantes habrán de acreditar la realización del ensayo de determinación de actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno (Los resultados de este ensayo se presentarán en cantidades (micromoles) de NO y NOx eliminados y de NO<sub>2</sub> formado) y test de elución de nitratos y nitritos (mg/l eludidos), según Norma ISO 22197-1. Adicionalmente, se valorará la acreditación de la actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno (Los resultados de este ensayo se presentarán en porcentaje de concentraciones de NOx eliminados), según la Norma UNI 11247-2010, o la acreditación del Ensayo Escala 1:1 con la Cámara Euphore de la Fundación CEAM.

Las losas deberán cumplir las anteriores especificaciones técnicas de producto, incluyendo las de capacidad descontaminante de concentraciones de NOx durante su suministro en obra y una vez instaladas.

### 3. CONDICIONES DEL PROCESO DE EJECUCIÓN

En el substrato de tierra natural previamente compactado se elaborará una base de hormigón H200 de 18 cm. de espesor convenientemente nivelada. Sobre esta base se colocan las losas previamente pintadas en su parte posterior con una mezcla de cemento y agua para mejorar la adherencia.

Se presionará pieza a pieza sobre un mortero de agarre de dosificación mínima de 380 Kg./m<sup>3</sup> (1/4) con un espesor máximo de 4 cm.

Es inaceptable mortero de consistencia seca. Es importante que se emplee un mortero de consistencia blanda con cono de Abrams 4-6.

La losa deberá apoyarse totalmente sobre la base de mortero a fin de evitar roturas de las piezas cuando soporten carga. Las juntas se llenarán posteriormente con arena fina por sucesivos barridos de superficie.

Se evitará el paso de personal durante los siguientes días y de maquinaria durante las tres semanas posteriores, una vez haya transcurrido el tiempo correspondiente de endurecimiento del mortero. No se efectuaran bajo ningún concepto rejuntados mediante lechada de cemento que deformaría su aspecto y textura.

### 4. CONTROL DE CALIDAD

Los controles de calidad deberán cumplir los parámetros de la Norma ISO 9001:2008. La calidad del producto se deberá asegurar, primeramente, a través de los certificados de calidad, aceptación o análisis de las materias primas por parte de los proveedores.

El control estricto en la fase de producción respecto al aspecto visual y las tolerancias dimensionales.

El control de la pieza acabada en el laboratorio propio según las especificaciones de la Norma UNE-EN 1339:2004.

Se realizan ensayos de lote y se verifican que cumplen con las especificaciones técnicas conforme a la Norma UNE- EN 1339 :2004:

- Aspectos visuales.
- Tolerancias dimensionales
- Diferencia máxima entre las dos diagonales
- Tolerancias de planeidad y curvatura.
- Absorción de agua.
- Resistencia a la flexión media.
- La carga de rotura media.
- Resistencia al desgaste por abrasión.

Los ensayos de medida de la actividad fotocatalítica se realizarán, al menos, según el método de eliminación del óxido nítrico de la Norma UNE-ISO 22197-1.

#### **4.1. Definición de lote**

El lote mínimo estará definido por cada 500 m<sup>2</sup> de producto suministrado, de manera que tanto los ensayos especificados en este apartado, como en el apartado de especificaciones técnicas deberán realizarse con una frecuencia mínima de 1 ensayo por lote, a menos que el Director de las Obras indique lo contrario.

Comentarios finales:

- Los ensayos de resistencia química, mecánica y fotocatalítica se realizarán en laboratorio, sobre producto suministrado pero no instalado. Se realizarán previamente a la certificación de fin de obra.

#### **4.2. Criterios de Aceptación y rechazo**

Caso de que alguno de los ensayos de control de calidad, durante las obras no se ajuste a los requerimientos del presente Artículo, las actuaciones a llevar a cabo, quedarán a juicio del Director de las Obras.

### **5. MEDICIÓN Y ABONO**

- \* m<sup>2</sup> de pavimento de losa de hormigón descontaminante de alta calidad tipo de dimensiones 60x40x7 cm. color a definir, sin bisel y con separadores de 3 mm, fabricada con árido granítico y pigmentos en masa con alta resistencia a la climatología y a las radiaciones solares, para uso exclusivo peatonal. Incluye mano fabricación, transporte a obra, mano de obra y colocación, totalmente terminado.

## REVESTIMIENTO DE FACHADAS CON MATERIALES CERÁMICOS

### 1. DEFINICIÓN Y CONDICIONES GENERALES.

#### 1.1. Definición

El revestimiento de las fachadas se realizará con material cerámico porcelánico descontaminante, en forma de placas, dotando al edificio de una envolvente ecoeficiente capaz de reducir los gases  $\text{NO}_x$  y disminuir el  $\text{HNO}_3$  (provocadores de lluvia ácida) presentes en el aire. Se trata de un revestimiento con capacidad fotocatalítica permanente, que va a aprovechar la aportación de la luz solar para transformar las concentraciones de gases  $\text{NO}_x$  en residuos inertes como nitritos y nitratos en muy reducidas concentraciones. Este revestimiento no requiere de suministro de energía o instalación adicional para su permanente función descontaminante.

La baja necesidad de energía lumínica para el inicio de la fase activa, garantiza unos altos niveles de reacción en todas las orientaciones de las fachadas (sur, este, norte y oeste), de cara a la reducción de concentraciones de  $\text{NO}_x$ .

Su incorporación a la envolvente del edificio lo dota de una capacidad medioambiental activa, tratándose además de un elemento constructivo de bajo impacto ambiental.

Su uso como revestimiento del volumen edificatorio nos garantiza una protección frente a humedades y condiciones climatológicas adversas (baja absorción a agua, antihielo). La instalación como fachada ventilada completa una solución constructiva ecoeficiente en términos de ahorro energético. Se dota al volumen interior, de una protección y aislamiento térmico y acústico homogénea, evitando puentes térmicos.

La compacidad y resistencia de las placas cerámicas presentan, a parte de un fácil manejo e instalación, una alta versatilidad en las operaciones de corte y mecanizado (ranurado de adaptación a perfiles soporte de fachadas ventiladas).

#### 1.2. Condiciones Generales

Podrán a tal fin emplearse placas cerámicas descontaminantes de los tipos señalados en los planos o cualesquiera otros que cumplan las condiciones señaladas y no presenten contraindicaciones por dimensiones o cualquier otra característica opuesta a lo expresado en los planos, contando en todo caso con el visto bueno de la Dirección de Obra.

### 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PRODUCTO/FICHA TÉCNICA DE PRODUCTO

Las placas deberán cumplir las siguientes especificaciones técnicas de producto:

- Absorción a agua  $< 0,5\%$ , según la Norma UNE- EN -ISO 10545-3:97
- Dureza mínima al rayado en la escala de Mohs  $\geq 4$ , según la Norma UNE 67-101:1985 y UNE 67-101/1M:1992
- Resistencia a la abrasión  $\geq 4$ , según la Norma ISO 10545-3 ó UNE EN ISO 10545-7
- Resistencia a flexión  $>49 \text{ N/mm}^2$ , según la Norma UNE EN ISO 10545-4
- Determinación de la resistencia química UNE EN ISO 10545-13:98
- Determinación de la resistencia a las manchas, según la Norma UNE EN ISO-10545-14:98
- Productos limpieza GA

- Ácidos y Alcalis (baja concentración) GLA
- Ácidos y Alcalis (alta concentración) GHA
- El revestimiento compuesto por gránulos descontaminantes habrá de acreditar la realización del ensayo de determinación de actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno (Los resultados de este ensayo se presentarán en cantidades (micromoles) de NO y NOx eliminados y de NO2 formado) y test de elución de nitratos y nitritos (mg/l eludidos), según Norma ISO 22197-1. Adicionalmente, se valorará la acreditación de la actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno (Los resultados de este ensayo se presentarán en porcentaje de concentraciones de NOx eliminados), según la Norma UNI 11247-2010, o la acreditación del Ensayo Escala 1:1 con la Cámara Euphore de la Fundación CEAM.

Las placas deberán cumplir las anteriores especificaciones técnicas de producto, incluyendo las de capacidad descontaminante de concentraciones de NOx durante su suministro en obra y una vez instaladas.

### 3. CONDICIONES DEL PROCESO DE EJECUCIÓN

El producto se aplicará sobre fachadas ventiladas con subestructura de aluminio y soportes de acero inoxidable, con revestimiento de porcelánico descontaminante de formato 49,1x98,2 cm, en color a determinar por parte de la Dirección de Obra, con estructura soporte de perfilaría de aluminio (vertical o bidireccional), con sistema de fijación de la placa tipo (grapa, ranura longitudinal o taco keill a determinar por parte de la Dirección de Obra), con fijación (vista/ oculta) y placa porcelánica (sin mecanizar, mecanizada), formando cámara de aire de (6,7,8 ó 9 cm, a determinar por parte de la Dirección de Obra) y espesor total del cerramiento de [ 7,8,9 ó 10], con aislamiento a determinar por parte de la Dirección de Obra y fijación de las ménsulas a muro soporte con taco (mecánico/ químico).

Los recercados de huecos de ventanas y antepechos a realizar con materiales cerámicos igualmente.

Las placas cerámicas que se empleen mantendrán sus propiedades frente a la acción de los agentes atmosféricos y biológicos y dentro del intervalo de temperaturas a que pueda estar sometida la estructura.

Las placas llegarán a la obra en piezas de dimensiones 49,1x98,2 cm.

### 4. CONTROL DE CALIDAD

Las placas cerámicas y todos sus componentes auxiliares tendrán las dimensiones que figuren en los planos de proyecto.

El fabricante deberá presentar certificado de haber efectuado en un Laboratorio Oficial ensayos de eficiencia fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno, según Norma ISO 22197-1. Adicionalmente, se valorará la acreditación de la actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno, según la Norma UNI 11247-2010, o la acreditación del Ensayo Escala 1:1 con la Cámara Euphore de la Fundación CEAM.

Por otra parte, será obligatorio realizar tests de elución de nitratos y nitritos, después del ensayo de determinación de la eficiencia fotocatalítica del producto, según Norma ISO 22197-1.

Las placas en el momento de su colocación en obra no deberán presentar ningún indicio de suciedad, desperfecto, malformación o fisuración.

Además las placas deberán cumplir las siguientes especificaciones a nivel de control de calidad del producto:

#### **4.1. Definición de lote**

El lote mínimo será de 1 placa por cada 500 m<sup>2</sup> de revestimiento previsto a instalar.

Se realizará al menos un ensayo por lote, de acuerdo al siguiente listado para el control de calidad durante las obras:

- Determinación de la dimensiones y aspecto superficial, según la Norma UNE EN ISO-10545-2/98
- Determinación de dilatación térmica lineal, según la Norma UNE EN ISO-10545-8:97
- Determinación de dilatación por humedad, según la Norma UNE EN ISO-10545-10:97
- Resistencia a la helada, según la Norma UNE EN ISO-10545-12:97
- Absorción a agua, según la Norma UNE- EN -ISO 10545-3:97
- Dureza al rayado en la escala de Mohs, según la Norma UNE 67-101:1985 y UNE 67-101/1M:1992
- Resistencia a la abrasión, según la Norma ISO 10545-3 ó UNE EN ISO 10545-7
- Resistencia a flexión, según la Norma UNE EN ISO 10545-4
- Determinación de la resistencia química UNE EN ISO 10545-13:98
- Determinación de la resistencia a las manchas, según la Norma UNE EN ISO-10545-14:98
- Medida de la actividad fotocatalítica de materiales de construcción, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y test de elución de nitratos y nitritos, según Norma ISO 22197-1.(Opcionalmente se podría acreditar la actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno, según la Norma UNI 11247-2010)

Comentarios finales:

- Los ensayos de resistencia química, mecánica y fotocatalítica se realizarán en laboratorio, sobre producto suministrado pero no instalado. Se realizarán previamente a la certificación de fin de obra.

#### **4.2. Criterios de Aceptación y rechazo**

Caso de que alguno de los ensayos de control de calidad, durante las obras no se ajuste a los requerimientos del presente Artículo, las actuaciones a llevar a cabo, quedarán a juicio del Director de las Obras.

### **5. MEDICIÓN Y ABONO**

- \* m<sup>2</sup> de placa cerámica descontaminante, modulada en huecos, de dimensiones 49,1x98,2 cm y grapa vista, incluyendo materiales auxiliares, juntas horizontales de 4 mm y verticales de 6mm, perfilera de aluminio tipo T con ménsulas de acero inoxidable y taco mecánico a fachada soporte, instalación y colocación.
- \* PA de medios auxiliares de elevación, tipo andamios o maquinaria de elevación, remates espaciales en ventanas y antepechos.

## REVESTIMIENTO DE FACHADAS CON MORTERO FOTOCATALÍTICO

### 1. DEFINICIÓN Y CONDICIONES GENERALES.

#### 1.1. Definición

Se trata de un mortero tradicional que incorpora un fotocatalizador, dióxido de titanio, y que se encuentra dentro de la división de los morteros tradicionales que se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 998-1, que permite reducir los efectos contaminantes de las concentraciones de NOx emitidas en las zonas urbanas, por efecto del tráfico rodado.

#### 1.2. Condiciones Genrales

El mortero fotocatalítico se puede utilizar tanto en obras de rehabilitación de edificación, como para fachadas nuevas, aunque requiere de una mano de obra cualificada para su buen funcionamiento.

### 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PRODUCTO

A continuación se proceden a discriminar los dos morteros típicos de revestimiento de fachadas: el mortero de “revestimiento” y el “monocapa”

#### 2.1. Mortero de revestimiento fotocatalítico.

Mortero Blanco de Revestimiento de fachadas con propiedades fotocatalíticas y capacidad auto limpiante y descontaminante. Clasificado como GP-CSIII-W2 según UNE-EN-998-1.

De aplicación preferiblemente a máquina, el mortero de revestimiento fotocatalítico ha sido especialmente diseñado para la ejecución de revestimientos continuos de fachadas con acabado fino. El revestimiento final resulta impermeable al agua y permeable al vapor de agua.

El mortero de revestimiento fotocatalítico deberá cumplir las siguientes especificaciones técnicas:

• Agua de amasado	21%
• Consistencia	175 ± 5 mm
• Resistencia a compresión	> 3.5 N/mm <sup>2</sup>
• Retención de agua	> 90%
• Capilaridad	< 0.2 Kg/m <sup>2</sup> *min <sup>1/2</sup>
• Adherencia sobre ladrillo	< 0.3 N/mm <sup>2</sup>
• Adherencia sobre bloque de hormigón	< 0.3 N/mm <sup>2</sup>
• Granulometría	< 0.9 mm
• Consumo en seco (capa 1 cm)	14 - 15 Kg/m <sup>2</sup>
• Espesor de capa	8 - 15 mm

## 2.2. Mortero monocapa fotocatalítico

Mortero Monocapa para el Revestimiento Decorativo de fachadas con propiedades fotocatalíticas y capacidad auto limpiante y descontaminante. Clasificado como GP-CSIV-W2 según UNE-EN-998-1.

El mortero monocapa fotocatalítico deberá cumplir las siguientes especificaciones técnicas:

• Granulometría	< 1,7 mm
• Densidad aparente en polvo	1.450 kg/m <sup>3</sup>
• Densidad aparente en pasta	1.750 kg/m <sup>3</sup>
• Densidad aparente endurecido	1.550 kg/m <sup>3</sup>
• Agua de amasado	0,21
• Resistencia a compresión	> 6 N/mm <sup>2</sup>
• Adherencia sobre ladrillo	> 0,3 N/mm <sup>2</sup>
• Retracción	< 1 mm/m
• Coeficiente de capilaridad	< 0,2 kg/m <sup>2</sup> x min <sup>1/2</sup>
• Permeabilidad al vapor de agua	< 0,5
• Reacción al fuego	Euroclase A1
• Conductividad térmica	0.53-0.65 w/mk
• Consumo en seco	15-16 kg/m <sup>2</sup>
• Consistencia	175 mm
• Retención de agua	> 92 %
• Espesor de capa mínimo	8 mm
• Espesor máximo por capa	20 mm
• Rendimiento para una capa de 10 mm	13-14 kg/m <sup>2</sup>

## 3. CONDICIONES DEL PROCESO DE EJECUCIÓN

La aplicación del mortero fotocatalítico es similar a la del tradicional. Se aplica sobre soportes convencionales resistentes, limpios y sanos tales como ladrillo cerámico, bloque de cemento y enfoscados de cemento en buenas condiciones. Sobre hormigón y puntos singulares puede ser necesaria la utilización de un puente de adherencia y armado con malla.

Una vez preparado el soporte y tras un correcto replanteo de las juntas estructurales y colocación de maestras se aplicara preferiblemente el mortero mecánicamente con la ayuda de un maquina de proyección con mecanismo de doble mezclado.

El acabado final deseado: fratasado, raspado o acabado buena vista se realiza manualmente con la ayuda de herramienta de mano apropiada.

## 4. CONTROL DE CALIDAD

El fabricante deberá presentar certificado de haber efectuado en un Laboratorio Oficial ensayos de eficiencia fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno, según Norma ISO 22197-1. Adicionalmente, se valorará la acreditación de la

actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno, según la Norma UNI 11247-2010, o la acreditación del Ensayo Escala 1:1 con la Cámara Euphore de la Fundación CEAM.

Por otra parte, será obligatorio realizar tests de elución de nitratos y nitritos, después del ensayo de determinación de la eficiencia fotocatalítica del producto, según Norma ISO 22197-1.

#### **4.1. Definición de lote**

El lote mínimo estará compuesto por cada fracción de 500 m<sup>2</sup> de revestimiento previsto a instalar.

Se realizará al menos un ensayo por lote, de acuerdo al siguiente listado para el control de calidad durante las obras:

- Determinación de dilatación térmica lineal, según la Norma UNE EN ISO-10545-8:97
- Determinación de dilatación por humedad, según la Norma UNE EN ISO-10545-10:97
- Resistencia a la helada, según la Norma UNE EN ISO-10545-12:97
- Absorción a agua, según la Norma UNE- EN -ISO 10545-3:97
- Dureza al rayado en la escala de Mohs, según la Norma UNE 67-101:1985 y UNE 67-101/1M:1992
- Resistencia a la abrasión, según la Norma ISO 10545-3 ó UNE EN ISO 10545-7
- Resistencia a flexión, según la Norma UNE EN ISO 10545-4
- Determinación de la resistencia química UNE EN ISO 10545-13:98
- Determinación de la resistencia a las manchas, según la Norma UNE EN ISO-10545-14:98
- Medida de la actividad fotocatalítica de materiales de construcción, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y test de elución de nitratos y nitritos, según Norma ISO 22197-1. (Opcionalmente se podría acreditar la actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno, según la Norma UNI 11247-2010)

Comentarios finales:

- Los ensayos de resistencia química, mecánica y fotocatalítica se realizarán en laboratorio, sobre producto suministrado pero no instalado. Se realizarán previamente a la certificación de fin de obra.

#### **4.2. Criterios de Aceptación y rechazo**

Caso de que alguno de los ensayos de control de calidad, durante las obras no se ajuste a los requerimientos del presente Artículo, las actuaciones a llevar a cabo, quedarán a juicio del Director de las Obras.

#### **4. MEDICIÓN Y ABONO**

- \* m<sup>2</sup> de mortero de revestimiento fotocatalítico, incluida fabricación, transporte, instalación, mano de obra y colocación, totalmente terminado.

- \* m<sup>2</sup> de mortero monocapa fotocatalítico, incluida fabricación, transporte, instalación, mano de obra y colocación, totalmente terminado.
- \* PA de medios auxiliares de elevación, tipo andamios o maquinaria de elevación, remates espaciales en ventanas y antepechos.

## **IMPERMEABILIZACIÓN DE CUBIERTAS**

### 1. DEFINICIÓN Y CONDICIONES GENERALES.

#### 1.1. **Definición**

Se trata de láminas asfálticas de impermeabilización autoprotegidas con un gránulo formulado con dióxido de titanio (fotocatalizador) en forma de anatasa. Este fotocatalizador reduce las concentraciones de gases NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno), que se generan en el ambiente por efecto de los gases nocivos producidos por el tráfico, y participa decisivamente en la descontaminación del aire.

#### 1.2. **Condiciones Generales**

Podrán a tal fin emplearse láminas asfálticas de impermeabilización descontaminantes de los tipos señalados en los planos o cualesquiera otros que cumplan las condiciones señaladas y no presenten contraindicaciones por dimensiones o cualquier otra característica opuesta a lo expresado en los planos, contando en todo caso con el visto bueno de la Dirección de Obra.

### 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PRODUCTO/FICHA TÉCNICA DE PRODUCTO

Las láminas deberán cumplir las siguientes especificaciones técnicas de producto:

- Al igual que la gama tradicional, cualquier lámina de impermeabilización con propiedades descontaminantes ha de tener un marcado CE de conformidad con la norma UNE-EN 13707.
- La capacidad impermeabilizadora no se verá alterada por la incorporación de los gránulos con el tratamiento descontaminante.
- Lámina asfáltica estará compuesta por betún modificado con elastómeros de tipo SBS con una armadura de velo de vidrio. En la cara inferior llevará incorporado un film de plástico fusible, mientras que en la cara superior, se incorporará una autoprotección mineral con el tratamiento descontaminante.  
El producto se suministrará en obra en forma de rollos de 7 m<sup>2</sup> (1,00 x 7,00 m), con embalaje adecuado (nombre de producto, número de lote, dimensiones, marcado CE), con un gramaje de 6,2 kg/m<sup>2</sup> y un espesor de 3,8 mm
- Las características de la lámina de impermeabilización han de cumplir los siguientes requerimientos:
  - Resistencia a la tracción (LxT): 820 x 560 N/50 mm (UNE EN ISO-10545-10:97; VDF - 10 %)
  - Alargamiento (LxT): 40 x 49 % (UNE EN ISO-10545-10:97; VDF - 20 %)
  - Flexibilidad a baja temperatura: - 15°C (EN 1109)
  - Estabilidad dimensional: - 0.5 % (UNE EN ISO-10545-2:98/err:98, UNE EN ISO-10545-3:97 y UNE EN ISO-10545-4:97)

- Resistencia al punzonamiento estático (A, soporte blando): 20 kg, según la Norma UNE EN ISO-10545-9:97
  - Resistencia al impacto (B, soporte blando): 1500 mm (EN 12691)
  - Resistencia a cizalla de las juntas (solape x cabeza de rollo): 600 x 900 N/50 mm (UNE EN ISO-10545-13:98; VDF - 15 %)
  - Estanqueidad: conforme con la norma EN 1928
- El revestimiento compuesto por gránulos descontaminantes habrá de acreditar la realización del ensayo de determinación de actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno (Los resultados de este ensayo se presentarán en cantidades (micromoles) de NO y NO<sub>x</sub> eliminados y de NO<sub>2</sub> formado) y test de elución de nitratos y nitritos (mg/l eludidos), según Norma ISO 22197-1. Adicionalmente, se valorará la acreditación de la actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno (Los resultados de este ensayo se presentarán en porcentaje de concentraciones de NO<sub>x</sub> eliminados), según la Norma UNI 11247-2010, o la acreditación del Ensayo Escala 1:1 con la Cámara Euphore de la Fundación CEAM.

Las láminas deberán cumplir las anteriores especificaciones técnicas de producto, incluyendo las de capacidad descontaminante de concentraciones de NO<sub>x</sub> durante su suministro en obra y una vez instaladas.

### 3. CONDICIONES DEL PROCESO DE EJECUCIÓN

Las láminas impermeabilizantes descontaminantes estarán compuestas por los siguientes elementos:

- Una imprimación bituminosa con una dotación mínima de 350 gr/m<sup>2</sup> de betún residual
- Una barrera de vapor totalmente adherida al soporte
- Un aislamiento térmico de panel de lana de roca (M-0), de densidad 165 -175 kg/m<sup>3</sup>, sobre una capa de 60 mm de espesor, con acabado bituminoso adherido a la barrera de vapor mediante pegamento en frío, con una dotación mínima de 200 gr/m<sup>2</sup>
- Una lámina de betún elastómero SBS con armadura de poliéster de 180 g/m<sup>2</sup>, de gramaje y 6,0 kg/m<sup>2</sup> de dotación, acabada con gránulos cerámicos blanco descontaminantes en su cara exterior, totalmente adherida al aislamiento.

Los remates, entregas, juntas de dilatación, sumideros, limahoyas y esquinas, se resolverán mediante imprimación bituminosa, escuadras de refuerzo y impermeabilización vertical.

Las juntas de dilatación serán tratadas mediante la aplicación de una lámina de 5 mm de espesor sin armadura, banda de refuerzo y fuelle central especial.

Si fuera necesario la creación de pasillos para tránsito de mantenimiento, estos se ejecutarán mediante losetas rígidas de betún de dimensiones 50cm x 50cm x 6mm, adheridas con pegamento en frío con una dotación mínima de 500 g/m<sup>2</sup>.

Excepto en las zonas técnicas reservadas a la instalación eventual de paneles solares térmicos para la ACS, las cubiertas de los edificios proyectados, serán de tipo no transitables y la impermeabilización estará asegurada por un sistema de

impermeabilización monocapa autoprotectido mineral descontaminante. Para acceder a las zonas técnicas, se preverá la colocación de pasillos técnicos de tránsito especiales. Según la orientación y altura del edificio, se estima una reducción de 4 g de NO<sub>x</sub> al año por m<sup>2</sup> de cubierta. Dado que la superficie de contacto de la lámina con los rayos solares es fundamental para una eficaz reducción de concentraciones de NO<sub>x</sub>, la colocación de la lámina deberá aprovechar en todo momento el máximo de horas diarias de exposición a la luz del sol.

La pendiente mínima de la cubierta para la colocación, y correcto funcionamiento de las láminas será del 1%, las cuales se deberán apoyar sobre un soporte resistente e indeformable.

Las láminas asfálticas que se empleen mantendrán sus propiedades frente a la acción de los agentes atmosféricos y biológicos y dentro del intervalo de temperaturas a que pueda estar sometida la estructura.

#### 4. CONTROL DE CALIDAD

Las láminas asfálticas y todos sus componentes auxiliares tendrán las dimensiones que figuren en los planos de proyecto.

El fabricante deberá presentar certificado de obtención de marcado CE del producto, así como los ensayos pertinentes que establezcan el poder de reducción de concentraciones de NO<sub>x</sub>, a partir de la Norma ISO 22197-12007.

Las láminas en el momento de su colocación en obra no deberán presentar ningún indicio de suciedad, desperfecto, malformación o fisuración.

Además las placas deberán cumplir las siguientes especificaciones a nivel de control de calidad del producto:

Definición de lote

El lote mínimo estará definido por cada 500 m<sup>2</sup> de producto suministrado.

Se realizará al menos un ensayo por lote, de acuerdo al siguiente listado para el control de calidad durante las obras:

- Determinación de Longitud, anchura y rectitud, según UNE EN ISO-10545-2:98/err:98
- Determinación de Espesor y masa / superficie, según UNE EN ISO-10545-3:97
- Determinación de Estabilidad Dimensional, según UNE EN ISO-10545-4:97
- Determinación de Plegabilidad a diferentes temperaturas con UNE EN ISO-10545-8:97
- Determinación de la resistencia a carga estática con UNE EN ISO-10545-9:97
- Determinación de la tracción y alargamiento, con UNE EN ISO-10545-10:97
- Determinación de resistencia al desgarro con UNE EN ISO-10545-12:97
- Determinación de resistencia a la cizalla de la soldadura UNE EN ISO-10545-13:98
- Medida de la actividad fotocatalítica de materiales de construcción, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y test de elución de nitratos y nitritos, según Norma ISO 22197-1.(Opcionalmente se podría acreditar la actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno, según la Norma UNI 11247-2010)

Comentarios finales:

- Los ensayos de resistencia química, mecánica y fotocatalítica se realizarán en laboratorio, sobre producto suministrado pero no instalado. Se realizarán previamente a la certificación de fin de obra.

#### **4.1. Criterios de Aceptación y rechazo**

Caso de que alguno de los ensayos de control de calidad, durante las obras no se ajuste a los requerimientos del presente Artículo, las actuaciones a llevar a cabo, quedarán a juicio del Director de las Obras.

#### **5. MEDICIÓN Y ABONO**

- \* m<sup>2</sup> de lámina asfáltica impermeabilizante y descontaminante, incluyendo imprimación bituminosa, barrera de vapor, aislamiento térmico sobre capa con acabado bituminoso, lámina de betún elastomérico con armadura de poliéster y acabada con gránulos cerámicos descontaminantes, remates, en paramentos verticales con aplicación de una imprimación bituminosa y escuadra de refuerzo, así como protección de los remates. Incluye colocación totalmente terminada.
- \* ml de tratamiento de junta de dilataciónalzada mediante aplicación de una lámina de 5 mm de espesor sin armadura, banda de refuerzo y fuelle central, totalmente colocada y terminada.
- \* ml de colocación de pasillos para tránsito de mantenimiento mediante losetas rígidas de betún, incluso pegamento de adherencia en frío, totalmente terminada.

## **PINTURAS EN POLVO FOTOCATALÍTICAS PARA ENVOLVENTES METÁLICAS DE EDIFICACIÓN**

### **1. DEFINICIÓN Y CONDICIONES GENERALES.**

#### **1.1. Definición**

El revestimiento en polvo fotocatalítico aplicado sobre cualquier envoltente metálica como chapas perforadas, metal expandido... confieren al edificio una envoltente ecoeficiente capaz de absorber y reducir los gases  $\text{NO}_x$  y disminuir el  $\text{HNO}_3$  (provocadores de lluvia ácida) presentes en el aire. El revestimiento aprovecha la aportación de la luz solar para transformar las concentraciones de gases  $\text{NO}_x$  en residuos inertes como nitritos y nitratos, incluso a intensidades lumínicas de 1W por metro cuadrado.

Su incorporación a la envoltente del edificio lo dota de una capacidad medioambiental activa.

#### **1.2. Condiciones Generales**

Podrán a tal fin emplearse pinturas en polvo fotocatalíticas en todos los elementos del proyecto cumplan las condiciones señaladas y no presenten contraindicaciones por cualquier otra característica opuesta a lo expresado en los planos, contando en todo caso con el visto bueno de la Dirección de Obra.

### **2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PRODUCTO**

Las pinturas en polvo deberán cumplir las siguientes especificaciones técnicas de producto:

- Recubrimiento poliéster para exterior.
- Actividad fotocatalítica > 10 años
- Espesor mínimo de las películas (ISO 2360) >100 micras
- Impacto directo e indirecto 12,5 mm (ISO 6272) >30
- Adherencia cuadrangular (ISO 2409) = 0
- Dureza Persoz (ISO 1522) > 200
- Embutición Erichsen (ISO 1520) > 7
- Doblado cilíndrico (ISO 1519) > 6
- El recubrimiento deberá poder acreditar su actividad a baja intensidad lumínica (1W) para garantizar la actividad fotocatalítica de aquellas zonas donde la incidencia solar no es directa.
- El recubrimiento deberá de acreditar la realización del ensayo de determinación de actividad fotocatalítica según norma ISO 22197-1:2007 a diferentes humedades relativas 5%, 25%, 50% y 75%. (Los resultados de este ensayo se presentarán en porcentaje de eliminación de  $\text{NO}_x$ , ppm y  $\text{mg/h} \times \text{m}^2$ ).
- Resistencia a atmósferas húmedas conteniendo dióxido de azufre UNE-EN ISO 3231:1998
- Resistencia a la niebla salina UNE-EN ISO 9227:2007
- Envejecimiento artificial y exposición a radiación artificial. 1.000 horas de exposición a la radiación filtrada de una lámpara de arco de xénon UN E-EN ISO 11341:2005.
- Resistencia al mortero UNE-EN 12206-1:2005 (Aptdo. 5.9)

- Resistencia al agua hirviendo.
- Resistencia a la humedad en atmósfera constante UNE-EN ISO 6270-2:2006.

Adicionalmente, se valorará la acreditación de la actividad fotocatalítica según la Norma UNI 11247-2010 “Determinación de la degradación de los óxidos de nitrógeno en el aire por medio de materiales inorgánicos fotocatalítico: método de prueba en flujo continuo” y los ensayos de larga duración a concentraciones de NOx de 6ppm para determinar el envenenamiento del material. También se valorará el Análisis del Ciclo de Vida del producto respecto a la metodología del EcoIndicador 99.

### 3. CONDICIONES DEL PROCESO DE EJECUCIÓN

La pintura en polvo fotocatalítica se aplicará sobre una base blanca, siendo recomendable sobre una pintura en polvo blanca.

Los procesos, principales o accesorios, correspondientes a la extrusión y lacado del aluminio deben de ejecutarse de conformidad con los procedimientos establecidos por QUALICOAT o GSB.

### 4. CONTROL DE CALIDAD

El fabricante deberá presentar certificado de haber efectuado los ensayos de fotocatalisis a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno, según Norma ISO 22197-1:2007. Adicionalmente, se valorará la acreditación de la actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno, según la Norma UNI 11247-2010.

Además las elementos pintados deberán cumplir las siguientes especificaciones a nivel de control de calidad del producto:

#### 4.1. **Definición de lote**

El lote mínimo será de 1 placa por cada 500 m<sup>2</sup> de envolvente prevista a instalar.

Se realizará al menos un ensayo por lote, de acuerdo al siguiente listado para el control de calidad durante las obras:

- Recubrimiento poliéster para exterior.
- Espesor mínimo de las películas de 100 micras ISO 2360.
- Impacto directo e indirecto 12,5 mm, según Norma ISO 6272.
- Adherencia cuadrangular, según Norma ISO 2409.
- Dureza Persoz, según Norma ISO 1522.
- Embutición Erichsen, según Norma ISO 1520.
- Doblado cilíndrico, según Norma ISO 1519.
- Medida de la actividad fotocatalítica de materiales de construcción, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y test de elución de nitratos y nitritos, según Norma ISO 22197-1.(Opcionalmente se podría acreditar la actividad fotocatalítica, a través del método de degradación del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno, según la Norma UNI 11247-2010)

Comentarios finales:

- Los ensayos de resistencia química, mecánica y fotocatalítica se realizarán en laboratorio, sobre producto suministrado pero no instalado. Se realizarán previamente a la certificación de fin de obra.

#### **4.2. Criterios de Aceptación y rechazo**

Caso de que alguno de los ensayos de control de calidad, durante las obras no se ajuste a los requerimientos del presente Artículo, las actuaciones a llevar a cabo, quedarán a juicio del Director de las Obras.

#### **5. MEDICIÓN Y ABONO**

- \* m<sup>2</sup> de envolvente metálica descontaminante, con soporte de anclaje, instalación y colocación, totalmente terminada.
- \* PA Medios auxiliares de elevación, tipo andamios o maquinaria de elevación, remates espaciales en ventanas y antepechos.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Adamson, I.Y.R., Prieditis, H., Vincent, R. (1999). Pulmonary Toxicity of an Atmospheric Particulate Sample Is Due to the Soluble Fraction. *Toxicology and Applied Pharmacology* 157, 43–50
- Adamson, I.Y.R., Vincent, R., Bjarnason, S.G. (1999). Cell Injury and Interstitial Inflammation in Rat Lung after Inhalation of Ozone and Urban Particulates. *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.* 20(5) 1067-1072
- Adamson, I.Y.R., Prieditis, H., Hedgecock, C., Vincent, R. (2000). Zinc Is the Toxic Factor in the Lung Response to an Atmospheric Particulate Sample. *Toxicology and Applied Pharmacology* 166, (2) 111–119
- Agencia Europea de Medio Ambiente, AEMA (European Environmental Agency). [www.eea.europa.eu/es](http://www.eea.europa.eu/es)
- Almazán, D., Rovito, G. (2012). Evaluación del Comportamiento de los Pavimentos Descontaminantes. Jornadas Nacionales de ASEFMA en Madrid
- Asociación Ibérica de Fotocatálisis, AIF. [www.fotocatalisis.org](http://www.fotocatalisis.org)
- Baena, J.M., Lesueur, D., Rousseau, P. (2009). Carreteras descontaminantes: El firme NOXER de Madrid (IV Jornadas Nacionales de ASEFMA)
- Bailey, C. (2003). Modeling Mobile Source Air Toxics Hot Spots. U.S. EPA Office of Transportation and Air Quality. Air Toxics Center, s/a
- Ballari, M.M., Hunger, M., Hüsken, G., Brouwers, H.J.H. (2010). Modelling and experimental study of the NO<sub>x</sub> photocatalytic degradation employing concrete pavement with titanium dioxide. *Catalysis Today* 151, 71–76
- Benson, P.E. (1989). CALINE 4: A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels near Highways and Arterial Streets. Office of Transportation Laboratory. California Department of Transportation (Report No. FHWA/CA/TL-79/23). (<http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion> prefrec.htm#rec, octubre 2012)
- Broekhuizen, P., Broekhuizen, F., Cornelissen, R., Reijnders, L. (2011). Use of nanomaterials in the European construction industry and some occupational health aspects thereof. *J. Nanopart. Res.* doi: 10.1007/s11051-010-0195-9
- Brouwer, D., Duuren-Stuurman, B., Berges, M., Jankowska, E., Bard, D., Mark, D. (2009). From workplace air measurement results toward estimates of exposure? Development of a strategy to assess exposure to manufactured nano-objects. *J. Nanopart. Res.* 11, 1867-1881.
- Carp, O., Huisman, C.L., Reller, A. (2004). *Progress in Solid State Chemistry* 32, 33–177
- CARTIF. [www.cartif.com](http://www.cartif.com) (octubre 2012)
- Cassar, L., Pepe, C., Tognon, G., Guerrini, G.L., Amadelli, R. (2003). 11th Congress on the chemistry of cement (ICCC) Vol. IV (Durban, South Africa) p. 2012
- Cefic 2012. Responsible Production and Use of Nanomaterials: Implementing Responsible Care 2nd Edition. 17th January 2012

- Chen, J., Poon, C. (2009). Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. *Build. Environ.* 44(9),1899–1906
- Chen, J., Kou, S., Poon, C. (2011). Photocatalytic cement-based materials: Comparison of nitrogen oxides and toluene removal potentials and evaluation of self-cleaning performance. *Building and Environ.* 46, 1827-1833
- Commission Recommendation 2011. Official Journal of the European Union, 20.10.2011. 2011/696/EU, 18 October 2011
- Cristal Global. [www.cristalblogal.com](http://www.cristalblogal.com) (octubre 2012)
- Dalton, J.S., Janes, P.A., Jones, N.G., Nicholson, J.A., Hallam, K.R., Allen, G.C. (2002). Photocatalytic oxidation of NO<sub>x</sub> gases using TiO<sub>2</sub>: a surface spectroscopic approach. *Environmental Pollution* 120, 415–422
- Delgado, G.C. (2010). Economics and governance of nanomaterials: potential and risks. *Technology in Society* 32, 137-144
- DGT, Dirección General de Tráfico. [www.dgt.es](http://www.dgt.es) (octubre 2012)
- Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa
- Dye, J. A., Lehmann, J.R., McGee, J.K., Winsett, D.W., Ledbetter, A.D., Everitt, J.I., Ghio, A.J., Costa, D.L. (2001). Acute pulmonary toxicity of particulate matter filter extracts in rats: Coherence with epidemiologic studies in Utah valley residents. *Environmental health perspectives* 109(3), 395-403
- Dylla, H., Hassan, M. M., Mohammad, L. N., Rupnow, T., Wright, E. (2010). Evaluation of the durability of titanium dioxide photocatalyst coating for concrete pavement. *Journal of the Transportation Research Board*, 2164, 46-51
- Dylla, H., Hassan, M.H. (2012). Characterization of nanoparticles released during construction of photocatalytic pavements using engineered nanoparticles. *J. Nanopart. Res.* 14, 825-840
- EASHW 2012. European Agency for Safety and Health at Work (2012). Risk Perception and risk communication with regard to nanomaterials in the workplace. European Risk Observatory. doi: 10.2802/93075
- ECHA. European Chemicals Agency. <http://echa.europa.eu/chemicals-in-our-life/nanomaterials>
- EU nanotechnology. <http://ec.europa.eu/nanotechnology/index.en.html>
- Faraldos, M., Kropp, R., M. A. Anderson, M.A., K. Sobolev, K. (2012). Photocatalytic Hydrophobic Concrete Coatings to Combat Air Pollution. *Chemical Engineering Journal* (en prensa)
- Farre, M., Sanchis, J., Barcelo, D. (2011). Analysis and assessment of the occurrence, the fate and the behavior of nanomaterials in the environment. *Trends Anl. Chem.* 30(3) 517-527
- Ghio, A.J., Devlin, R.B. (2001) Inflammatory Lung Injury after Bronchial Instillation of Air Pollution Particles. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 164(4) 704-708

- Gomez-Moreno, F.J., Pujadas, M., Artiñano, B., Moreno, N., Alastuey, A., Querol, X. (2004). Measurement of particulate matter emitted during bulk handling activities in a harbour area in Spain. *Journal of Aerosol Science* 35(S2) S1001-S1002
- Guo, S., Wu, Z., Zhao, W. (2009). TiO<sub>2</sub>-based building materials: above and beyond traditional applications. *Chin. Sci. Bull.* 54(7), 1137–1142
- Hoerr, R.A., Gupta, A., Matuszewski, M.J. (2009) Developing practices for safe handling of nanoparticles and nanomaterials in a development state enterprise: a practical guide for research and development organizations. *Safety Nanopart. Nanostruct. Sci. Technol.* doi: 10.1007/978-0-387-78608-71
- Howard, A. Foster, H.A., Ditta, I.B., Varghese, S. (2011). Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 90, 1847-1868
- <http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/index.htm#denifition>
- <http://www.nanocare-ag.com/> (Octubre 2012)
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Titanium Dioxide. (2010) Vol. 93. Lyon (France). World Health Organization and International Agency for Research on Cancer
- Instituto de la Construcción, AIDICO. [www.aidico.es](http://www.aidico.es) (Octubre 2012)
- International Organization for Standardization, ISO. <http://www.iso.org/iso/home.html> (octubre 2012)
- ISO 22197-1/2007: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials - Part 1: Removal of nitric oxide.
- Italcementi, 2012.  
[http://www.fym.es/NR/rdonlyres/07346164-818E-401D-8353-5A036C110251/0/2012\\_catalogoTXActive.pdf](http://www.fym.es/NR/rdonlyres/07346164-818E-401D-8353-5A036C110251/0/2012_catalogoTXActive.pdf);  
[http://www.italcementigroup.com/NR/rdonlyres/B5F973F4-8D01-4796-ACEC-1A960C71092E/0/QA\\_UK.pdf](http://www.italcementigroup.com/NR/rdonlyres/B5F973F4-8D01-4796-ACEC-1A960C71092E/0/QA_UK.pdf);  
[http://www.fym.es/NR/rdonlyres/F3EA7D1A-EED0-499E-B9F0-96D16814C735/0/Productos\\_DossierTXActive.pdf](http://www.fym.es/NR/rdonlyres/F3EA7D1A-EED0-499E-B9F0-96D16814C735/0/Productos_DossierTXActive.pdf);  
<http://www.italcementigroup.com/NR/rdonlyres/1F30E487-C0A2-4D6F-AB6D-C14555FD866F/0/Scientificresults.pdf> (Octubre 2012)
- JCR 2012. JCR Reference Reports. Linsinger, T.P.J., Roebben, G., Gilliland, D., Calzolari, L., Rossi, F., Gibson, N., Klein, C. Requirements on measurements for the implementation of the European Commission definition of the term “nanomaterial”. (2012). doi: 10.2787/63490
- Lawryk, N.J., Wiesel, C.P. (1996). *Environ. Sci. Technol.* 30, 810
- Lee, J., Mahendra, S., Alvarez, P.J.J. (2009). Potential environmental and human health impacts of nanomaterials used in the construction industry. *Nanotechnol. Constr.* 3. doi: 10.1007/978-3-642-00980-8\_1
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- Maury, M.A., De Belie, N. (2010). State of the art of TiO<sub>2</sub> containing cementitious

materials: self-cleaning properties. *Mater. Construcc.*, 60(298) 33-50

- Mauzerall, D.L., Wang, X. (2004). Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and South Korea: 1990 and 2020. *Atmospheric Environment* 38(26) 4383-4402
- Mills, A.; Hill, C.; Robertson, P.K.J. (2012) Overview of the current ISO tests for photocatalytic materials. *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry*, Volume 237, 7-23
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Magrama. <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/default.aspx>
- Obee, .T.N., Brown, R.T. (1995). *Environ. Sci. Technol.* 29, 1223
- Ohtani, B. (2011). Photocatalysis by inorganic solid materials: revisiting its definition, concepts, and experimental procedures. *Inorganic Photochemistry*, 63. ISSN 0898-8838 / doi: 10.1016/B978-0-12-385904-4.00001-9
- Olabarrieta, J., Zorita, S., Peña, I., Rioja, N., Monzón, O., Benguria, P., Scifo, L. (2012). Aging of photocatalytic coatings under a water flow: Long run performance and TiO<sub>2</sub> nanoparticles release. *Applied Catal. B: Environ.* 123-124, 182-192
- Ostiguy, C., Soucy, B., Lapointe, G., Woods, C., Ménard, L., Trottier, M. (2008). Health effects of nanoparticles, 2<sup>nd</sup> edition. Studies and research projects, report R-58
- Pal Arya, S. (1999). *Air Pollution, Meteorology and Dispersion*, Oxford University Press, USA, 03/09/1998
- Pichat, P. (2012) Solar energy conversion and photoenergy systems. Vol I- Solar Irradiation and TiO<sub>2</sub> Render Materials Self-Cleaning. <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C08/E6-106-14.pdf> (Consultado: Octubre 2012)
- Pope III, C.A., Dockery, D.W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 56, 709–742
- Proyecto PICADA. [www.picada-project.com](http://www.picada-project.com) (octubre 2012)
- Querol, X., Alatuey, A., Moreno, T., Viana, M., Casanova, J., Pérez, L., Sunyer, J., Künzly, N. (2006). Calidad del Aire Urbano, salud y Tráfico. Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera”, CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Fundación Gas Natural
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire
- Rejinders, (2009). The release of TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> nanoparticles from nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability* 94, 873-876
- Richarson, J. T. (1989). *Principles of Catalysts Development*, Ed. Plenum Press
- Sakai, N., Fujishima, A., Watanabe, T., Hashimoto, K. (2003). *J. Phys. Chem. B* 107, 1028
- Schulze, C., Kroll, A., Lehr, C.M., Schäfer, U.F., Becker, K., Schnekenburger, J., Isfort, C.S., landsiedel, R., Wohleben, W., (2008). Not ready to use overcoming pitfalls when dispersing nanoparticles in physiological media. *Nanotoxicol.* 2, 51-61

- Shen, S., Burton, M., Jobson, B., Haselbach, L. (2012). Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment. *Construct. and Building Mat.* 35, 874-883
- Som et al., Environmental and health effects of nanomaterials in nanotextiles and façade coatings. *Environment International* 37 (2011) 1131-1142
- Sun, R., Nakajima, A., Fujishima, A. A., Watanabe, T., Hashimoto, K. (2001) *J. Phys. Chem. B* 105, 1984-1990
- Tompkins, D.T., Zeltner, W. A., Lawnicki, B.J., Aderson, M.A. (2005). Evaluation of Photocatalysis for Gas-Phase Air Cleaning. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. ([www.ashrae.org](http://www.ashrae.org)) (Consultado Octubre 2012)
- Tsuji, J.S., Maynard, A.D., Howard, P.C., James, J.T., Lam, C., Warheit, D.B., Santamaria, A.B. (2006). Research strategies for safety evaluation of nanomaterials. Part IV: Risk assessment of nanoparticles. *J. Toxicol. Sci.* 89(1) 42-50
- U.S. EPA (1998). Principles of Environmental Impact Assessment Review: Appendix D: Contents of Specific Environmental Impact Assessment Tools
- UNI 11247/2010: *Determinazione dell'indice di abbattimento fotocatalitico degli ossidi di azoto in aria da parte di materiali inorganici: metodo di prova in flusso continuo*
- Vogelesang-Stoute, E.M., Popma, J.R., Aalders, M.V.C., Gaarhuis, J.M. (2010). Regulating uncertain risks of nanomaterials. *STEM-publicatie* 2010/5, ISBN: 978-90-8958-174-7. [www.evaluatiemilieuwetgeving.nl](http://www.evaluatiemilieuwetgeving.nl)
- Weir, A., Westerhoff, P., Fabricius, L. Hristovski, K., von Goetz, N. (2012). Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products. *Env. Sci. And Tech.* 46, 2242-2250
- Wiesner, M.R., Lowry, G.V., Jones, K.L., Hochella, F.M., Di Giulio, R.T., Casman, E., Bernhardt, E.S. (2009). Decreasing uncertainties in assessing environmental exposure, risk, and ecological implications of nanomaterials. *Environ. Sci. Technol.* 43(17) 6458-6462
- XP B44-011:2009-12-01: *Photocatalyse – Méthode d'essai pour l'évaluation des matériaux photocatalytiques vis-à-vis de la dégradation des NOx – Méthode à un seul passage en mode tangentiel*
- Zhang et al., (2012). The potential health risks of titania nanoparticles. *Journal of hazardous materials* 211-212, 404-413