

ASOCIACIÓN IBÉRICA DE LA FOTOCATÁLISIS



LIBRO BLANCO DE LA FOTOCATÁLISIS

Tecnología, Aplicaciones, Medición y FAQ

Coordinador: David Almazán Cruzado

A Raquel y Santiago.

Este libro, editado por la [Asociación Ibérica de la Fotocatálisis](#), entidad sin ánimo de lucro, es de **distribución gratuita**. Queda prohibida la reproducción de todo o parte de sus contenidos con propósito comercial. Los usos de reproducción no comercial deberán en todo caso contar con autorización de la Asociación, citar a la obra conjunta ([Libro Blanco de la Fotocatálisis](#)), su editor (Asociación Ibérica de la Fotocatálisis) y al autor o autores específicos de los fragmentos citados.

Diseño y Maquetación: Andrea Cuervo Carrión

ISBN: 978-84-09-22299-5
DEPÓSITO LEGAL: M-20211-2020
Primera edición, septiembre 2020



LIBRO BLANCO DE LA FOTOCATÁLISIS



ÍNDICE

AUTORES	1
SOCIOS DE AIF	4
SOCIOS INDUSTRIALES	4
SOCIOS INGENIERÍAS	5
SOCIOS CENTROS TECNOLÓGICOS	5
SOCIOS UNIVERSIDADES	5
SOCIOS INDIVIDUALES	5
PRÓLOGO	7
INTRODUCCIÓN	13
1. LA ASOCIACIÓN IBÉRICA DE LA FOTOCATÁLISIS: MISIÓN Y OBJETIVOS	17
1.1 ÁMBITO DE APLICACIÓN Y OBJETIVOS DE AIF	18
1.2 VENTAJAS DE PERTENECER A AIF Y ACTIVIDADES QUE SE ORGANIZAN	19
2. PANORAMA DE LA CONTAMINACIÓN	20
2.1 INTRODUCCIÓN	20
2.2 CONTAMINACIÓN EXTERIOR	21
2.3 CONTAMINACIÓN INTERIOR	24
3. LA FOTOCATÁLISIS Y SUS APLICACIONES	25
3.1 QUÉ ES LA FOTOCATÁLISIS: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
3.2 APLICACIONES GENERALES	26
3.3 APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN	28
3.3.1 Pavimentos	31
3.3.1.1 Pavimentos fotocatalíticos percolados	32
3.3.1.2 Tratamientos superficiales fotocatalíticos a partir de emulsiones	34
3.3.1.3 Pavimentos fotocatalíticos a partir de pinturas	36
3.3.1.4 Pavimentos de baldosas o adoquines hidráulicos fotocatalíticos prefabricados	36
3.3.1.5 Pavimentos cerámicos fotocatalíticos prefabricados	37
3.3.2 Envolventes de edificación	37
3.3.2.1 Revestimiento de fachadas con cerámicas fotocatalíticas	37
3.3.2.2 Paneles y Morteros base cemento fotocatalíticos	38
3.3.2.3 Cubiertas impermeabilizantes fotocatalíticas	38
3.3.2.4 Revestimientos con paneles de acero vitrificado fotocatalítico	39
3.3.2.5 Pinturas minerales con base silicato fotocatalíticas	40
3.3.2.6 Pinturas minerales con base cal fotocatalíticas	41

3.3.2.7 Pinturas para interiores fotocatalíticas	41
3.3.3 Otros productos	42
3.3.4 Concepto de Isla Fotocatalítica	42
4. LEGISLACIÓN SOBRE CALIDAD DEL AIRE	44
5. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA	47
5.1 NORMATIVA DE ENSAYOS DE LABORATORIO	47
5.2 NORMATIVA DE ENSAYOS “IN SITU”	51
5.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN A ESCALA REAL	51
5.4 MODELOS DE PREDICCIÓN	53
6. CASOS DE ESTUDIO	54
6.1 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS	54
6.1.1 Proyecto Villaverde	54
6.1.2 Proyecto LIGHT2CAT	55
6.1.3 Proyecto LIFE EQUINOX	57
6.1.4 Proyecto LIFE MINOX STREET	59
6.1.5 Proyecto LIFE PHOTOSCALING	64
6.1.6 Pavimentos descontaminantes: experiencias nacionales	69
6.2 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS: EXPERIENCIAS INTERNACIONALES	72
6.2.1 Aeropuerto de Malpensa (Milán)	72
6.2.2 Aparcamiento en Roskilde (Dinamarca)	75
6.2.3 Aeropuerto de Copenhague (Dinamarca)	75
6.3 CUBIERTAS FOTOCATALÍTICAS	76
6.4 TELAS DESCONTAMINANTES	77
6.5 REVESTIMIENTOS CERÁMICOS FOTOCATALÍTICOS PARA FACHADAS	78
6.6 PINTURAS FOTOCATALÍTICAS DE FACHADA DESCONTAMINANTES	81
6.7 PINTURAS FOTOCATALÍTICAS AUTOLIMPIANTES	83
6.8 PROYECTO ECO-SEE (REVESTIMIENTOS FOTOCATALÍTICOS INTERIORES)	84
7. CRITERIOS DE DISEÑO Y APLICACIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS	86
7.1 DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES. EMISIÓN E INMISIÓN	86
7.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DINÁMICA DE DISPERSIÓN	87
7.2.1 Características de las emisiones	87
7.2.2 Condiciones atmosféricas	88
7.2.3 Características topográficas y geográficas	89
7.3 DURABILIDAD DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS	90
7.3.1 Limpieza de pavimentos	91
7.3.2 Influencia de la Humedad Relativa	92
7.3.3 Abrasión superficial (Solo para pavimentos fotocatalíticos)	92

7.3.4 Luz	92
7.3.5 Color	93
7.3.6 Herramientas de ayuda a la selección de materiales fotocatalíticos	94
7.4 GUÍA DE USO DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS – FOTOAIR	94
8. AVANCES EN FOTOCATÁLISIS EN ESPAÑA DURANTE EL SIGLO XXI	101
8.1 CERTIFICADO DE EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA	102
8.2 ISLA FOTOCATALÍTICA	105
8.3 INCLUSIÓN EN PLIEGOS DE ADMINISTRACIONES PÚBLICAS	106
8.4 GRUPO DE TRABAJO CON MINISTERIO DE FOMENTO	107
9. PREGUNTAS FRECUENTES (FAQ)	108
9.1 ¿CÓMO INFLUYE LA FOTOCATÁLISIS EN LA RESISTENCIA MECÁNICA DE PAVIMENTOS?	108
9.2 ¿CÓMO INFLUYE LA FOTOCATÁLISIS EN LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE PAVIMENTOS?	108
9.3 ¿CUÁL SERÍA LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE ESTOS TRATAMIENTOS COMO ALTERNATIVA A LOS PAVIMENTOS EXISTENTES?	109
9.4 ¿CUÁL ES LA EFICACIA DESCONTAMINANTE DE LOS PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS?	110
9.5 INFLUENCIA DE POSIBLES DERRAMES DE HIDROCARBUROS	111
9.6 POTENCIAL AUTOLIMPIANTE DE PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS	111
9.7 DURACIÓN DE LA ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA	112
9.8 CONDICIONES DE MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS	112
9.9 ¿EN QUÉ RANGO DE LONGITUDES DE ONDA SE OBTIENEN LAS MEJORES EFICIENCIAS?	112
9.10 ¿SE PODRÍAN EMPLEAR REVESTIMIENTOS FOTOCATALÍTICOS EN TÚNELES?	113
9.11 INFLUENCIA DE CONDICIONES METEOROLÓGICAS, HUMEDAD, VIENTO, LUZ, ETC	113
9.12 INFLUENCIA DEL COLOR EN LA EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA	113
9.13 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA DE MEDIDA AL FOCO CONTAMINANTE	114
9.14 GENERACIÓN DE EFECTOS ADVERSOS A LA SALUD HUMANA	114
9.15 AFECCIONES DE LOS LIXIVIADOS A LAS ESTACIONES EDAR	115
9.16 DIFERENCIAS DE RESULTADOS ENTRE LABORATORIOS	116
9.17 ¿EN QUÉ MATERIA SE TRANSFORMAN LOS NOX, SOX Y COV, TRAS LA FOTOCATÁLISIS Y CÓMO SE EVACUAN/LIMPIAN?	117
9.18 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS	118
9.19 ¿SE GENERA O ₃ O PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN CON LA FOTOCATÁLISIS?	118
9.20 ¿CUÁNTO CUESTAN LOS MATERIALES FOTOCATALÍTICOS?	118
9.21 ¿DÓNDE SE PUEDEN COMPRAR ESTOS PRODUCTOS?	119
10. SEGURIDAD Y SALUD	120
10.1 FICHAS DE SEGURIDAD DE CADA PRODUCTO	120

10.2 SEGURIDAD Y SALUD DURANTE LA FABRICACIÓN Y LA APLICACIÓN	120
10.3 IMPLICACIONES EN REACH	121
11. CONCLUSIONES Y RETOS	122
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
APÉNDICE: LA FOTOCATÁLISIS FRENTE A VIRUS, BACTERIAS Y MICROORGANISMOS	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Contaminación ambiental originada por el tráfico. Fuente: DGT.	20
Figura 2: Evolución de las medias anuales de NO ₂ (2005-2016) por tipo de estación y área. Fuente: MAPAMA.	21
Figura 3: Evolución de las medias anuales de SO ₂ (2005-2016) por tipo de estación y área. Fuente: MAPAMA.	22
Figura 4: Evolución de las medias anuales de PM ₁₀ (2005-2016) por tipo de estación y área. Fuente: MAPAMA.	22
Figura 5: Evolución de las medias anuales de PM _{2,5} (2008-2016) por tipo de estación y área. Fuente: MAPAMA.	23
Figura 6: Evolución de las medias anuales de los percentiles 93,2 de O ₃ (2005-2016) por tipo de estación y área. Fuente: MAPAMA.	23
Figura 7: Esquema de funcionamiento de un material fotocatalítico en exteriores. Fuente: ICOPAL	25
Figura 8: Aplicaciones miembros AIF. Fuente: AIF.	27
Figura 9: Aplicaciones por sectores de miembros AIF. Fuente: AIF.	27
Figura 10: Imágenes de una superficie tratada con TiO ₂ en contacto con agua antes (A) y después (B) de irradiarla con luz UV.	30
Figura 11: Esquemas de aplicación y acabados de las tecnologías fotocatalíticas más habituales en la actualidad. Fuente: Politécnico de Milán	32
Figura 12: Proceso de extendido y percolación de lechada fotocatalítica sobre un pavimento drenante. Fuente: Eurovía	33
Figura 13: Percolación de lechada especial sobre la capa de mezcla bituminosa drenante. Fuente: Eurovía	33
Figura 14: Esquema de acabados antes y después de granallado. Fuente: Eurovía y Eptisa	33
Figura 15: Lechada fotocatalítica percolada en zona de cargo del Aeropuerto de Málaga. Fuente: FYM-Heidelberg Cement Group	33
Figura 16: Carril Bus (Málaga).	33
Figura 17: Descripción y ejecución de técnica de pulverización sobre	34
Figura 18: Esquema de acabado del tratamiento superficial a partir de micro-emulsión fotocatalítica, antes y después de la apertura al tráfico. Fuente: Impresa Bacchi y Eptisa	34
Figura 19: Proceso de pulverización de spray fotocatalítico sobre pavimento existente (Izda.). Detalle de acabado de extendido de spray fotocatalítico en aceras en Milán (Dcha.). Fuente:	

Impresa Bacchi	35
Figura 20: Discriminación por zonas de desgaste del tratamiento superficial fotocatalítico, una vez abierto al tráfico. Fuente: Impresa Bacchi y Eptisa	35
Figura 21: Aplicación fotocatalítica sobre pavimento de adoquines y losetas hidráulicas en una calle del Ayuntamiento de Madrid. Fuente: Proquicesa	36
Figura 22: Aplicación de loseta fotocatalítica en High Line Sants, Barcelona. Fuente: Breinco	37
Figura 23: Plaza de Conresa. Mislata, Valencia. Fuente: FYM-Heidelberg Cement Group	37
Figura 24: Ejemplo de acabado de revestimiento de fachadas con materiales cerámicos fotocatalíticos en Bilbao. Fuente: Ceracasa	37
Figura 25: Ejemplo de aplicación de mortero fotocatalítico en Vodafone Village. Milán. Italia. Fuente: FYM-Heidelberg Cement Group	38
Figura 26: Palacio Expo 2015. Milán (Italia). Italia. Fuente: FYM-Heidelberg Cement Group	38
Figura 27: Ejemplo de aplicación de cubiertas de impermeabilización fotocatalíticas en edificios urbanos. Fuente BMI.	38
Figura 28: Ejemplo de posible aplicación en túneles	39
Figura 29: Ejemplo de posible aplicación en estaciones de metro	39
Figura 30: Ejemplo de posible aplicación en Terminales aeroportuarias	39
Figura 31: Fachada con pintura fotocatalítica en el Hotel Atlántico de la C/ Gran Vía de Madrid. Fuente: KEIM	40
Figura 32: Fachada con pintura fotocatalítica en el Edificio santa Lucía. Sevilla (España). Fuente: KEIM	40
Figura 33: Fachada con pintura fotocatalítica en Ingeniero La Cierva. Cádiz (España). Fuente: KEIM	40
Figura 34: Fachada del Pabellón Antonio García Martínez en Mairena del Alcor. Sevilla. Fuente: Graphenstone	41
Figura 35: Pintura de interior en guardería.	41
Figura 36: Pintura de interior en gimnasio. Fuente: Levenger	41
Figura 37: Pintura fotocatalítica sobre monumentos históricos (izda) en comparación con otro sin tratar (dcha). Fuente: Levenger	42
Figura 38: Simulación de aplicación del conjunto de materiales fotocatalíticos sobre un barrio genérico de una ciudad, creando una isla fotocatalítica.	43
Figura 39: Valores Guía OMS de contaminantes ambientales, basado en efectos conocidos sobre la salud.	46
Figura 40: Comparativa de condiciones de ensayo de las Normas Francesa (XP), Italiana (UNI) e Internacional (ISO). Fuente: Eptisa-Aidico	48
Figura 41: Diploma de Certificación de Proyecto de Investigación y Desarrollo, para la realización de ensayos “in situ”, concedido a la Empresa Eptisa, Servicios de Ingeniería	51

Figura 42: Distrito de Villaverde – áreas de aplicación de los productos fotocatalíticos. Fuente: Ayto. de Madrid	54
Figura 43: Analizador automático en continuo para la determinación en el aire ambiente de óxidos de nitrógeno (NO, NO ₂ , NO _x) y de ozono (O ₃) puesto en la plaza de Ágata. Fuente: Eptisa.	55
Figura 44: Localización de la calle donde se desarrollaría el piloto a escala real. Fuente: Light2cat.	56
Figura 45: Equipo de medición de la calidad del aire en C/ Félix Pizcueta. Valencia. Fuente: Light2cat.	56
Figura 46: Suministro de baldosas prefabricadas con hormigón fotocatalítico. Fuente: Light2cat.	56
Figura 47: Resultados de lecturas de parámetros en Proyecto Light2cat	57
Figura 48: Detalle de sensor instalado en zona de aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico. Fuente: Cartif.	57
Figura 49: Codificación de muestras y aspecto. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	60
Figura 50: Reducción de NO _x , antes de envejecimiento. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	60
Figura 51: Reducción de NO _x , tras envejecimiento. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	60
Figura 52: Influencia en la sensibilidad al agua. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	60
Figura 53: Influencia en la deformación permanente. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	61
Figura 54: Influencia en el contenido de huecos. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	61
Figura 55: Influencia en el módulo de rigidez. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	61
Figura 56: Influencia en la resistencia al deslizamiento y a la macrotextura. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	62
Figura 57: Presentación de muestras ensayadas con tratamiento fotocatalítico sobre loseta hidráulica. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	62
Figura 58: Resultados de eliminación de NO _x sobre loseta hidráulica. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	62
Figura 59: Caracterización de loseta patrón (M8Cp (patrón) y M8C (material con Coverlite®). Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET	63
Figura 60: Ubicación de las estaciones de muestreo. Fuente: Breinco.	69
Figura 61: Aplicación de micro-emulsión fotocatalítica, mediante el prototipo patentado por “Impresa Bacchi”, en la Terminal 1 del Aeropuerto de Malpensa (Milán)	72
Figura 62: Estación móvil para la medida instalada en el Aeropuerto de Malpensa (Milán). Fuente: Impresa Bacchi.	73
Figura 63: Aplicación de micro-emulsión fotocatalítica en las aceras del Edificio de la Región Lombardía (Milán). Fuente: Impresa Bacchi.	73
Figura 64: Ensayo de resistencia al deslizamiento aplicado sobre las superficies de rodadura tratadas y sin tratar. Fuente: Impresa Bacchi	74
Figura 65: Curva de análisis de la resistencia al deslizamiento y eficiencia fotocatalítica de testigos	

extraídos en rodadura de tramo urbano. Fuente: Impresa Bacchi	74
Figura 66: Pavimento Fotocatalítico en Roskilde (Dinamarca). Fuente: Photocat	75
Figura 67: Panorámica de pavimento fotocatalítico en la Terminal 1 del aeropuerto de Copenhague (Dinamarca). Fuente: Photocat	75
Figura 68: Gráficas que muestran la eficiencia descontaminante (curva de color rojo) del pavimento adoquinado fotocatalítico, según la intensidad de luz y la franja horaria. Fuente: Photocat	76
Figura 69: Cubiertas impermeabilizantes fotocatalíticas en centro logístico de Amazon.	76
Figura 70: Izquierda, Imagen de cámara Euphore. Derecha, Comparativa de resultados de reducción de concentraciones de NO _x , con y sin textil fotocatalítico. Fuente: Photocitytex	78
Figura 71: Izquierda, comparativa de resultados de reducciones de NO _x , con y sin tela fotocatalítica en Túnel de la Autovía A3. Derecha, comparativa de reducciones de ozono, con y sin toldo fotocatalítico en Colegio. Fuente: Photocitytex	78
Figura 72: Análisis horario de concentraciones medias de contaminantes entre 2004 y 2009 en una calle de Valencia. Fuente: Ceracasa	79
Figura 73: Vista de la Cámara Euphore. Fuente: CEAM	79
Figura 74: Fechas, horas y ciclos de experimentación	79
Figura 75: Presentación de pinturas de fachada bajo el código de Muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET	81
Figura 76: Eliminación de NO _x . Muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET	81
Figura 77: Concentraciones de nitritos y nitratos. Muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET	82
Figura 78: Envejecimiento en cámara de envejecimiento acelerado. Muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET	82
Figura 79: Envejecimiento a la intemperie y efecto de lavados. Muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET	82
Figura 80: Presentación de pinturas para ladrillos cerámicos. Muestras 25 y 26. Fuente: LIFE MINOX STREET	83
Figura 81: Eliminación de NO _x . Muestras 25 y 26. Fuente: LIFE MINOX STREET	83
Figura 82: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.	83
Figura 83: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.	84
Figura 84: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.	84
Figura 85: Comparativa de microfotografías tomadas sobre los paneles tratados y no tratados con fotocatalisis, tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.	84
Figura 86: Comparativa de resultados de microfotografías tomadas sobre los paneles tratados y no tratados con fotocatalisis, tras 5 años de exposición a intemperie.	84

Figura 87: Influencia de la dirección del viento en los niveles de contaminación. (Italcementi. Resultados científicos. Proyecto PICADA)	88
Figura 88: Isla de calor producida en las áreas urbanas. En ausencia de lluvias y vientos da lugar a una cúpula de contaminantes.	89
Figura 89: Potenciales redox a pH 7 frente al electrodo normal de hidrógeno de las bandas de valencia (inferior) y de conducción (superior) de algunos semiconductores potencialmente utilizables como fotocatalizadores, comparados con los de algunas	93
Figura 90: Algunos ejemplos de gamas cromáticas de productos fotocatalíticos	93
Figura 91: Eliminación fotocatalítica de NOx mediante el uso de materiales fotocatalíticos. Fuente: Fotoair.	95
Figura 92: Dr. Akira Fujishima, Director del Centro Internacional de Fotocatálisis en Tokio, y el Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, David Almazán, en un Congreso de Fotocatálisis celebrado	101
Figura 93: Iglesia Dives in Misericordia. Roma (Italia), construida con elementos prefabricados de hormigón blanco con cemento fotocatalítico de Heidelberg Cement Group y cuyo arquitecto fue Richard Meier.	102
Figura 94: Resultados de ensayos realizados por EPTISA durante los años 2011 y 2013, con la Norma ISO.	102
Figura 95: Resultados de ensayos realizados por EPTISA durante los años 2011 y 2013, con la Norma UNI.	103
Figura 96: Tendencia de mejora de eficiencia de materiales fotocatalíticos entre los años 2011 y 2013, según la Norma ISO. Fuente: Laboratorio de EPTISA.	103
Figura 97: Tendencia de mejora de eficiencia de materiales fotocatalíticos entre los años 2011 y 2013,	103
Figura 98: Imagen de prototipo multiensayo.	104
Figura 99: Certificado de eficiencia de producto fotocatalítico. Fuente: AIF.	104
Figura 100: Imágenes que muestran el estado del Barrio de La Rosilla (Distrito de Vallecas. Madrid) antes y después de convertirlo en Eco-Barrio. Fuentes: Ezquiaga Arquitectura y Eptisa.	105
Figura 101: “La calidad del aire en la Escuela: Un deber de todos, una derecho de los niños”, reconoce el empleo de tecnología fotocatalítica como mejora de la calidad del aire. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente Italiano.	106
Figura 102: (Izda.) Instrucciones Técnicas para la Aplicación de Criterios de Sostenibilidad en la Contratación de Obra Pública, que incluye la aplicación de tecnología fotocatalítica en los Pliegos de Condiciones (2014) del Ayuntamiento de Barcelona. (Dcha). La nueva Guía de Contratación Pública Social, Ambiental y la Guía de Contratación Pública Innovadora (2017) del mismo Ayuntamiento.	106
Figura 103: Espectro de longitudes de onda para distintas fuentes de luz	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Compuestos fotodegradados en fase gas con materiales basados en TiO_2 . (Parcialmente adaptada de Carp y Col., 2004)	28-29-30
Tabla 2. Valores de referencia según Real Decreto 102/2011	45
Tabla 3. Norma UNE 127197-1:2013 para Clasificación de producto según el rendimiento de la purificación de aire NO_x en prefabricados de hormigón	49
Tabla 4. Resumen de Normas internacionales para evaluación de aplicaciones fotocatalíticas en exteriores e interiores	50
Tabla 5. Comparativa de reducción de NO_x	70
Tabla 6. Comparativa de reducción de Ozono	70
Tabla 7. Comparativa de reducción de SO_x	71
Tabla 8. Comparativa de reducción de CO	71
Tabla 9. Comparativa de reducción de todos los contaminantes analizados	71
Tabla 10. Comparativo de resultados de eficiencia descontaminante. Fuente: BMI	77
Tabla 11. Clasificación propuesta para la actividad fotocatalítica inicial de materiales evaluados según norma ISO	98
Apéndice - Tabla 1. Los diferentes niveles de limpieza	133

AUTORES

1. La Asociación Ibérica de la Fotocatálisis: Misión y objetivos.

Varios autores: **David Almazán** • *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX*, **Raúl Crespo** • *Vicepresidente Científico-Técnico de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y Responsable de I+D+i de FYM-HeidelbergCement Hispania*, **Fabien Remaut** • *Flat Roof Director BMI Group*, **Gemma Pagés** • *Consultora independiente, especialista en Pavimentos de Hormigón*, **Ramón Viñas** • *Vice President, Global Specialty Chemicals Industry en DKSH*

2. Panorama de la contaminación.

Varios autores: **David Almazán** • *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX*, **Fernando Fresno** • *Investigador Titular en el Instituto IMDEA Energía*, **Gianni Rovito** • *Técnico de Operación y Mantenimiento de Concesiones en Aldesa Concesiones*

3. La fotocatalisis y sus aplicaciones.

Varios autores: **David Almazán** • *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX*, **Fernando Fresno** • *Investigador Titular en el Instituto IMDEA Energía*, **Gianni Rovito** • *Técnico de Operación y Mantenimiento de Concesiones en Aldesa Concesiones*.

4. Legislación sobre calidad del aire.

Varios autores: **David Almazán** • *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX*, **Fernando Fresno** • *Investigador Titular en el Instituto IMDEA Energía*, **Gianni Rovito** • *Técnico de Operación y Mantenimiento de Concesiones en Aldesa Concesiones*.

5. Métodos de evaluación de actividad fotocatalítica.

Varios autores: **David Almazán** • *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX*, **José Feroso Domínguez** • *Investigador de Centro tecnológico CARTIF*, **Fernando Fresno** • *Investigador Titular en el Instituto IMDEA Energía*, **Gianni Rovito** • *Técnico de Operación y Mantenimiento de Concesiones en Aldesa Concesiones*.

6. Casos de estudio.

Varios autores: **David Almazán** • *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX*, **José Feroso Domínguez** • *Investigador de Centro tecnológico CARTIF (Apartado LIFE Equinox)*, **Marta Castellote** • *Investigadora Científica del Instituto*

Eduardo Torroja del CSIC (Apartado LIFE Photoscaling), Eva Jiménez · Investigadora Científica del Instituto Eduardo Torroja del CSIC (Apartado LIFE Photoscaling), Fernando Fresno · Investigador Titular en el Instituto IMDEA Energía, Gianni Rovito · Técnico de Operación y Mantenimiento de Concesiones en Aldesa Concesiones.

7. Criterios de Diseño y Aplicación de Materiales Fotocatalíticos.

Varios autores: **David Almazán** · *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX,* **José Feroso Domínguez** · *Investigador de Centro tecnológico CARTIF,* **Benigno Sánchez** · *Jefe de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado Guía de Uso de Materiales Fotocatalíticas),* **Silvia Suárez** · *Investigadora de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado Guía de Uso de Materiales Fotocatalíticas),* **Carlos Martínez** · *Investigador de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado Guía de Uso de Materiales Fotocatalíticas),* **Fernando Fresno** · *Investigador Titular en el Instituto IMDEA Energía, Gianni Rovito · Técnico de Operación y Mantenimiento de Concesiones en Aldesa Concesiones.*

8. Avances en fotocatalisis en España durante el Siglo XXI.

Varios autores: **David Almazán** · *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX,* **Gianni Rovito** · *Técnico de Operación y Mantenimiento de Concesiones en Aldesa Concesiones,* **Fabien Remaut** · *Flat Roof Director BMI Group,* **Ángel Díaz** · *Director de I+D+i en PROQUICESA,* **Santiago Ramos** · *Director de Operaciones en PROQUICESA,* **Peter Mayer** · *Departamento Técnico Pinturas KEIM,* **Gemma Pagés** · *Consultora independiente, especialista en Pavimentos de Hormigón,* **Raúl Crespo** · *Vicepresidente Científico-Técnico de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y Responsable de I+D+i de FYM-HeidelbergCement Hispania,* **José Antonio Ibáñez** · *Investigador Clúster Nanotecnología. División de Construcción en TECNALIA,* **Alicia Andreu** · *Investigadora Senior en el Área de Sostenibilidad del Instituto de Tecnología Cerámica.*

9. Preguntas Frecuentes (FAQ).

Varios autores: **David Almazán** · *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX,* **Fernando Fresno** · *Investigador Titular en el Instituto IMDEA Energía,* **José Antonio Ibáñez** · *Técnico Clúster Nanotecnología. División de Construcción en TECNALIA,* **Raúl Crespo** · *Vicepresidente Científico-Técnico de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y Responsable de I+D+i de FYM-HeidelbergCement Hispania,* **Gianni Rovito** · *Técnico de Operación y Mantenimiento de Concesiones en Aldesa Concesiones.*

10. Seguridad y Salud.

Varios autores: **David Almazán** · *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX,* **Fernando Fresno** · *Investigador Titular en el Instituto IMDEA Energía,* **Gianni Rovito** · *Técnico de Operación y Mantenimiento de Concesiones en Aldesa Concesiones*

11. Conclusiones y Retos.

Autor: **David Almazán** • *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, Director del Dpto. Ingeniería del Terreno y Pavimentos de EPTISA, Prof. MSc Ing. Caminos, Canales y Puertos en UAX.*

Apéndice

Henrik Jensen • *CTO y Co-Fundador en PHOTOCAT* y **Pernille D. Pedersen** • *Experta en Química Atmosférica y Computacional*

Colaboradores: Gonzalo García (EPTISA), Beatriz Delgado (EPTISA), Jirko Bezdicek (Levenger), Pilar Juárez (EPTISA), Estrella Sanz (EPTISA) y Miriam García (EPTISA).

SOCIOS DE AIF

SOCIOS INDUSTRIALES



SOCIOS INGENIERÍAS



SOCIOS CENTROS TECNOLÓGICOS



SOCIOS UNIVERSIDADES



Escola Universitaria de Arquitectura Técnica
UNIVERSIDADE DA CORUÑA

SOCIOS INDIVIDUALES

Mar Alcalá (*Arquitecto*)

Vasco Rodrigues (*ICCP Consultor*)

Joaquim L. Faria (*Profesor asociado Departamento Ingeniería Química de la Universidad de Oporto*)

Francisco Javier López Rivadulla (*Arquitecto de la Universidad de Coruña*)

Daniel González Muñoz (*Científico en la Universidad Autónoma de Madrid*)

Sitio Web: www.fotocatalisis.org

Contacto: contacto@fotocatalisis.org

Biblioteca multimedia: www.fotocatalisis.org/biblioteca-multimedia.html

PRÓLOGO

Akira Fujishima

Tokyo University of Science, Tokyo, Japan

Durante las últimas tres décadas, se han dedicado grandes esfuerzos a la investigación de dos campos estrechamente relacionados, la fotoelectroquímica de semiconductores y la fotocatálisis, con el objetivo de profundizar en sus conceptos fundamentales y sus aplicaciones prácticas. Los principios investigados, desarrollados y los resultados obtenidos mediante los estudios fotoelectroquímicos en el dióxido de titanio, han conducido al campo de la investigación de la fotocatálisis heterogénea, donde su gran capacidad fotooxidativa se ha aplicado a la mejora de la calidad del aire ambiental y a la depuración del agua. Además, descubrimos la capacidad superhidrofílica fotoinducida y propusimos el concepto de autolimpieza.



Hoy en día, muchos científicos y expertos están trabajando arduamente para estudiar los múltiples usos de los fotocatalizadores y sus aplicaciones, con el objetivo de hacer que nuestras vidas sean más saludables.

A continuación, me gustaría listar algunas ideas básicas de aplicaciones fotocatalíticas realizadas, agrupadas por tipo de industria o sector, que podrán encontrar en la siguiente ilustración: **“La historia del Sol y la Fotocatálisis”**. [ver páginas siguientes]

Por último, me gustaría que cada lector de este libro pensara en cómo y dónde la fotocatálisis podría emplearse en nuestra vida diaria, porque en breve se hará realidad.

EDIFICACIÓN Y ENERGÍA

- 1 CRISTALES
- 2 PIEZAS PREFABRICADAS
- 3 TOLDOS
- 4 FACHADAS
- 5 CUBIERTAS
- 6 OTROS MATERIALES/PLACAS FOTOVOLTAICAS

INDUSTRIA DE AUTOMOCIÓN

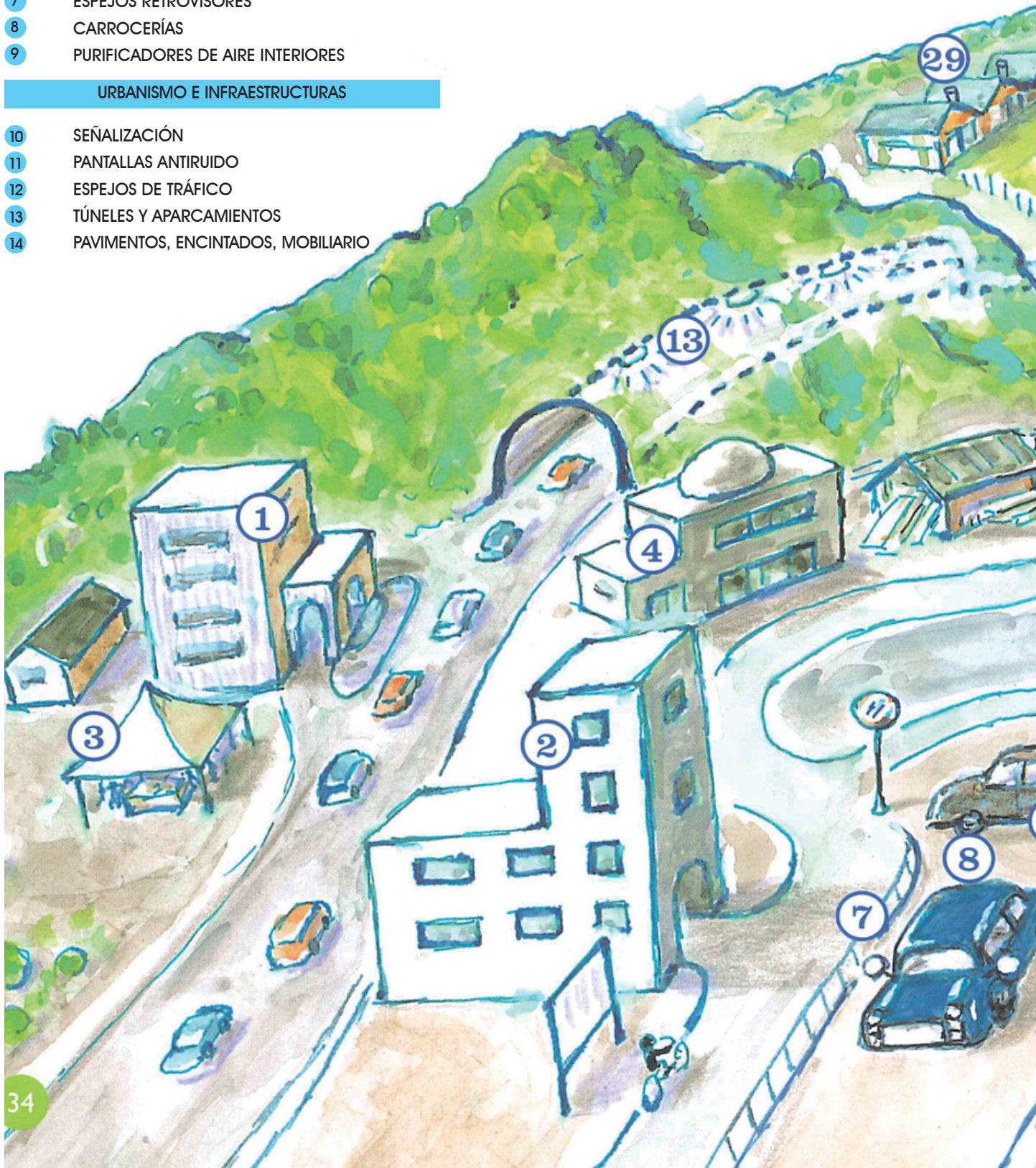
- 7 ESPEJOS RETROVISORES
- 8 CARROCERÍAS
- 9 PURIFICADORES DE AIRE INTERIORES

URBANISMO E INFRAESTRUCTURAS

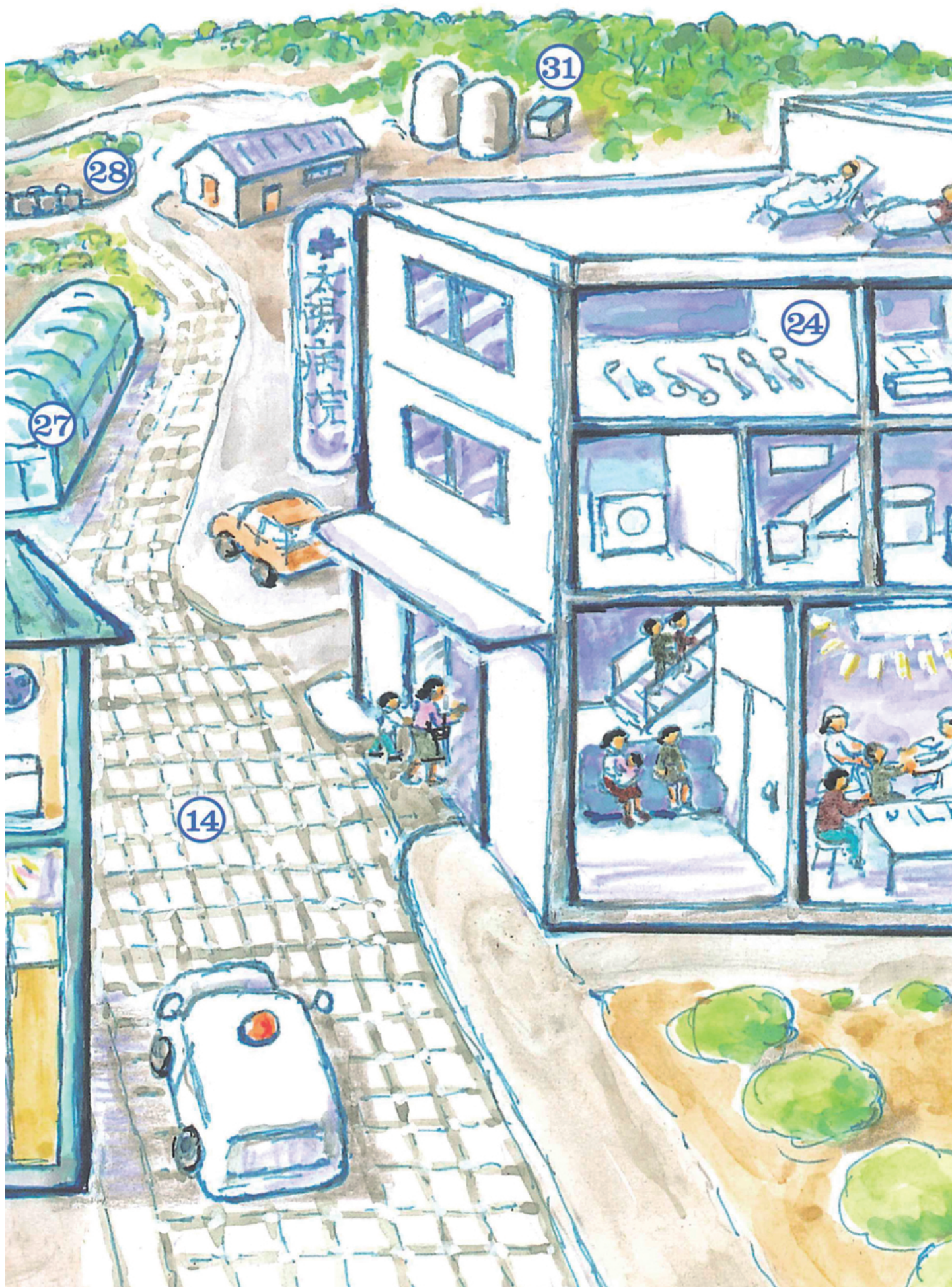
- 10 SEÑALIZACIÓN
- 11 PANTALLAS ANTIRUIDO
- 12 ESPEJOS DE TRÁFICO
- 13 TÚNELES Y APARCAMIENTOS
- 14 PAVIMENTOS, ENCINTADOS, MOBILIARIO

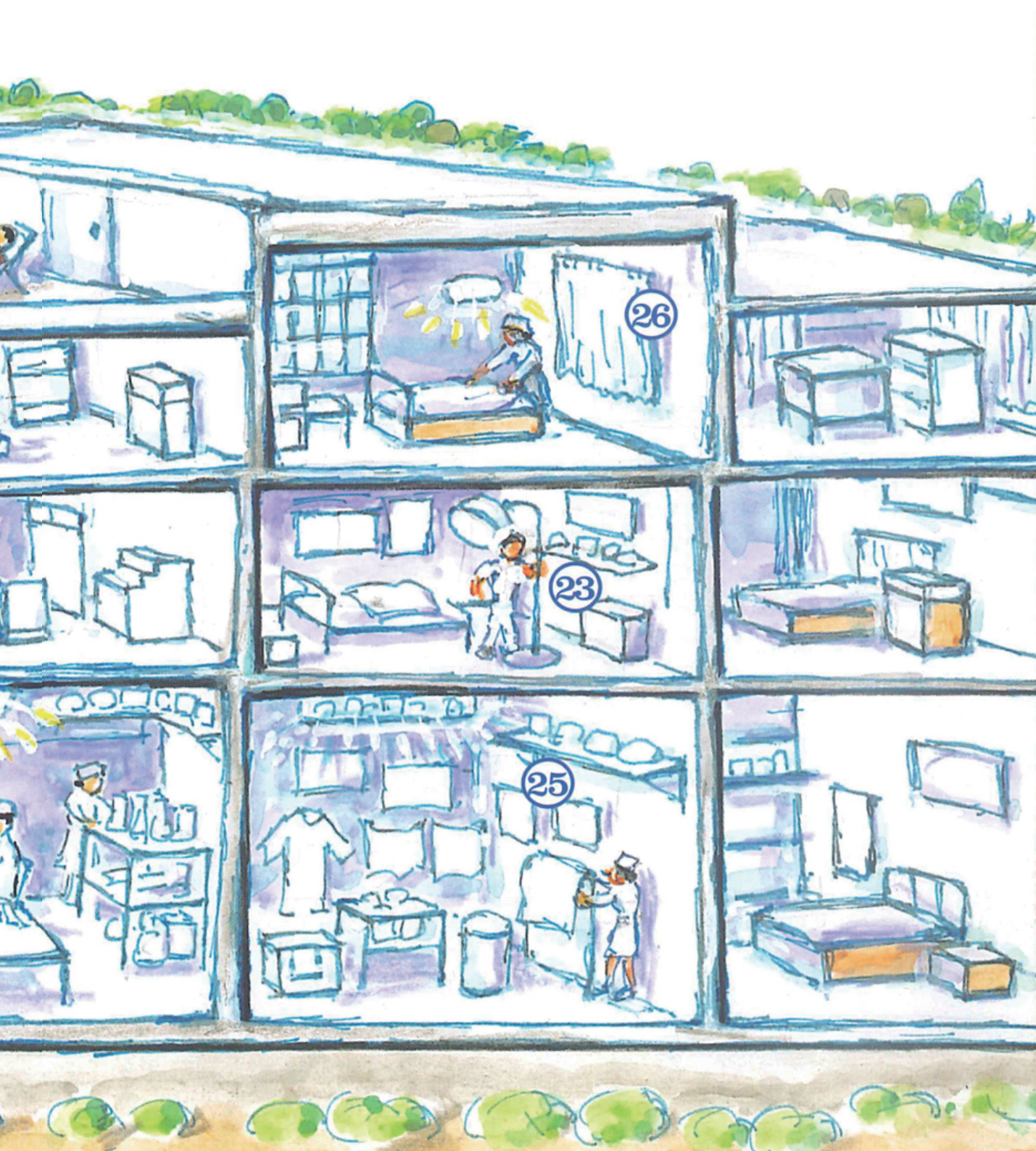
OFICINAS Y HOGARES

- 15 CORTINAS/PERSIANAS
- 16 UTENSILIOS DE COCINA
- 17 BAÑOS
- 18 LÁMPARAS
- 19 MOBILIARIO DE HABITACIONES
- 20 CLIMATIZACIÓN/AIRES ACONDICIONADOS
- 21 NEVERAS
- 22 PURIFICADORES DE AIRE









HOSPITALES Y CENTROS DE SALUD

- 23 ESTERILIZACIÓN PAREDES DE QUIRÓFANOS
- 24 ESTERILIZACIÓN Y DESINFECCIÓN DE EQUIPOS MEDICOS
- 25 ELIMINACIÓN DE OLORES
- 26 CORTINAS

SECTOR AGROPECUARIO

- 27 CONSERVACIÓN DE VERDURAS Y FRUTAS
- 28 PURIFICACIÓN DE SOLUCIONES NUTRITIVAS
- 29 ESTERILIZACIÓN Y DESINFECCIÓN DE GRANJAS
- 30 ELIMINACIÓN DE LIXIVIADOS PELIGROSOS
- 31 ELIMINACIÓN DE DESECHOS ANIMALES

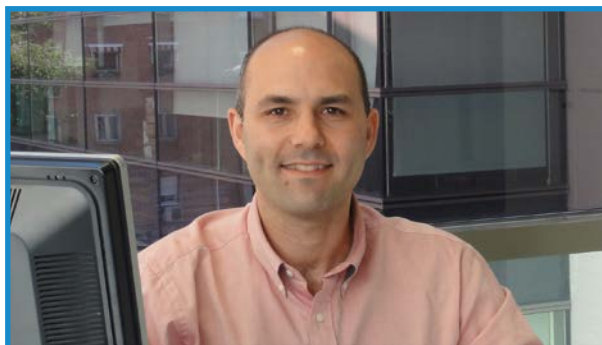
Ref.: A STORY OF THE SUN AND PHOTOCATALYSTS, Akira Fujishima, Satoshi Kako et al, KAISEI-SHA, 2011

INTRODUCCIÓN

David Almazán.

Presidente de la Asociación Ibérica de Fotocatálisis y Director de Ingeniería del Terreno en EPTISA.

La idea originaria de redactar El Libro Blanco de la Fotocatálisis, surge como respuesta a las demandas del mercado para actualizar y dar continuidad a la Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas que la Asociación Ibérica de Fotocatálisis publicó en el Congreso Nacional de Medioambiente en el año 2012.



Pero el último impulso para comenzar definitivamente la redacción de este documento nos lo dio el antiguo Ministerio de Fomento (actual Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana), a través de su Dirección General de Carreteras. Mediante la Iniciativa E4L2_5, dentro del Plan de Innovación para el Transporte y las Infraestructuras 2017-2020 -que por determinados motivos no llegó a completarse- creó un Grupo de Trabajo que aunó expertos en la materia y responsables de infraestructuras muy diversas, cuyo objetivo era muy similar a esta publicación: elaborar un documento que sirviera de referencia a la hora de prescribir o contratar un material fotocatalítico. Pues bien, una buena parte de ese Grupo de Trabajo, liderado por la Asociación Ibérica de Fotocatálisis, de alguna manera, continuó con carácter altruista esta iniciativa hasta convertirse en el presente documento.

Como bien señala el Profesor Fujishima en el prólogo -vaya por delante nuestro agradecimiento por sus palabras e ilustración-, la fotocatalisis está presente ya en muchos de los elementos urbanos que componen nuestra cotidianeidad, tanto en espacios exteriores como interiores. Y desde ellos ejerce sus funciones benéficas de mejora de la calidad del aire y autolimpieza de edificios. Contribuye a la higiene y la salud colectiva, en tiempos que -como estamos viendo- van a darles cada vez más valor.

Su funcionamiento básico -a efectos divulgativos- puede explicarse con sencillez: las superficies tratadas con agentes fotocatalíticos, gracias a la luz (solar o artificial) descomponen y mineralizan numerosos compuestos contaminantes presentes en el aire. La reacción química que se produce cuando se dan cita los tres elementos básicos -luz, oxígeno y fotocatalizador- contribuirá a eliminar del aire sustancias nocivas para el ser humano, tales como los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre o compuestos orgánicos volátiles.

Por sus virtudes, a la fotocatalisis se la ha comparado -con humildad, pero con acierto- con la fotosíntesis, ese fabuloso mecanismo natural resultado de la alianza entre el sol y el manto vegetal, gracias al cual se genera vida.

En las páginas de este Libro Blanco de la Fotocatálisis encontrará el lector muchos más detalles sobre el funcionamiento, aplicaciones, sistemas de medición e investigaciones en el área fotocatalítica. Ya que su objetivo principal es poner a disposición de Administraciones Públicas,

Empresas privadas y ciudadanos en general, las bondades -y también las limitaciones- del empleo de estos nuevos materiales como herramienta de mejora de la calidad de vida en nuestra sociedad, aplicándose en diversos sectores, como el Urbanismo, la Edificación, la Obra Civil, el Transporte, la Industria, la Sanidad o el propio Hogar, y siempre buscando la mejora de la calidad del aire, pero con la posibilidad de formularlos de manera que tengan otros efectos beneficiosos, tales como los bactericidas, virucidas, autolimpiantes o desodorizantes.

La Asociación Ibérica de la Fotocatálisis -cuya actividad es objeto de mayor detalle en el primer capítulo- lleva ya una década organizando encuentros en España y Portugal generadores de conocimiento sobre el tema que nos ocupa. El Libro Blanco, que ha supuesto un gran esfuerzo de la comunidad profesional en torno a AIF, es la mejor manera de celebrar dicha década y prepararnos para la próxima, que será sin duda decisiva por los retos del cambio climático y las nuevas pandemias.

El libro comienza presentando una panorámica de la contaminación en España, tanto en el exterior como en interiores, así como su legislación asociada. A continuación se repasa el estado del arte de la tecnología fotocatalítica heterogénea en fase gas y sus aplicaciones (en este volumen no se aborda la fotocatalisis en agua), destacando los grandes avances llevados a cabo en los últimos años.

En este sentido, merecen especial mención las numerosas y recientes iniciativas encaminadas a la reducción de la probabilidad de contraer enfermedades infecciosas -como respuesta a la pandemia originada por la COVID-19- mediante el uso de materiales fotocatalíticos. Tal es el caso del Proyecto Internacional, SIN-CoV-2: "Destrucción fotoactiva de SARS-CoV-2 del aire interior y superficies". El apéndice del Libro Blanco está dedicado precisamente a poner de manifiesto los avances de la comunidad científica en este área.

También se repasan los distintos métodos de evaluación de la actividad fotocatalítica de diferentes materiales, dependiendo de su uso y -lo que es más importante- se establecen recomendaciones generales de criterios de diseño y aplicación. Obviamente, éstos habrán de adaptarse al contexto particular de cada proyecto, para lo cual puede requerirse asesoramiento experto; pero en todo caso estas páginas constituirán un adecuado punto de partida.

Por último, se ha incluido una síntesis de los trabajos de investigación, desarrollo e innovación llevados a cabo en la última década, dentro del capítulo "Casos de Estudio", así como una recopilación de las preguntas y respuestas (FAQ) que con mayor frecuencia nos hemos encontrado de manera recurrente durante el pasado lustro.

Es importante concienciar a todos aquellos gestores y prescriptores que estén en posición de contratar el diseño o aplicación de materiales fotocatalíticos de que con este tipo de materiales de última generación no basta con pedir un presupuesto a una determinada empresa e incluirlo en un proyecto o en una obra. Antes es necesario solicitar documentación actualizada que acredite, mediante ensayos normalizados y homologables, la actividad fotocatalítica del producto comercializado, y para el uso que se le vaya a dar. Después habrá que definir un protocolo de caracterización del material acorde al uso y prestaciones finales. Obviamente estas acciones tendrán que estar amparadas por una partida económica que, en definitiva, no deja de ser un sistema de control para garantizar la inversión prevista, pues de lo contrario podría ocurrir que las prestaciones finales no respondieran a las expectativas. La Asociación Ibérica de Fotocatálisis, organización sin ánimo de lucro, presta servicios de asesoramiento en este sentido y lucha contra el fraude que, como en todas las actividades industriales y económicas, puede registrarse en el campo fotocatalítico.

No me gustaría terminar esta introducción sin agradecer la gran generosidad mostrada por todos y cada uno de los autores y autoras que han participado en la redacción de este Libro Blanco, así como al resto de colaboradores, colegas y amigos, que de una u otra forma han contribuido de manera definitiva a ponerle el broche final. Gracias también por el apoyo recibido por todos los socios de AIF; Administraciones Locales, Regionales y Estatales; entidades públicas y privadas de investigación científica e industrial; Escuelas de Ingeniería y Arquitectura; Colegios Profesionales; medios de comunicación y ciudadanos, en general, interesados en mejorar la calidad del aire que respiramos, a través de tecnologías tan interesantes, como la fotocatálisis.

Además de los anteriores agradecimientos generales, quiero también específicamente citar a algunas de las personas que han ayudado de manera muy cercana en la coordinación de los contenidos y preparación de este libro. Tal es el caso de Fernando Fresno (Instituto Imdea Energía), Alberto Goytre (Reportarte), Gonzalo García (Eptisa) y Estrella Sanz (Eptisa).

1. LA ASOCIACIÓN IBÉRICA DE LA FOTOCATÁLISIS: MISIÓN Y OBJETIVOS

La Asociación Ibérica de Fotocatálisis (AIF, en adelante) es una Asociación sin ánimo de lucro y de ámbito Ibérico, que incluye los Estados de España y Portugal, y que tiene como vocación la congregación de personas físicas y jurídicas involucradas en aspectos científicos e industriales de la fotocatálisis y sus aplicaciones constructivas en infraestructuras, fundamentalmente urbanas.

Actualmente AIF cuenta con miembros de la Comunidad Universitaria, de la Comunidad Científica (Centros Tecnológicos), con Ingenierías, Arquitectos, Empresas Tecnológicas, así como con fabricantes y sus Aplicadores.

La AIF, en colaboración con las Administraciones Públicas y Privadas, representa una solución complementaria al problema de la contaminación, tanto en interiores, como en exteriores, además de proponer otras bondades de efecto directo sobre el ciudadano y las Empresas, como la autolimpieza de envolventes de edificación, su carácter biocida y desodorizante en interiores o la generación de Islas Fotocatalíticas, en aquellos casos donde los niveles de contaminación por NO_x, SO_x o COV sean elevados.

Mediante este documento, la AIF pretende concienciar al potencial usuario de esta tecnología, de la importancia que tiene documentarse bien de cómo funciona, de los factores que influyen en su diseño y posteriores prestaciones, y de cómo llevar a cabo un adecuado control de calidad. En este sentido, se recomienda que, antes de realizar su compra y posterior aplicación de productos fotocatalíticos, verifique si la empresa fabricante o distribuidora pertenece a AIF, como primer paso.

Esta sencilla acción, fácilmente comprobable entrando en la web www.fotocatalisis.org, permite al usuario saber si los productos fotocatalíticos que comercializa la empresa en cuestión están testados por un laboratorio externo, bajo condiciones normalizadas de ensayo y presentan actividad fotocatalítica.

Además dicho ensayo o ensayos normalizados han sido revisados por el comité científico técnico de AIF, el cual está compuesto por varios Centros Tecnológicos.

Dicho requerimiento, necesario pero no suficiente, es el principal condicionante para ser miembro de AIF.

Adicionalmente recomendamos que antes de proceder a la compra de productos fotocatalíticos se solicite su certificado de eficiencia a AIF y se tengan en consideración los Criterios de Diseño y Aplicación de Materiales Fotocatalíticos de este documento.

AIF está a disposición de todas las empresas para cualquier aclaración o información adicional que estimen oportuna, antes de la adquisición de materiales fotocatalíticos.

1.1 ÁMBITO DE APLICACIÓN Y OBJETIVOS DE AIF

El ámbito de aplicación de este documento se centra en la fotocatalisis aplicada al sector de la construcción, que incluye las envolventes de edificación y la obra civil.

Los principales objetivos de AIF se resumen en los siguientes apartados:

1. Difusión de la tecnología fotocatalítica en Jornadas y Congresos.	7. Definir recomendaciones de uso y otorgar certificaciones.
2. Identificar y reunir agentes, investigadores e industriales trabajando en el campo de la fotocatalisis.	8. Poner en contacto los diferentes organismos públicos, profesionales o científicos que estén interesados por el desarrollo de la fotocatalisis.
3. Censar los diferentes oficios ligados a la fotocatalisis.	9. Representar a los diferentes agentes, fabricantes y utilizadores de la fotocatalisis ante organismos o instancias nacionales, europeos o internacionales.
4. Listar las aplicaciones existentes o potenciales de la fotocatalisis.	10. Apoyar proyectos de investigación o trabajos de interés para la fotocatalisis como por ejemplo, los que tratan aspectos eco-toxicológicos o bacteriológicos.
5. Elaborar un manual profesional, referenciar productos, soluciones y sistemas fotocatalíticos.	11. Firmar acuerdos con cualquier organismo público o profesional en vista a desarrollos implicando la fotocatalisis o alguno de sus aspectos.
6. Establecer normas y test de evaluación de sistemas fotocatalíticos a diferentes niveles, de la concepción de aplicaciones hasta las diferentes fases de industrialización.	12. Publicar aclaraciones en temas específicos.



1.2 VENTAJAS DE PERTENECER A AIF Y ACTIVIDADES QUE SE ORGANIZAN

1. Capacidad de demostrar que el producto presenta actividad fotocatalítica, mediante la incorporación del certificado de eficiencia fotocatalítica de AIF con el siguiente texto asociado: "Todos los Socios Industriales Miembros de AIF han demostrado, mediante una norma estandarizada, llevada a cabo por un laboratorio externo, y revisada por el comité científico-técnico de AIF, que el producto presenta actividad fotocatalítica." (*)	7. Participación en Proyecto de Certificado de Actividad Fotocatalítica de Producto.
2. Actuar como plataforma de contacto de sus miembros ante empresas nacionales o Internacionales interesadas en la fotocatalisis.	8. Disponibilidad de laboratorios de control de actividad fotocatalítica.
3. Actualización permanente de novedades en nuevos desarrollos, productos y proyectos de investigación del sector.	9. Participación en campañas de comunicación con los medios (prensa, radio, televisión, redes sociales).
4. Asesoramiento científico-técnico frente a eventuales dudas o aclaraciones solicitadas por Clientes.	10. Promoción de interacción Empresa – Ciencia mediante plataformas de participación de I+D+i.
5. Participación en Jornadas y Congresos de fotocatalisis conjuntamente con Administraciones Públicas y Prescriptores, cuyo objetivo es la difusión de la tecnología y sus productos.	11. Acuerdos Marcos con entidades de ámbito nacional o internacional para asesoramiento, difusión y desarrollo de proyectos fotocatalíticos.
6. Participación en publicaciones, tales como el Libro Blanco de la Fotocatálisis, la Guía de Aplicación Práctica de la Fotocatálisis o redacción de Pliegos de Condiciones de productos.	12. Organización de cursos de formación.

(*) Se han detectado en los últimos años numerosos fraudes de empresas que comercializan productos fotocatalíticos, cuando en realidad no lo son. Tratan de aprovechar las campañas de comunicación de AIF sin formar parte de las mismas. (Para más información ver subapartado 8.1 de Certificado de Eficiencia Fotocatalítica de Producto)

Estas mismas empresas solicitan adherirse a AIF, pero quedan excluidas al no estar en condiciones de demostrar que sus productos poseen capacidad fotocatalítica. Cada año aumenta el número de este tipo de empresas.

2. PANORAMA DE LA CONTAMINACIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

Las últimas estimaciones globales de la Agencia Europea de Medio Ambiente y la Organización Mundial de la Salud sobre la repercusión sanitaria de la contaminación atmosférica son muy preocupantes. Elevan en el año 2015 hasta medio millón las muertes prematuras en los países europeos por la mala calidad del aire y en España, las víctimas de la contaminación serían ya más de 30.000 al año, quince veces más que los accidentes de tráfico.

El coste económico de la mortalidad prematura y de la pérdida de días de trabajo por la contaminación del aire ha sido cuantificado por el Banco Mundial en 38.000 millones de euros en 2013, lo que representa un 3,5% del Producto Interior Bruto (PIB) español.

El origen de este problema en nuestras ciudades se encuentra principalmente en las emisiones originadas por el tráfico rodado, a las que se suman en menor proporción las causadas por las calefacciones, el tráfico marítimo y aéreo, determinadas industrias y centrales energéticas.

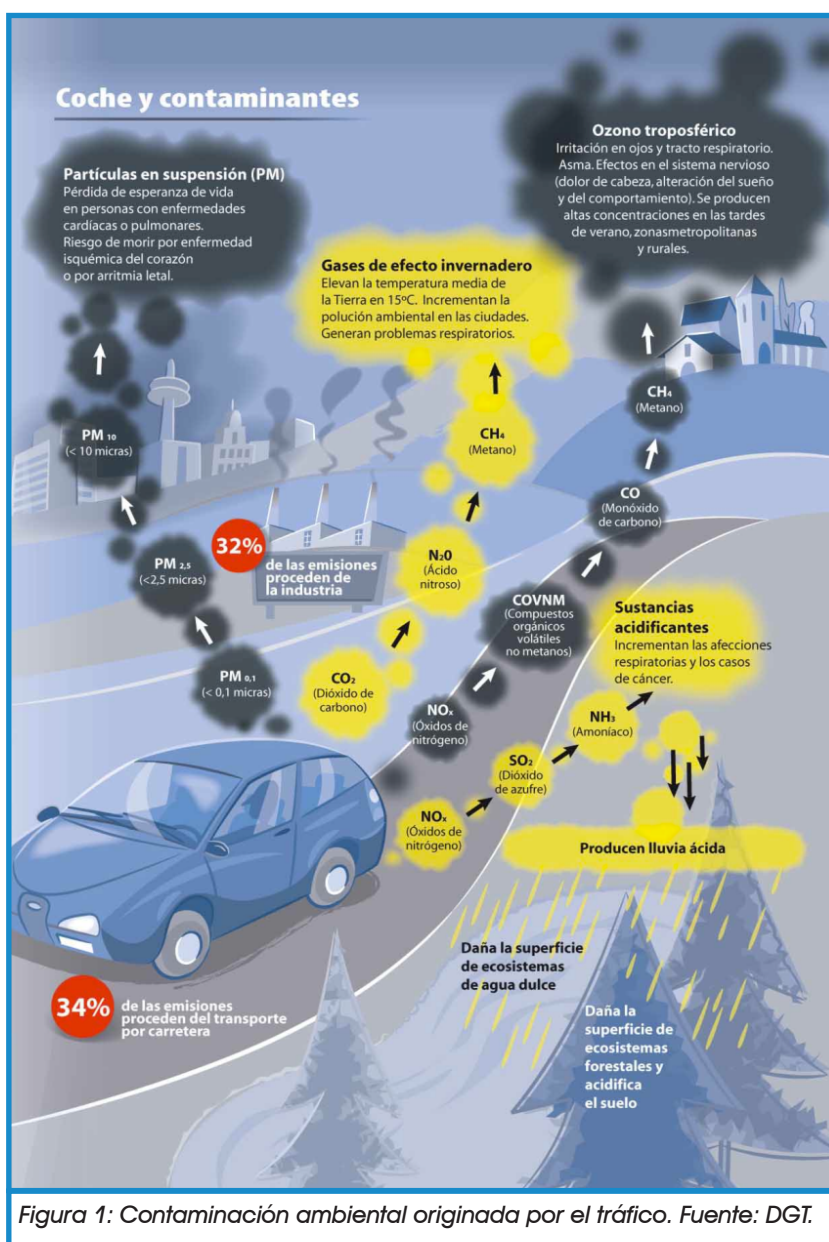


Figura 1: Contaminación ambiental originada por el tráfico. Fuente: DGT.

2.2 CONTAMINACIÓN EXTERIOR

La contaminación exterior es un término amplio usado para describir la contaminación del aire en ambientes al aire libre. La mala calidad del aire ambiental exterior ocurre cuando los contaminantes alcanzan concentraciones lo suficientemente altas como para afectar negativamente a la salud humana y/o al medio ambiente.

La exposición a altos niveles de contaminación del aire puede causar una variedad de resultados adversos a la salud, tales como infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón. De hecho en los últimos años la propia OMS está empezando a sugerir una posible vinculación entre la contaminación atmosférica y deficiencias en el desarrollo neuronal y la función cognitiva, la diabetes e incluso la ansiedad (Castellote Armero, M. 2015. Seminario 11 Construcciones sanas para un entorno mejor: Calidad de aire interior y fotocatálisis en construcción).

Los impactos más severos de la contaminación afectan a las personas que ya están enfermas y a las comunidades más sensibles: los niños, los ancianos y la población con menos recursos son más susceptibles. Los contaminantes más nocivos para la salud, estrechamente asociados con la mortalidad prematura excesiva, son partículas finas PM_{2,5} que penetran profundamente en los conductos pulmonares.

Aunque en general, la calidad del aire en los países más desarrollados ha mejorado en las últimas décadas, como puede verse en los gráficos que se muestran a continuación (caso de España), los efectos adversos de la contaminación exterior en la salud siguen siendo un problema mundial de salud pública, incluso a niveles relativamente bajos.

A continuación se muestran los gráficos de evolución de contaminantes (óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_x), partículas en suspensión: PM₁₀ y PM_{2,5} y ozono (O₃)) en el ambiente, por fuentes de emisión, entre 2005-2016. (Plan Nacional de Calidad del AIRE 2017-2019 (*Plan Aire II*) – Ministerio de Agricultura y pesca, Alimentación y Medio Ambiente)

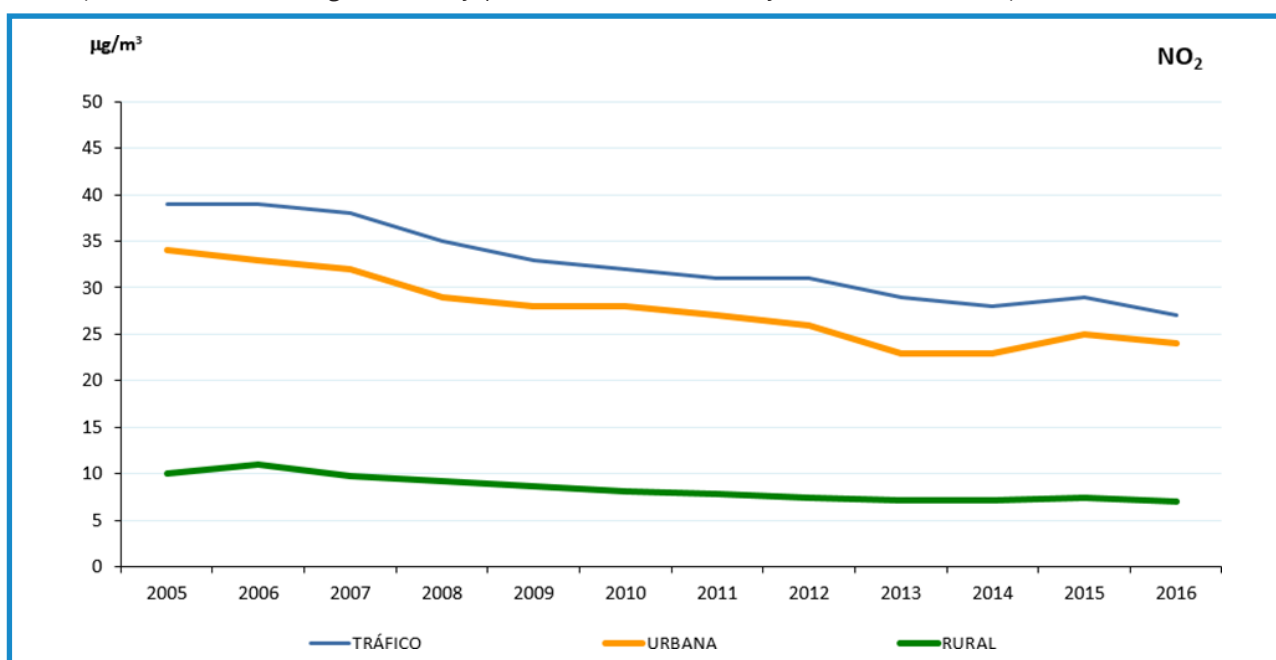


Figura 2: Evolución de las medias anuales de NO₂ (2005-2016) por tipo de estación y área. Fuente: MAPAMA.

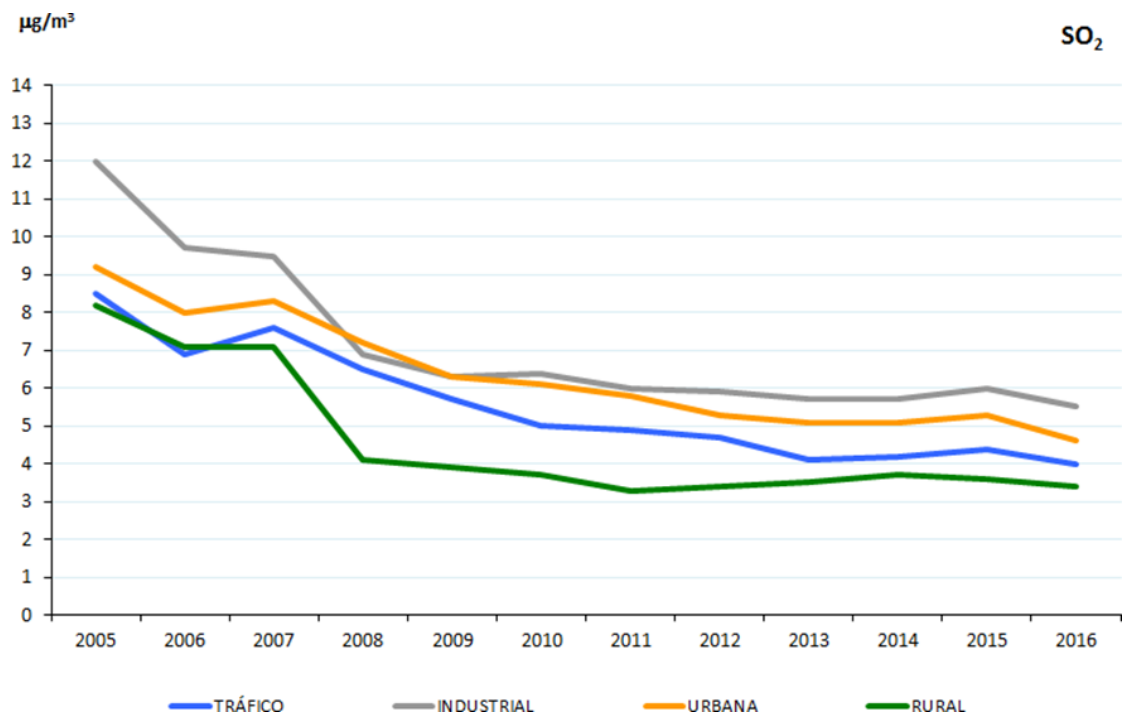


Figura 3: Evolución de las medias anuales de SO₂ (2005-2016) por tipo de estación y área. Fuente: MAPAMA.

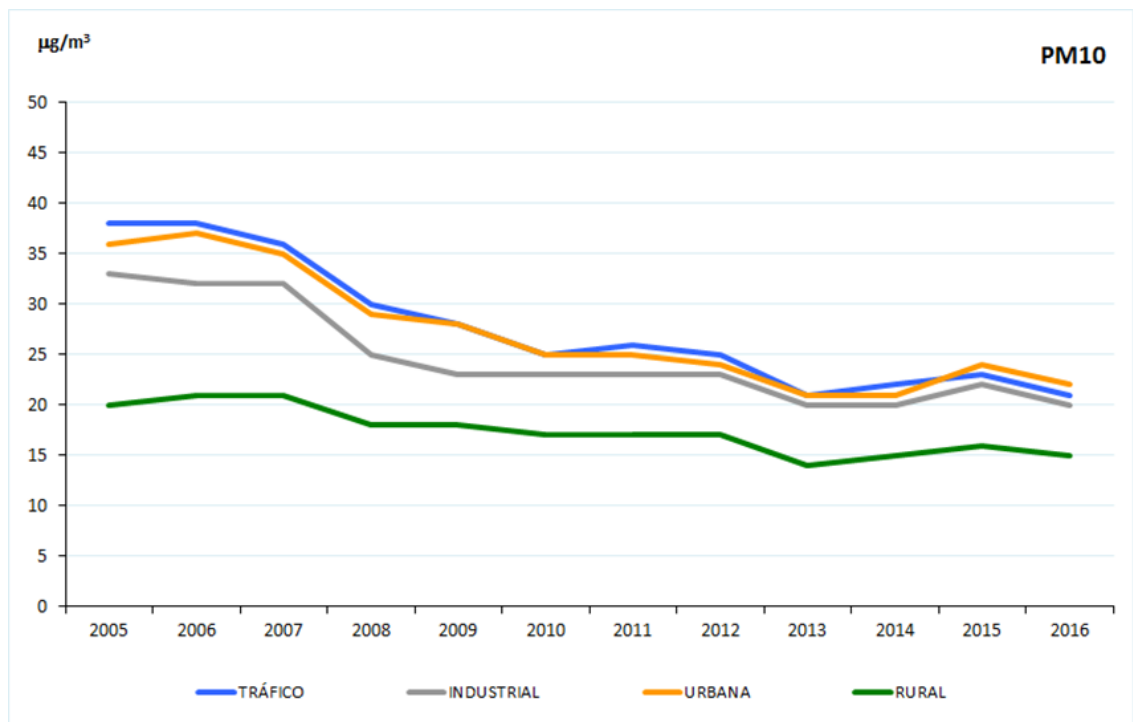


Figura 4: Evolución de las medias anuales de PM₁₀ (2005-2016) por tipo de estación y área. Fuente: MAPAMA.

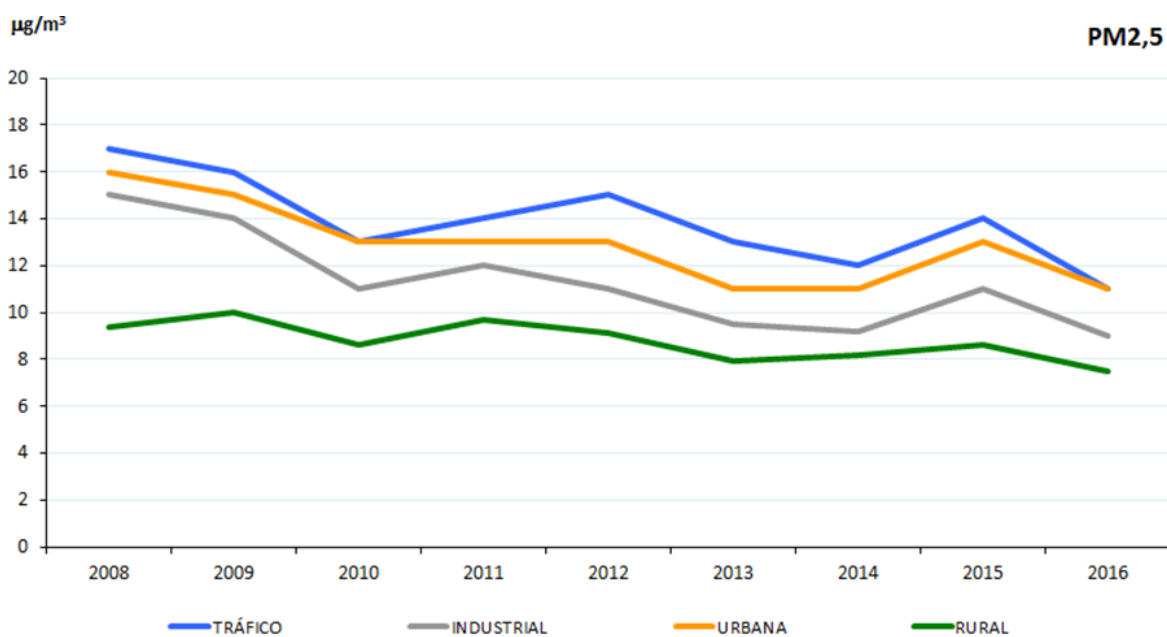


Figura 5: Evolución de las medias anuales de PM2, 5 (2008-2016) por tipo de estación y área. Fuente: MAPAMA.

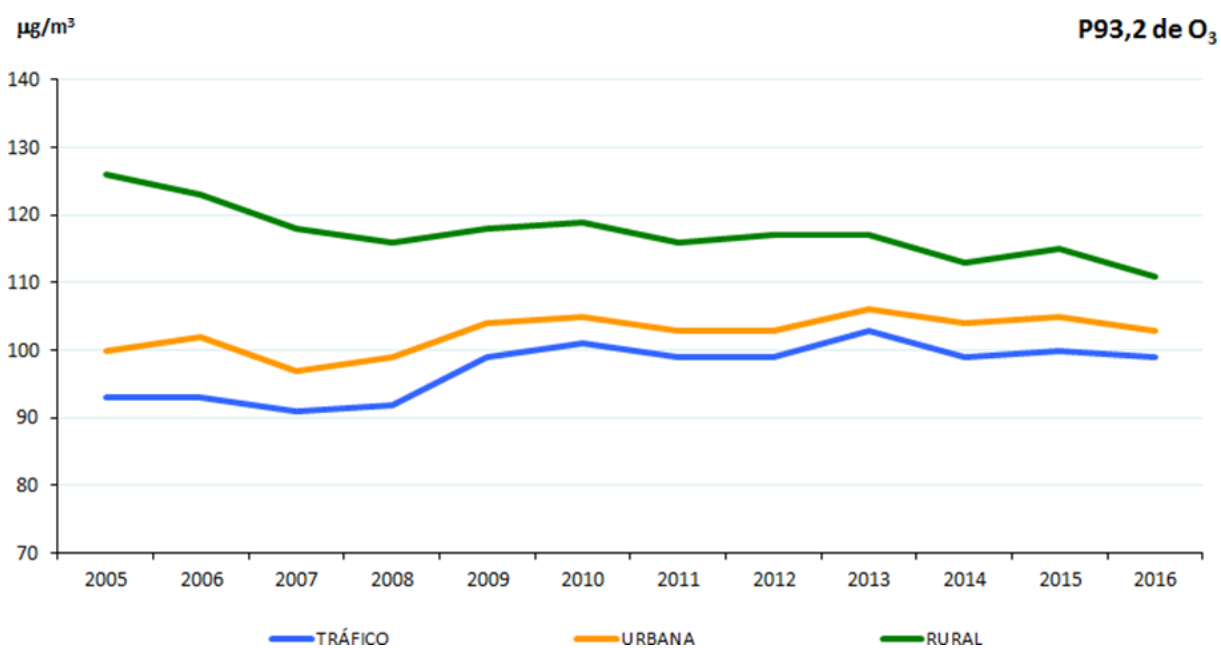


Figura 6: Evolución de las medias anuales de los percentiles 93,2 de O₃ (2005-2016) por tipo de estación y área. Fuente: MAPAMA.

2.3 CONTAMINACIÓN INTERIOR

La contaminación del aire interior es el término utilizado para describir la exposición a ciertas sustancias que se encuentran en viviendas, colegios, transporte o estaciones de metro, por citar algunos ejemplos.

Lo cierto es que el ser humano pasa más del 90% de su tiempo en espacios confinados, con lo que el nivel de exposición es altamente prolongado si se convive con una mala calidad del aire.

La calidad del aire interior de un edificio, la determinan los niveles de contaminantes presentes en el aire que respiramos. Dichos contaminantes pueden tener su origen en el interior del edificio (ocupantes, materiales de construcción, trabajo realizado, uso de determinados productos, gases de combustión, tabaco, etc.) o bien proceder del exterior, tanto de fuentes antropogénicas como naturales.

Se han detectado más de 900 compuestos en el aire interior y algunos contaminantes podrían llegar a estar 2-5 veces más concentrados en el interior que en el exterior de los edificios.

La contaminación del aire interior es el octavo factor de riesgo de enfermedades y se calcula que es responsable del 2,7% de la carga global de enfermedad (Fuente: European Lung white book).

La entrada de contaminantes exteriores se produce a través del aire utilizado para la ventilación (natural, híbrida o mecánica), las infiltraciones por juntas, chimeneas, grietas, etc. (forzadas por las diferencias de presión debidas al viento y el gradiente térmico entre interior y exterior) o los cimientos del edificio (por ejemplo el radón).

Si la concentración de un contaminante determinado es menor en el aire exterior que en el del interior, el intercambio de ambos reducirá su concentración en el aire interior. Sin embargo, si un contaminante se origina en el exterior y no en el interior, ese intercambio producirá un aumento de su concentración en el interior.

El concepto de **Síndrome del Edificio Enfermo** es un término que se usa para describir el malestar de cierto porcentaje de ocupantes de un edificio que pueden experimentar bajo determinadas circunstancias. El malestar puede venir originado por dolores de cabeza, frío o calor excesivo, fatiga, náuseas, irritación de ojos y garganta, etc. Las causas asociadas a este síndrome incluyen la ventilación inadecuada, contaminantes interiores (fotocopiadoras, moquetas, barnices, etc.), materiales de construcción del edificio (piedra de granito, revestimientos de madera, etc.) y contaminación por microorganismos (virus, bacterias, etc.).

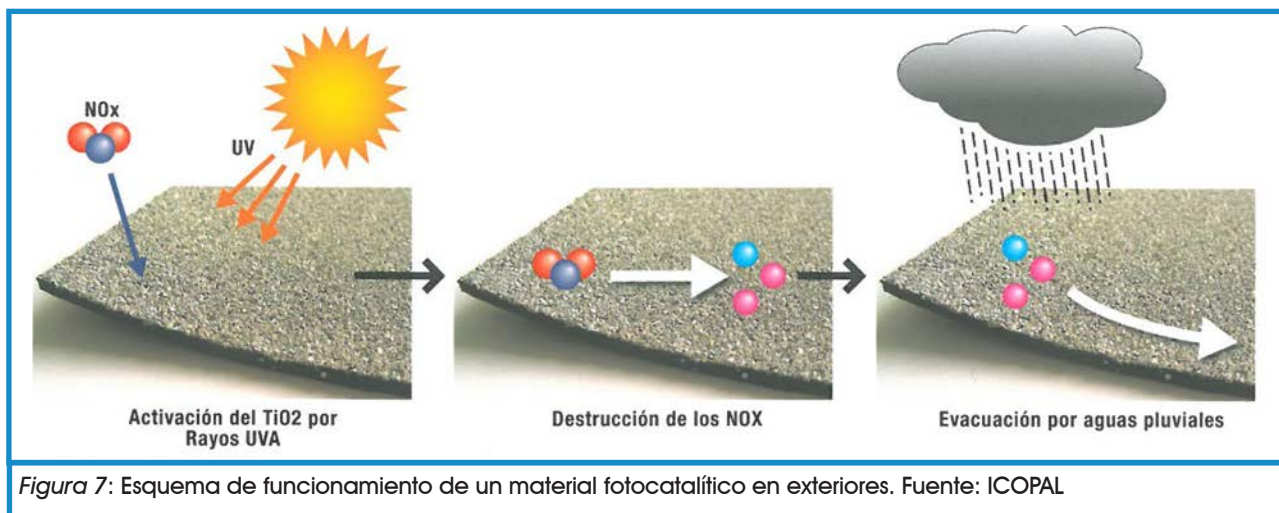
Se estima que aproximadamente el 30% de los edificios de todo el mundo pueden estar afectados por este problema, según SMACNA (Sheet Metal & Air Conditioning Contractors' National Association). (Rey Martínez, y col., 2015.).

3. LA FOTOCATÁLISIS Y SUS APLICACIONES

3.1 QUÉ ES LA FOTOCATÁLISIS: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La fotocatálisis se puede definir como una reacción de oxidación que se produce cuando una fuente de luz (natural o artificial) activa un catalizador (principio activo, usualmente dióxido de titanio o derivado) en presencia de oxígeno.

La luz adecuada para activar cada fotocatalizador depende de las características específicas de éste. El dióxido de titanio, concretamente, se activa mediante luz UV-A, que supone aproximadamente un 5% de la luz solar. Este proceso propicia la mineralización total o parcial de determinados contaminantes y evita la acumulación de especies o partículas indeseables en el material. Los materiales mineralizados, tras la reacción química, son habitualmente eliminados mediante limpieza. En el caso de exteriores, mediante agua de lluvia o limpiezas con agua o con desengrasantes (tales como operaciones de baldeo de calles, por citar un ejemplo), y en el caso de interiores, mediante la propia limpieza del hogar y las corrientes de ventilación que se producen cuando se airea la casa.



A modo de curiosidad, el dióxido de titanio (TiO_2) se presenta en varias formas minerales, tales como la brookita, la anatasa y el rutilo, siendo los más usados en fotocatálisis estos dos últimos.

Este compuesto posee una amplia gama de aplicaciones en la industria química en general. El dióxido de titanio se utiliza principalmente en la producción de pinturas (permite mantener el color

original en el tiempo) y plásticos (para aumentar su durabilidad), así como en papel (lo hace más blanco, opaco y brillante), tintas de impresión, cosméticos (cremas rejuvenecedoras, cremas de protección solar o pastas dentífricas, por citar algunos ejemplos), productos textiles, farmacéuticos (para alargar la vida de los medicamentos– tal es el caso de las pastillas de ácido acetilsalicílico o numerosos jarabes), alimentarios (alarga la vida de los alimentos) y por supuesto, en construcción (con capacidad fotocatalítica).

Los procesos fotocatalíticos basados en las propiedades del dióxido de titanio han captado un enorme interés, sobre todo desde la década de los setenta, cuando este fenómeno fue relanzado en Japón. Sin embargo, la aplicación de la oxidación fotocatalítica a los materiales de construcción no se ha producido hasta la última década en el continente Europeo.

Entre las aplicaciones para las que se ha estudiado la actividad fotocatalítica del TiO_2 y de otros fotocatalizadores destacan la eliminación de contaminantes por oxidación y la desinfección y esterilización de superficies. Se ha demostrado que materiales de construcción que incorporan TiO_2 en su composición son capaces de, bajo irradiación solar, oxidar contaminantes en contacto con su superficie, fundamentalmente compuestos orgánicos volátiles (COVs) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos últimos, precisamente, son de particular importancia puesto que se encuentran entre los contaminantes más presentes en aire exterior, con efectos perniciosos para la salud, tanto directos como indirectos a través de la formación de otros compuestos. La fotocatalisis presenta por tanto un potencial descontaminador mediante la conversión de estos óxidos a nitratos que, por una parte, son relativamente inocuos y, por otra, son solubles en agua y portanto se eliminan mediante el agua de lluvia o de limpieza (Dalton y col., 2002). **En este sentido, dadas la concentraciones habituales de NO_x en atmósferas contaminadas, los nitratos resultantes de su oxidación fotocatalítica no suponen un problema en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) (Ver Subapartado 9.15 de afecciones de los lixiaviados a las EDAR).**

Por otro lado, se han realizado múltiples estudios intentando aumentar la eficiencia de los catalizadores bajo la radiación visible (para aplicaciones en interiores). En algunos casos se han usado óxidos semiconductores alternativos, dopaje del dióxido de titanio con metales (wolframio, hierro, etc.), dopaje con no metales (carbono, nitrógeno, azufre, etc.) o mezclas de estas soluciones.

Para más información, consultar subapartado 7.3.4 de Luz (Criterios de Diseño y Aplicación de Materiales Fotocatalíticos)

3.2 APLICACIONES GENERALES

La importancia científica y tecnológica de la fotocatalisis está muy reconocida a día de hoy, al ser un proceso que permite llevar a cabo reacciones químicas a presión y temperatura ambiente y utilizando la luz como fuente de energía.

Entre las posibles aplicaciones, la eliminación de contaminantes en agua y aire ha sido históricamente la más investigada y es de hecho la única, junto con la muy relacionada de desinfección y autolimpieza de superficies, las que ha encontrado hasta el momento un mercado más maduro. Cuando los contaminantes orgánicos (y algunos inorgánicos) entran en contacto con la superficie

del fotocatalizador, y en presencia de luz UVA, son oxidados hasta formar CO_2 (en concentraciones mínimas), agua y sales inorgánicas, es decir, son mineralizados. La fotocatalisis heterogénea se enmarca, de hecho, en los llamados “procesos avanzados de oxidación”, cuyo objetivo es precisamente la mineralización de contaminantes para su eliminación.

Las aplicaciones medioambientales de la fotocatalisis se pueden resumir, de manera general, como sigue:

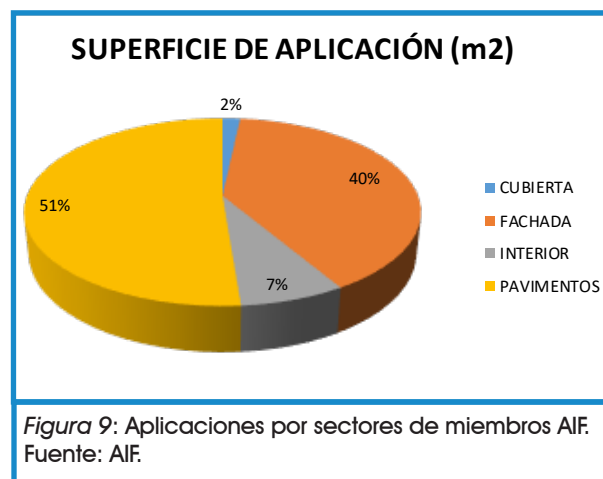
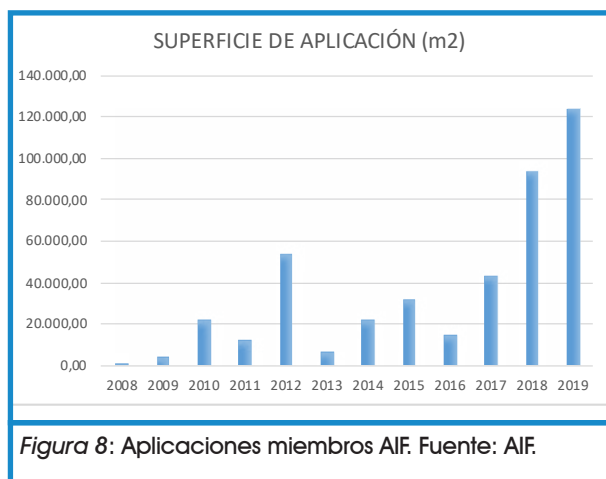
Tratamiento de aire: descontaminación del aire interior y exterior, eliminación de olores, eliminación del etileno formado en almacenes de frutas y verduras, remediación de suelos por desorción, reducción del polen, etc.

Tratamiento de aguas: depuración o detoxificación de aguas para posterior tratamiento biológico, decoloración de efluentes, potabilización de agua, etc.

Superficies activas: pavimentos, fachadas, cubiertas, telas (para toldos de viviendas y protección de obras de rehabilitación de fachadas), islas fotocatalíticas, y materiales auto-limpiables, auto-esterilizables, efecto biocida, o anti-vaho (anti-fogging) o anti-reflejos (anti-reflecting).

Aplicaciones energéticas: Junto con la creciente preocupación por el agotamiento de los combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero, las aplicaciones energéticas de la fotocatalisis han crecido en importancia científica en las últimas décadas. En este contexto, la fotocatalisis permite no sólo la obtención de combustibles sostenibles a partir de materias primas renovables (CO_2 , agua, biomasa) y energía solar, sino también el almacenamiento de esta última en forma de energía química. En otras palabras, la fotocatalisis ofrece un camino para desarrollar la fotosíntesis artificial. En cualquier caso, hasta el momento estas aplicaciones se encuentran en una etapa de desarrollo más próxima a la investigación y la demostración que a la entrada en el mercado.

A continuación se muestran las aplicaciones declaradas por los fabricantes que forman parte de AIF, discriminadas por año y por tipo de elemento constructivo, en España, entre los años 2008 y 2019:



Cabe señalar que las aplicaciones en interior están únicamente asociadas al sector de la edificación.

La lectura de estas cifras se corresponde con un mercado desconocido dentro de los gestores de infraestructuras, prescriptores y sociedad, en general, y por tanto, con reducida demanda en la actualidad. Si bien, también se puede observar una curva de tendencia claramente ascendente, que se inicia en el año 2016 y que espera rondar los 200.000 metros cuadrados en 2020.

3.3 APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN

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

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

Como se ha mencionado anteriormente, la fotocatálisis con TiO_2 utiliza la luz ultravioleta (UV-A) como fuente de activación del catalizador, mientras que en la superficie de éste se adsorben oxígeno, vapor de agua y los gases contaminantes (NO_x , COVs...). En estas circunstancias, se producen las reacciones que dan lugar a la oxidación de los contaminantes, produciéndose en último lugar especies inocuas como dióxido de carbono, agua e iones inorgánicos (*Tompkins y col., 2005*).

Algunos autores (*Obee y col., 1995; Cassar y col., 2003*) han indicado que los materiales compuestos de TiO_2 y cemento son capaces de eliminar, además de óxidos de nitrógeno y de azufre, COVs como benceno, tolueno, compuestos clorados y aldehídos, además de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH, del inglés *polycyclic aromatic hydrocarbons*). Asimismo, el TiO_2 puede contribuir también a la eliminación de agentes patógenos como bacterias, endosporas y hongos (*Chen y Col., 2009; Howard y Col., 2011*).

Otra de las características de la fotocatálisis mediante TiO_2 y luz ultravioleta es su inespecificidad, lo que significa que puede eliminar un amplio abanico de contaminantes atmosféricos, particularmente orgánicos. Ello se debe a la capacidad oxidante de los radicales formados durante el proceso que, en principio, son capaces de atacar a cualquier compuesto orgánico, aunque en la práctica unos son más resistentes a este ataque que otros. Algunos ejemplos de esta variedad de contaminantes eliminables mediante fotocatálisis se encuentran en los trabajos de Tompkins y col. (2005), donde se citan hasta 60 referencias sobre la degradación de diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos en matrices gaseosas, o en la tabla siguiente, con datos tomados de la revisión de Carp y col. (2004).

Tabla 1
Compuestos fotodegradados en fase gas con materiales basados en TiO_2 .
(Parcialmente adaptada de Carp y Col., 2004)

Compuesto		Fotocatalizador
Hidrocarburos	Metano	TiO_2
	Etano	TiO_2
	Propano	TiO_2 ; $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$
	n-Butano	TiO_2
	Hexano	TiO_2
	Heptano	TiO_2

Tabla 1 (Continuación)
Compuestos fotodegradados en fase gas con materiales basados en TiO₂.
(Parcialmente adaptada de Carp y Col., 2004)

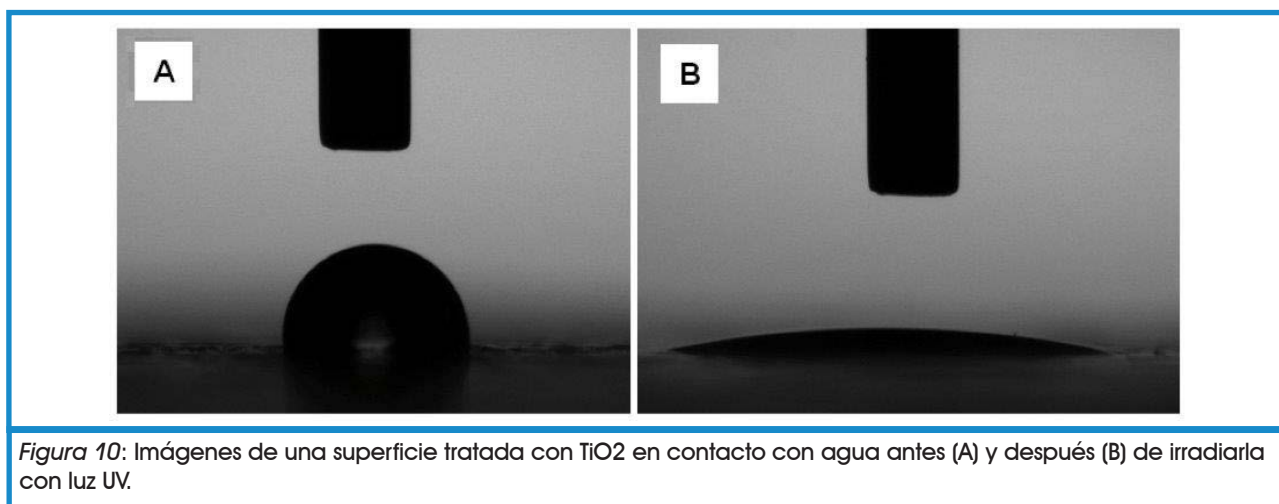
Compuesto		Fotocatalizador
Hidrocarburos	Ciclohexano	TiO ₂
	Etileno	TiO ₂ ; TiO ₂ /Borosilicato; anillos vidrio; TiO ₂ /ZrO ₂
	Propeno	TiO ₂
	Metilacetileno	V-TiO ₂
	Ciclohexeno	TiO ₂
	Benzeno	TiO ₂ /zeolitas; TiO ₂
	Tolueno	TiO ₂ ; TiO ₂ /sílice; TiO ₂ /vidrio, silicio, alúmina; TiO ₂ /sílice; PET + celulosa
Compuestos Halogenados	DCH (diclorometano)	TiO ₂
	Triclorometano	TiO ₂ /Al ₂ O ₃ ; Fibra vidrio
	TCE	TiO ₂ ; TiO ₂ /monolito
	PCE	TiO ₂
	Cloruro de Vinilo	TiO ₂ ; TiO ₂ /sílice
	1,3-diclorobenzeno	TiO ₂
	Dietilamina	TiO ₂
	Propilamina	TiO ₂
	Piridina	TiO ₂
Compuestos Hidroxilados	Metanol	TiO ₂
	Etanol	TiO ₂ ; Pt/TiO ₂ ; Fe/TiO ₂
	2-Propanol	TiO ₂ /SiO ₂ ; TiO ₂
	Butanol	TiO ₂ /zeolitas
	tert-Butil-alcohol	Pt/TiO ₂
	Dietiléter	TiO ₂
	Metil-butyl-éter	
Compuestos Sulfurados	Sulfuro de Dietilo	TiO ₂
	Sulfuro de 2-Cloroetil etilo	TiO ₂
Compuestos con Silicio	1,3,5,7-Tetrametilciclotetrasiloxano	TiO ₂
	Octametiltrisiloxano	TiO ₂
Aldehídos, cetonas	Formaldehído	TiO ₂ ; SiO ₂ o WO ₃ -TiO ₂
	Acetaldehído	TiO ₂ ; Pt/TiO ₂ ; V, Cr, Mn, Fe; Ni-TiO ₂ /SiO ₂ ; TiO ₂ /papel
	Propionaldehído	TiO ₂ /mordenita; TiO ₂ ; Pt/TiO ₂
	Metil-etil cetona	TiO ₂ /zeolitas
	Metil-isobutil cetona	TiO ₂

Tabla 1 (Continuación)
Compuestos fotodegradados en fase gas con materiales basados en TiO_2 .
 (Parcialmente adaptada de Carp y Col., 2004)

Compuesto		Fotocatalizador
Derivados Halogenados de Ácido Carboxílico	Ácido Dicloroacético	TiO_2
Compuestos Inorgánicos	NO_x	TiO_2 ; TiO_2 /hidroxiapatita; TiO_2 /zeolita; Pt/ TiO_2
	O_3	TiO_2 /Sustrato de vidrio; Pt/ TiO_2
Compuestos Orgánico-inorgánico	$\text{NO} + \text{BTEX}$	TiO_2 (interior)
	$\text{NO} + \text{BTEX} + \text{SO}_2$	TiO_2 /AC (interior); TiO_2 /fibra de vidrio

Materiales con capacidad auto-limpiante (“Self-cleaning materials”)

La incorporación de TiO_2 a materiales de construcción puede contribuir a mantener la limpieza de las infraestructuras (Othani, 2011). Por una parte, como se ha indicado con anterioridad, al ser activado como fotocatalizador por la componente ultravioleta de la luz solar, el TiO_2 es capaz de eliminar por oxidación una amplia variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, y esto se aplica también a sustancias presentes en las superficies formando manchas. Por otra parte, tras su activación, la superficie del TiO_2 (y esto no es común a todos los fotocatalizadores) aumenta su afinidad por el agua hasta volverse *superhidrofílica*, una propiedad conocida como *superhidrofiliidad foto-inducida* (Sakai y col., 2003). Esto quiere decir que, bajo luz UV, el ángulo de contacto del agua con la superficie tiende a 0 ó, en otras palabras, el agua “prefiere” formar una película continua en lugar de gotas sobre esta superficie, lo que previene la acumulación de partículas y facilita el lavado (Pichat, 2012). Un ejemplo de esto puede observarse en la figura 10, donde se representa la transición de una superficie tratada con TiO_2 en la oscuridad (relativamente hidrófoba) a irradiada con luz UV (superhidrofílica), y se aprecia el cambio entre la formación de una gota de agua redondeada y la de prácticamente una película continua aplanada. Estos cambios se deben a modificaciones superficiales del TiO_2 bajo irradiación y, a diferencia del efecto fotocatalítico, no se revierten inmediatamente después de cesar la iluminación, sino que se mantienen incluso durante horas. Este efecto no sólo puede dar lugar a un proceso autolimpiante sino que además la superficie mojada no se empaña al no formarse gotas, lo que se ha aplicado para la fabricación de cristales anti-vaho, por ejemplo, en retrovisores de coches.



Aplicaciones en interiores

La aplicación más habitual de la fotocatalisis en interiores es la eliminación de contaminantes orgánicos, (COVs, compuestos orgánicos volátiles o, en inglés, VOCs, volatile organic compounds), así como de otros contaminantes que, aunque están presentes en muy bajas concentraciones, contribuyen a largo plazo al denominado “síndrome del edificio enfermo”.

En hoteles, tiendas y residencias particulares pueden aplicarse productos fotocatalíticos ya existentes en el mercado, fundamentalmente pinturas y baldosas, puesto que sus características hacen favorable la incorporación del fotocatalizador en su composición, pero también otros materiales como por ejemplo textiles para cortinas. Por otra parte, existen también en el mercado equipos de purificación de aire para interiores que incorporan filtros fotocatalíticos y lámparas UV, y que incluyen la posibilidad de recirculación del aire para favorecer el proceso.

Las aplicaciones en interiores están basadas en la capacidad de descomposición que tiene la tecnología fotocatalítica sobre la materia orgánica. Este efecto es el que evita la adherencia de la suciedad (orgánica) sobre los paramentos verticales en interiores y exteriores, de manera que permiten mantener la estética del material fotocatalítico aplicado a lo largo del tiempo, en comparación con un material convencional, disminuyendo, por tanto, los costes de conservación y mantenimiento (demora en el tiempo las campañas de limpieza- normalmente costosa por el uso de andamios colgados – o repintados).

De la misma forma, aprovechando este efecto, se emplea para combatir los malos olores (especialmente en espacios confinados: habitaciones de fumadores de hoteles, aparcamientos subterráneos, cocinas, restaurantes, cuartos de basura, etc.), para reducir la capacidad de formación de moho y algas, y también como bactericida, en espacios interiores comunes, tales como centros sanitarios, las oficinas o el propio hogar.

Aparte de lo ya mencionado, en aplicaciones sanitarias existe la posibilidad de incorporar un material fotocatalizador en los materiales plásticos empleados en la fabricación de catéteres y otros utensilios sanitarios, de manera que se puede conseguir un efecto no sólo auto-limpiante en estos productos, sino también auto-desinfectante, puesto que el efecto oxidante del fotocatalizador es capaz de inactivar bacterias y virus, como se ha demostrado en diversos estudios científicos. (Ver Apéndice para más información). Esta aplicación está, sin embargo, aún en proceso de desarrollo, pero ofrece un amplio nicho de mercado para los productos fotocatalíticos.

En todo este abanico de aplicaciones es fundamental que el fotocatalizador pueda activarse bajo espectros de luz visible y/o de UV.

A continuación se proceden a describir los distintos tipos de aplicaciones en construcción.

3.3.1 PAVIMENTOS

En el campo de los pavimentos fotocatalíticos, entendiendo como tales, tanto los peatonales, como los destinados al tráfico rodado, se han desarrollado en los últimos años las siguientes tecnologías y aplicaciones:

- Capas de rodadura percoladas con lechadas cementosas especiales
- Tratamientos superficiales, a partir de microemulsiones
- Tratamientos superficiales, a partir de pinturas
- Piezas prefabricadas de hormigón (adoquines o losetas)



En interiores, también podrían encontrarse piezas prefabricadas de cerámica para interiores.

A continuación, se pasará revista a cada uno de ellos.

Se tiene constancia de que **un número considerable de Administraciones Públicas ya cuentan con pavimentos descontaminantes**. Algunos ejemplos son los Ayuntamientos de Madrid, Barcelona, Valencia, Bilbao, Zaragoza, Málaga, Córdoba, Puente Genil (Córdoba), Tomares (Sevilla), L'Estartit (Girona), Mataró (Barcelona), Alcalá del Valle (Cádiz), AENA, etc. **También empresas privadas, están comenzando a demandar este tipo de productos, tales como centros médicos privados, estudios de arquitectura urbana, empresas de automoción, etc.**

3.3.1.1 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS PERCOLADOS

Esta técnica consiste en la percolación de una lechada fotocatalítica con base cemento sobre una mezcla bituminosa porosa o drenante, de tipo PA 16, de nueva ejecución.

Esta tipología de pavimentos se lleva a cabo en dos fases. En una primera fase, se coloca una mezcla bituminosa drenante convencional de nueva ejecución, de unos cuatro centímetros de espesor, con un volumen de huecos comprendido entre el 20 y el 25%.

Posteriormente, y en una segunda fase, se percola sobre ella una lechada especial, a partir de dióxido de titanio, cemento, agua, carga mineral, aditivos y fibras en su caso, con objeto de



Figura 12: Proceso de extendido y percolación de lechada fotocatalítica sobre un pavimento drenante. Fuente: Eurovía



Figura 13: Percolación de lechada especial sobre la capa de mezcla bituminosa drenante. Fuente: Eurovía

rellenar los huecos de la mezcla bituminosa. De esta forma se obtiene una capa de rodadura con características semi-rígidas, con mínima susceptibilidad a la generación de deformaciones plásticas y al derrame de hidrocarburos (aceites, lubricantes, combustible,...) y fundentes (durante la etapa de vialidad invernal), además de colaborar con la mejora de la calidad del aire.

En ocasiones, la fabricación de esta lechada requiere el montaje de una planta móvil muy sencilla en la propia obra. La ejecución o percolación de la lechada con base cemento, normalmente se realiza a mano, aunque se podría contar con una maquinaria autopropulsada dotada de rastra de extendido. Dependiendo del uso que se le quiera dar a esta aplicación, podría haber ocasiones donde pudiera ser necesario un tratamiento posterior con granalladora para no comprometer la resistencia al deslizamiento de los vehículos e incluso aumentarla.

Estos tratamientos se llevan aplicando en los países más desarrollados del mundo desde hace décadas, pero sólo se conoce su existencia en las dos últimas, especialmente, en aplicaciones llevadas a cabo en Italia y Francia, aunque también en España.

El ámbito de aplicación habitual de estos pavimentos es en intercambiadores modales, carriles bus, zonas de cargo de aeropuertos y puertos, terminales logísticas, zonas de estacionamiento de vehículos, paradas de autobuses, y pavimentos de calles sometidas a altas cargas de tráfico.



Figura 14: Esquema de acabados antes y después de granallado. Fuente: Eurovía y Eptisa

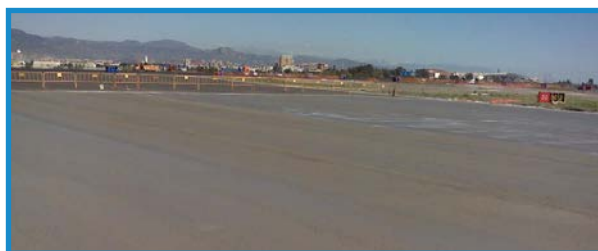


Figura 15: Lechada fotocatalítica percolada en zona de cargo del Aeropuerto de Málaga. Fuente: FYM-Heidelberg Cement Group



Figura 16: Carril Bus (Málaga). Fuente: FYM-Heidelberg Cement Group

3.3.1.2 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES FOTOCATALÍTICOS A PARTIR DE EMULSIONES

Se trata de una tecnología que se formula (adaptada a cada tipo de superficie de aplicación), a partir de una emulsión con base acuosa y dióxido de titanio (TiO_2) con estructura nanométrica que penetra en la mezcla bituminosa, permitiendo conservar prácticamente inalteradas las características superficiales de la capa de rodadura. Es un producto premezclado y listo para su aplicación que se lleva a cabo mediante una maquinaria específica (montada sobre camión), dotada de un sistema automático de pulverización, cuyo caudal varía en función de la velocidad de avance de la maquinaria. La aplicación sobre la rodadura se puede ejecutar mediante dos técnicas:

1. En caliente, sobre rodaduras de nueva ejecución, tras su compactación y previamente a la apertura al tráfico (el producto se seca rápidamente). Se aplica durante la fase de extendido de mezcla bituminosa, justo después del extendido y la primera compactación de la misma.

2. 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. Antes de la aplicación del producto, es necesario limpiar la superficie de la rodadura (o acera) existente con agua a presión, aire comprimido, barrido, etc.)

Una vez ejecutado este tratamiento superficial, el propio paso del tráfico va desgatando en mayor medida las zonas de rodadas, de manera que se podrían diferenciar tres zonas: las citadas zonas de rodadas, las zonas parcialmente rodadas, que serían las zonas aledañas a la señalización horizontal discontinua de cambio de carril, y las zonas más extremas, que no suelen estar sometidas al paso del tráfico.

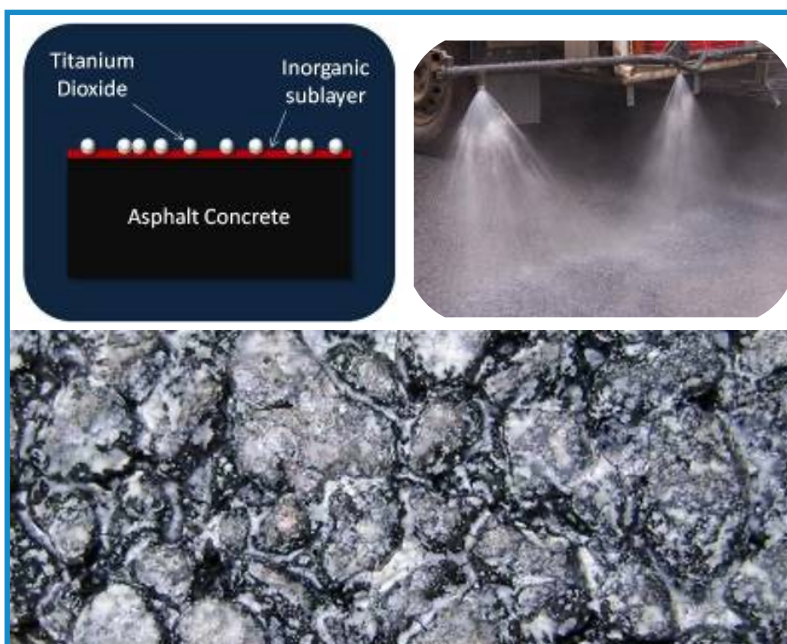


Figura 17: Descripción y ejecución de técnica de pulverización sobre rodadura existente y estado final de la misma después de la aplicación. Fuente: Impresa Bacchi

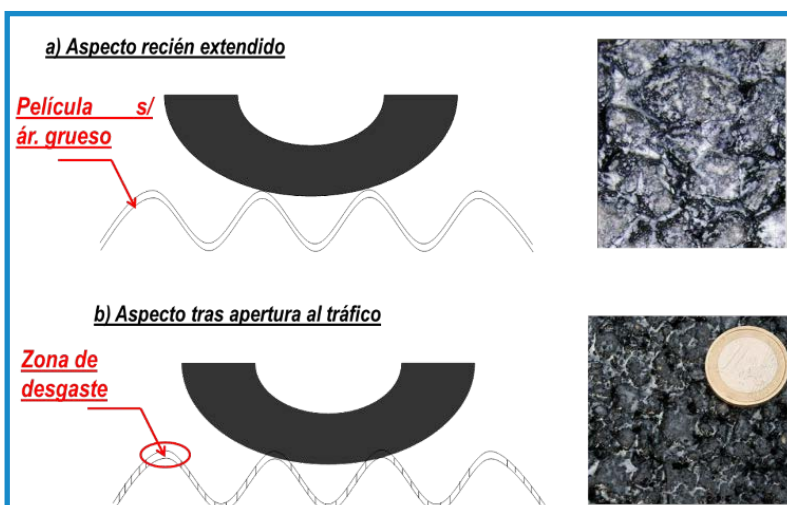


Figura 18: Esquema de acabado del tratamiento superficial a partir de micro-emulsión fotocatalítica, antes y después de la apertura al tráfico. Fuente: Impresa Bacchi y Eptisa

Curiosamente, al contrario de lo que se pudiera pensar inicialmente, estudios recientes (Proyecto LIFE MINOX STREET) han demostrado que las franjas longitudinales más expuestas a la abrasión del tráfico son las que más capacidad fotocatalítica están presentando, con respecto a las otras dos zonas. Esta situación puede deberse a la autolimpieza que se puede generar sobre el pavimento por el paso de los vehículos circulantes, por succión. Sin embargo, las franjas longitudinales más extremas podrían ser las que acumularían más suciedad, dificultando la activación del fotocatalizador.



Figura 19: Proceso de pulverización de spray fotocatalítico sobre pavimento existente (Izda.). Detalle de acabado de extendido de spray fotocatalítico en aceras en Milán (Dcha.). Fuente: Impresa Bacchi

La aplicación de estos tratamientos en el pasado modificaban los primeros días el color del pavimento, volviéndolo más grisáceo, aunque en los últimos tiempos están desarrollándose y aplicándose productos en el mercado que son completamente incoloros y con capacidad descontaminante igualmente.

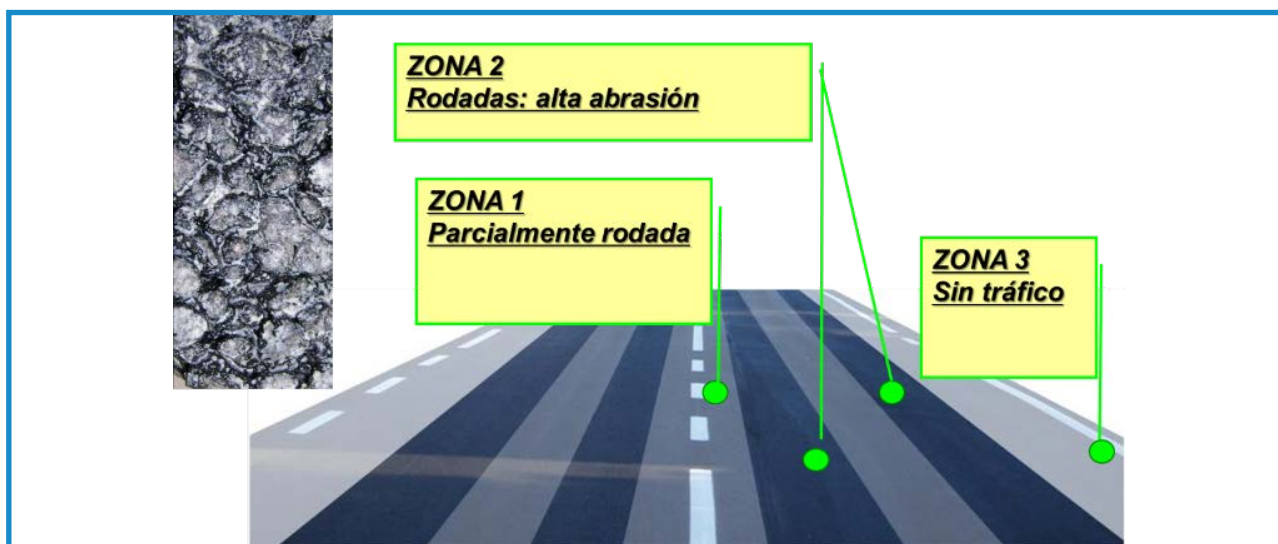


Figura 20: Discriminación por zonas de desgaste del tratamiento superficial fotocatalítico, una vez abierto al tráfico. Fuente: Impresa Bacchi y Eptisa

Este tipo de tratamientos, que se llevan aplicando a nivel internacional desde hace décadas, también pueden ser llevados a cabo sobre pavimentos existentes de hormigón, de adoquines, de baldosas o de losetas hidráulicas, tal y como se puede comprobar en el Proyecto LIFE MINOX STREET.

El ámbito de aplicación habitual de estos pavimentos es múltiple: pavimentos de infraestructuras urbanas, periurbanas, puertos, aeropuertos, pavimentos peatonales, etc.

3.3.1.3 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS A PARTIR DE PINTURAS

El auge de este tipo de tecnologías en los últimos años ha estimulado la participación en el sector de la pavimentación de empresas que habitualmente procedían de otros negocios. Tal es el caso de las empresas de pinturas. Estas empresas han desarrollado productos muy interesantes, coatings incoloros, fundamentalmente, que se aplican bien manualmente, bien a través de rastras, o bien a través de difusores a cierta presión, imitando el tratamiento superficial antes comentado. Existen fabricantes de estas tecnologías que han declarado unas eficiencias descontaminantes, a través de Organismos Públicos de Investigación, muy prometedoras a escala laboratorio.

Igualmente están surgiendo varias empresas que están desarrollando pintura de señalización horizontal fotocatalítica para carreteras y entornos urbanos.

Su ámbito de aplicación sería el mismo del caso anterior.



Figura 21: Aplicación fotocatalítica sobre pavimento de adoquines y losetas hidráulicas en una calle del Ayuntamiento de Madrid. Fuente: Proquicesa

3.3.1.4 PAVIMENTOS DE BALDOSAS O ADOQUINES HIDRÁULICOS FOTOCATALÍTICOS PREFABRICADOS

Se trata de baldosas, losetas o adoquines convencionales con base cemento que son tratados con tecnología fotocatalítica en la propia central de fabricación.

Los últimos milímetros de la superficie de rodadura son los dotados de tratamiento fotocatalítico, con el objetivo de colaborar en la mejora de la calidad del aire.

Cada vez más empresas de prefabricados de hormigón están incluyendo una línea de tratamiento fotocatalítico, aportando un alto valor añadido a sus productos habituales.

El sistema de ejecución de estos pavimentos es similar al convencional sin necesidad de adoptar precauciones adicionales y su ámbito de aplicación está más asociado a pavimentos peatonales, sin renunciar a pavimentos de tráfico rodado, especialmente en entornos urbanos.

Se han llevado a cabo proyectos experimentales con este tipo de materiales, como el Proyecto Light2cat (<https://www.facebook.com/Light2cat>) en Valencia, que han reportado resultados satisfactorios, incluso a escala real, según Fundación Inndea Valencia. (Ver apartado 6.1.2 Casos de Estudio: Proyecto Light2cat)



Figura 22: Aplicación de loseta fotocatalítica en High Line Sants, Barcelona. Fuente: Breinco



Figura 23: Plaza de Conresa. Mislata, Valencia. Fuente: FYM-Heidelberg Cement Group

3.3.1.5 PAVIMENTOS CERÁMICOS FOTOCATALÍTICOS PREFABRICADOS

Al igual que ocurre con el caso anterior, se trata de piezas prefabricadas cerámicas, en este caso, que incorporan un fotocatalizador en forma micrométrica, junto con aditivos que permiten fijarlo en el soporte a altas temperaturas durante el proceso de producción.

Normalmente son pavimentos destinados al uso en espacios interiores, con lo cual deben ser activados especialmente con luz visible (artificial, normalmente mediante el uso de luminarias de tipo LEDs), al contrario que los casos anteriores, que lo hacen con luz natural (ultravioleta). Los objetivos de estos pavimentos son la colaboración en la reducción de la contaminación en interiores, así como proporcionar un efecto desinfectante y bactericida continuo, si se han formulado a tal fin.

3.3.2 ENVOLVENTES DE EDIFICACIÓN

3.3.2.1 REVESTIMIENTO DE FACHADAS CON CERÁMICAS FOTOCATALÍTICAS

Este revestimiento de fachadas consiste en un material cerámico porcelánico descontaminante, en forma de placas, que dota al edificio de una envolvente ecoeficiente capaz de reducir los NO_x y disminuir las concentraciones de ácido nítrico, HNO_3 (causantes de lluvia ácida) presentes en el aire. Se trata de un revestimiento con capacidad fotocatalítica, que no requiere de suministro de energía o instalación adicional para su permanente función descontaminante.



Figura 24: Ejemplo de acabado de revestimiento de fachadas con materiales cerámicos fotocatalíticos en Bilbao. Fuente: Ceracasa

3.3.2.2 PANELES Y MORTEROS BASE CEMENTO FOTOCATALÍTICOS

Se trata de productos con base cemento tradicionales que incorporan un fotocatalizador, dióxido de titanio, que les confiere propiedades fotocatalíticas.



Figura 25: Ejemplo de aplicación de mortero fotocatalítico en Vodafone Village. Milán. Italia. Fuente: FYM-Heidelberg Cement Group



Figura 26: Palacio Expo 2015. Milán (Italia). Italia. Fuente: FYM-Heidelberg Cement Group

3.3.2.3 CUBIERTAS IMPERMEABILIZANTES FOTOCATALÍTICAS

Se trata de láminas asfálticas de impermeabilización convencionales autoprotegidas con un gránulo formulado con dióxido de titanio en forma de anatasa, que colabora en la mejora de la calidad del aire.

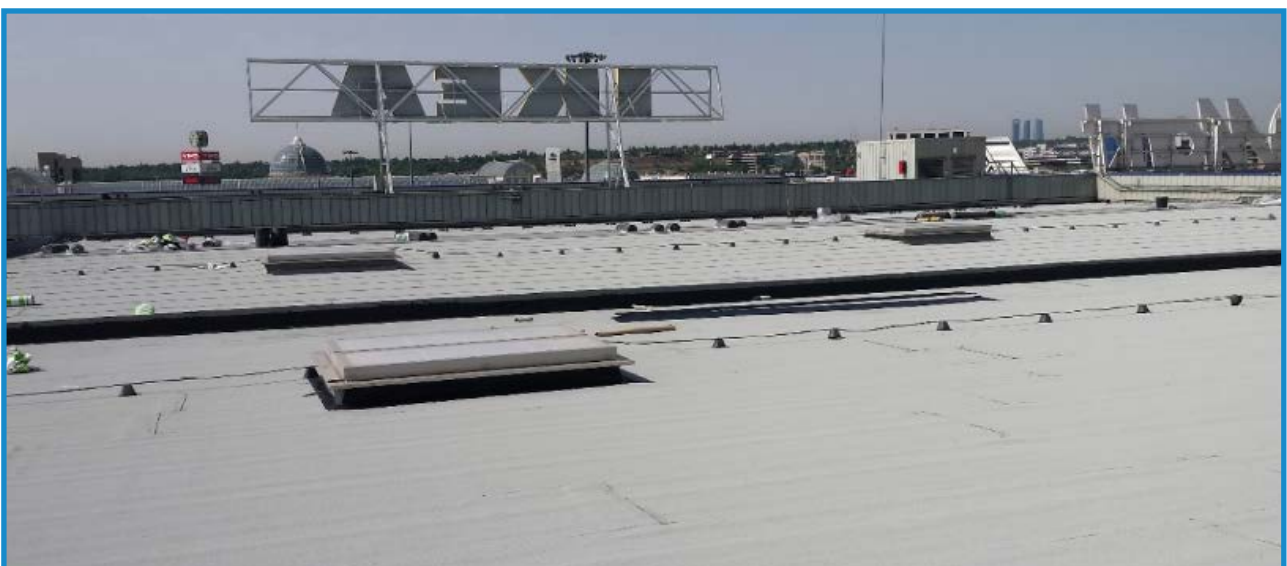


Figura 27: Ejemplo de aplicación de cubiertas de impermeabilización fotocatalíticas en edificios urbanos. Fuente BMI.

3.3.2.4 REVESTIMIENTOS CON PANELES DE ACERO VITRIFICADO FOTOCATALÍTICO

Las propiedades especiales de estos materiales, que combinan los beneficios del acero y las superficies recubiertas de esmalte vitrificado fotocatalítico, le confieren un fuerte argumento para su aplicación en múltiples usos, como la arquitectura de revestimientos exteriores, murales interiores, fachadas, revestimientos de túneles, clínicas, quirófanos o estaciones de transporte público, entre otros.

Los paneles de acero vitrificado fotocatalíticos, son productos terminados industrialmente y, por tanto, no son objeto de aplicación posterior o superficial tales como pinturas o las emulsiones.

Los esmaltes de acero vitrificado poseen unas magníficas capacidades frente a la durabilidad desde muchas perspectivas: el mantenimiento de la estética, las propiedades mecánicas, físicas, químicas, térmicas y eléctricas.

A continuación se listan algunos ejemplos de campos de aplicación:

Revestimiento de túneles

1. Revestimientos de pasos peatonales y bicicletas
2. Revestimientos de estaciones de metro, tren y autobuses
3. Revestimientos de aeropuertos
4. Revestimientos de fachadas y ascensores
5. Revestimientos de fachadas singulares
6. Revestimientos de quirófanos y salas limpias
7. Decoración y serigrafía
8. Diseño artístico e interiores



Figura 28: Ejemplo de posible aplicación en túneles



Figura 29: Ejemplo de posible aplicación en estaciones de metro



Figura 30: Ejemplo de posible aplicación en Terminales aeroportuarias

3.3.2.5 PINTURAS MINERALES CON BASE SILICATO FOTOCATALÍTICAS

Gracias a la combinación de pigmentos con efecto fotocatalítico y sistemas de ligantes minerales se ha podido desarrollar una solución que aúna durabilidad, autolimpieza y una contribución activa a la mejora de la calidad del aire.

Estas pinturas proporcionan tres efectos:

Efecto descontaminante

Las pinturas minerales fotocatalíticas ayudan en el exterior a degradar contaminantes atmosféricos como son los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre (SO_2), el amoníaco (NH_3), el monóxido de carbono (CO), disolventes, formaldehído o la suciedad superficial. Esto no disminuye la durabilidad de las pinturas con ligantes inorgánicos.



Figura 31: Fachada con pintura fotocatalítica en el Hotel Atlántico de la C/ Gran Vía de Madrid. Fuente: KEIM

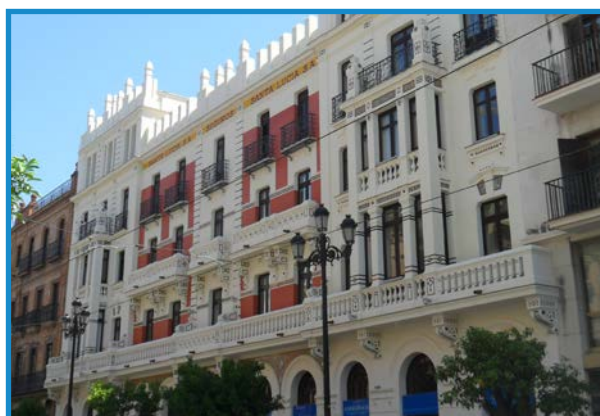


Figura 32: Fachada con pintura fotocatalítica en el Edificio Santa Lucía. Sevilla (España). Fuente: KEIM

Autolimpieza

Una superficie hidrófila favorece la autolimpieza de las fachadas después de entrar en contacto con la lluvia o la humedad del rocío. La pintura de fachadas de silicato con efecto fotocatalítico se vuelve hidrófila bajo los efectos de la luz. La pintura reduce la tensión superficial del agua, lo que facilita el arrastre de la suciedad.

Además estas pinturas al silicato son antiestáticas y no termoplásticas. Por consiguiente, las partículas de suciedad no se pueden adherir con facilidad a la superficie.



Figura 33: Fachada con pintura fotocatalítica en Ingeniero La Cierva. Cádiz (España). Fuente: KEIM

Secado muy rápido

Las pinturas al silicato no forman una película superficial, sino que crean una capa microporosa altamente transpirable. De esta forma, después de una exposición a lluvia, las superficies secan mucho más rápido que otras con carácter filmógeno. La superficie se mantiene seca durante más tiempo y no ofrece condiciones favorables para la proliferación de algas y hongos.

El ámbito de aplicación de estas pinturas es, fundamentalmente, para paramentos exteriores.

3.3.2.6 PINTURAS MINERALES CON BASE CAL FOTOCATALÍTICAS

Estas pinturas, con base cal, también pueden incorporar como aditivo fibras de grafeno, entre otros.

El ámbito de aplicación de estos productos es tanto para exteriores, como para interiores. En este último caso con capacidad bactericida y anti-moho.



Figura 34: Fachada del Pabellón Antonio García Martínez en Mairena del Alcor. Sevilla. Fuente: Graphenstone

3.3.2.7 PINTURAS PARA INTERIORES FOTOCATALÍTICAS

Se trata de productos monocomponentes pigmentados de secado a temperatura ambiente con propiedades de descontaminación ambiental, anti-microbiana y de autolimpieza, pudiéndose activar mediante luz solar o luz artificial.



Figura 35: Pintura de interior en guardería. Fuente: Levenger



Figura 36: Pintura de interior en gimnasio. Fuente: Levenger

Estas pinturas no necesitan imprimaciones o fijadores y son aplicables sobre pinturas acrílicas convencionales.

Cuando se aplican sobre materiales de construcción deben permitir la transpiración, evitando la formación de humedades.

Los ámbitos de aplicación de estas pinturas son Hoteles, Viviendas particulares, Colegios, Gimnasios, Restaurantes, Hospitales y áreas públicas y construcción en general.

3.3.3 OTROS PRODUCTOS

Además, es posible encontrar hoy en día en el mercado productos fotocatalíticos más específicos, como coatings incoloros autolimpiantes para protección de esculturas monumentales de ciudades, telas descontaminantes de protección de trabajos de rehabilitación de fachadas, telas descontaminantes para toldos (ver apartado Toldos descontaminantes), y tratamientos fotocatalíticos para las placas fotovoltaicas con capacidad autolimpiante para mejorar la eficiencia de los paneles, por poner algunos ejemplos.



Figura 37: Pintura fotocatalítica sobre monumentos históricos (izda) en comparación con otro sin tratar (dcha). Fuente: Levenger

3.3.4 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 se aplicaran todos conjuntamente sobre un barrio o zona localizada de una ciudad con altas cotas de contaminación? 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 creara 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.

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

En el caso de infraestructuras existentes, podrían aplicarse tratamientos superficiales sobre el firme o la acera existente, siempre y cuando se encuentren en buen estado y sin necesidad de colocar

pavimentos nuevos, repintando el mobiliario urbano (a nivel de conservación), rehabilitando fachadas existentes o impermeabilizando cubiertas existentes. De esta forma un barrio o calle actual podría ser convertido fácilmente en una isla fotocatalítica, sin modificar su configuración.



Figura 38: Simulación de aplicación del conjunto de materiales fotocatalíticos sobre un barrio genérico de una ciudad, creando 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 deben diseñar específicamente, como se puede observar en el apartado de Métodos de evaluación de actividad fotocatalítica, de este mismo documento. (Capítulo 5).

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, con el objetivo principal de respirar un aire más limpio dentro de una ciudad, zona o barrio con problemas de contaminación, y de reducir los costes de conservación (limpieza o re-pintados) de las envolventes de edificación, dado su carácter autolimpiante.

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

4. LEGISLACIÓN SOBRE CALIDAD DEL AIRE

La legislación española sobre calidad del aire actualmente en vigor viene representada por las siguientes normas:

- **Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.**

Esta Ley actualiza la base legal para los desarrollos relacionados con la evaluación y la gestión de la calidad del aire en España, y tiene como fin último el de alcanzar unos niveles óptimos de calidad del aire para evitar, prevenir o reducir riesgos o efectos negativos sobre la salud humana, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza. Mediante la misma se habilita al gobierno a definir y establecer los objetivos de calidad del aire y los requisitos mínimos de los sistemas de evaluación de la calidad del aire, y sirve de marco regulador para la elaboración de los planes nacionales, autonómicos y locales para la mejora de la calidad del aire.

- **Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.**

Esta norma transpone al ordenamiento jurídico español el contenido de la Directiva 2008/50/CE, de 21 de mayo de 2008 y la Directiva 2004/107/CE, de 15 de diciembre de 2004.

Se aprueba con la finalidad de evitar, prevenir y reducir los efectos nocivos de las sustancias mencionadas sobre la salud humana, el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza.

Este real decreto fue modificado por el Real Decreto 678/2014 para modificar los objetivos de calidad del sulfuro de carbono establecidos en la disposición transitoria única, y por el Real Decreto 39/2017, para transponer a nuestro ordenamiento jurídico la Directiva 2015/1480, que establece normas relativas a los métodos de referencia, validación de datos y ubicación de los puntos de medición para la evaluación de la calidad del aire ambiente, e incorporar los nuevos requisitos de intercambio de información establecidos en la Decisión 2011/850/UE. Además, este último real decreto prevé la aprobación de un Índice Nacional de Calidad del Aire que permita informar a la ciudadanía, de una manera clara y homogénea en todo el país, sobre la calidad del aire que se respira en cada momento.

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

Tabla 2
Valores de referencia según Real Decreto 102/2011

Contaminante	Valor límite diario Periodo de promedio: 24h	Valor límite anual Periodo de promedio: 1 año civil	Umbral de alerta
PM10 Partículas en suspensión <10 μ m	50 μ g/m ³ No podrá superarse en más de 35 ocasiones por año	40 μ g/m ³	
PM2,5 Partículas suspensión <2,5 μ m	25 μ g/m ³	25 μ g/m ³ Margen de tolerancia: 20% el 11 de junio de 2008, que se reducirá el 1 de enero siguiente y en lo sucesivo, cada 12 me- ses, en porcentajes idénticos anuales hasta alcanzar un 0 % el 1 de enero de 2015. El valor correspondiente para 2011 es de 3 μ g/m ³ 28 μ g/m ³ Valor límite para 2011	
Dióxido de azufre	350 μ g/m ³ No podrá superarse en más de 24 ocasiones por año civil	125 μ g/m ³ No podrá superarse en más de 3 ocasiones por año civil	500 μ g/m ³ Cuando durante 3 horas consecutivas se exceda dicho valor cada hora
Dióxido de nitrógeno	200 μ g/m ³ No podrá superarse en más de 18 ocasiones por año civil	40 μ g/m ³	400 μ g/m ³ Cuando durante 3 horas consecutivas se exceda dicho valor cada hora
Monóxido de carbono	10 mg/m ³ Periodo de promedio: máxima diaria de las medias móviles octohorarias		
Benceno		5 μ g/m ³	
Contaminante	Valor objetivo Parámetro: máxima diaria de las medias móviles octoho- rarias	Umbral de información Parámetro: promedio horario	Umbral de alerta Parámetro: promedio horario
Ozono	120 μ g/m ³ No podrá superarse en más de 25 días por cada año civil de promedio en un periodo de 3 años	180 μ g/m ³	240 μ g/m ³

El límite anual fijado (valor promedio anual) por directiva europea (40 μ g/m³), 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 (NO_x) entre 75-113 μ g /m³, o el que tienen la mayoría de países latinoamericanos, idéntico al de Estados Unidos, 50 μ g/m³.

Las concentraciones máximas permitidas de algunos contaminantes presentes en interiores tal y como aparecen determinados en los organismos internacionales para la salud, quedarían refundidas en la siguiente tabla. No hay normativa española a día de hoy a tal respecto.

Compuesto	Efectos en salud	Valor guía	Tiempo de exposición
Dióxido de azufre	Cambios en la función pulmonar en asmáticos. Aumento de los síntomas respiratorios en individuos sensibles	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 minutos
		125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 horas
		50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 año
Dióxido de nitrógeno	Ligeros cambios de la función pulmonar en asmáticos	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,1 ppm)	1 hora
		40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,02 ppm)	1 año
Monóxido de carbono	Nivel crítico de CO(Hb) <2,5%	100 mg/m^3 (90 ppm)	15 minutos
		60 mg/m^3 (50 ppm)	30 minutos
		30 mg/m^3 (25 ppm)	1 hora
		10 mg/m^3 (10 ppm)	8 horas
Ozono	Respuestas de la función respiratoria	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	8 horas
Formaldehído	Irritación en humanos de nariz y garganta	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30 minutos
Plomo	Nivel crítico de Pb en sangre <100-150 μg Pb/l	0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 año
Acroleína	Irritación ocular en humanos	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30 minutos
Diclorometano	Formación de COHb en sujetos normales	3 mg/m^3	24 horas
Estireno	Efectos neurológicos en trabajadores	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 semana
Tolueno	Efectos sobre el sistema nervioso central en trabajadores	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 semana
Xileno	Efectos sobre el sistema nervioso central en voluntarios humanos	4.800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 horas
	Neurotoxicidad en ratas	870 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 año

Fuente: OMS. 2005.

Figura 39: Valores Guía OMS de contaminantes ambientales, basado en efectos conocidos sobre la salud.
Fuente: OMS 2005

5. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA

5.1 NORMATIVA DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Hasta hace sólo unos años, en Europa existían tan sólo tres Normas de ensayos de laboratorio para el análisis de la capacidad fotocatalítica de los materiales en cuanto a abatimiento de concentraciones de óxidos de nitrógeno:

- **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 NO_x – 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.

Como en España no había una Norma de referencia y se comenzaban a demandar aplicaciones fotocatalíticas en el sector de la construcción, se comenzó empleando la Norma UNI 11247:2010 para materiales con rugosidad, tales como aglomerados asfálticos y hormigones, dejando la Norma ISO 22197-1, para materiales sin rugosidad o menor rugosidad, como los productos cerámicos y las pinturas, entre otros.

A continuación se muestra un resumen comparativo de las tres Normas:

	ISO 22197-1	UNI 11247	XP B44-011
Q (L/min)	3.0 ± 0.05	1.5 ± 0.075	3
Flujo	Laminar, 0.2 m/s	Turbulento	Laminar
E (W/m ²)	10 ± 0.5	20 ± 1	15
C _{NO} (ppb)	1000 ± 50	400 ± 50	500 ± 20
C _{NO2} (ppb)	-	150 ± 50	250 ± 20
T (°C)	25 ± 2.5	20 - 35	25 (15 - 40)
% HR	50		50 ± 5
Duración del ensayo	6 h		Mínimo 30' y C _{NOx} estable durante 10'
Tipo de luz	Luz negra o luz negra azul, 300 - 400 nm	Filamento Hg (Osram Vitalux)	UVA, 315 - 380 nm Vis, 380 - 780 nm
Medidas de la muestra (mm ²)	100x50	64 ± 6 (≤ 20% V)	200x100
Canal de paso del gas (mm ²)	50x5	-	100x5
Pretratamiento muestra	5h UV ≥ 10 W/m ² 2h agua desionizada Secado a T < 110 °C	3 días 25 ± 3 °C y 60 ± 10 % HR.	Depende de la muestra (pintura, cemento). Acondicionamiento, 24h a 60°C
Elución muestra	Sí, nitratos y nitritos por cromatografía líquida	-	-
Cantos sellados	Sí, parafilm	Sí, parafilm También, A > 64 cm ²	Sí, parafilm
Cálculos	NO adsorbido, NO eliminado, NO ₂ formado, NO _x desorbido, NO _x eliminado neto; N eluido (moles)	$A_c = 100 \times \frac{(C_B - C_L)}{C_B} \times \frac{I_N}{I} \times \frac{S_N}{S}$	[NO] _{t=0} ppbv [NO ₂] _{t=0} ppbv [NO] _t ppbv [NO ₂] _t ppbv Disminución (%)

Figura 40: Comparativa de condiciones de ensayo de las Normas Francesa (XP), Italiana (UNI) e Internacional (ISO).
Fuente: Eptisa-Aidico

Con el paso de los años en España se impuso el empleo de la Norma ISO 22197-1, como referencia para todo tipo de productos fotocatalíticos empleados en el sector de la construcción.

Posteriormente se elaboraron las siguientes Normas españolas, también referidas a niveles de abatimiento de óxidos de nitrógeno:

- **Norma Española:** UNE ISO 22197-1:2012: Cerámicas Técnicas (cerámicas avanzadas, cerámicas técnicas avanzadas). Método de ensayo relativo al funcionamiento de materiales fotocatalíticos semiconductores para la purificación del aire. Parte 1: eliminación de óxido nítrico. Esta Norma es la adaptación española a la Norma ISO 22197-1.

- **Norma Española:** UNE 127197-1:2013 (Versión corregida en fecha 2014-02-12). Aplicación del método de ensayo para evaluar el rendimiento en la purificación de aire mediante materiales semiconductores fotocatalíticos embebidos en productos prefabricados de hormigón. Parte 1: Eliminación de óxidos de nitrógeno. Esta Norma es igualmente una adaptación de la ISO 22197-1, con la diferencia del establecimiento de una jerarquía de clases, en función de su eficiencia descontaminante, y sólo para productos prefabricados de hormigón. Sin embargo, a falta de un protocolo claro de actuación, la aplicación de esta Norma se ha extrapolado para evaluar todo tipo de productos fotocatalíticos, con independencia de los materiales que lo componen.

Tabla 3
Norma UNE 127197-1:2013 para Clasificación de producto según el rendimiento de la purificación de aire NO_x en prefabricados de hormigón

Clase	Rendimiento de la purificación del aire NO _x
Clase 0 - sin actividad	$\chi\text{NO}_x < 4,0\%$
Clase 1	$4,0\% \leq \chi\text{NO}_x \leq 6,0\%$
Clase 2	$6,0\% < \chi\text{NO}_x \leq 8,0\%$
Clase 3	$\chi\text{NO}_x > 8,0\%$

- **Norma Española:** UNE 83321 EX/2017: Hormigón con actividad fotocatalítica. Determinación de la degradación de óxido nítrico (NO) en el aire por materiales fotocatalíticos. Método de flujo continuo. Esta Norma está basada en la especificación técnica del Comité Europeo de Normalización CEN/TS 16980-1, que ha sido propuesta recientemente para su aprobación como Norma Europea EN. Por tanto, esta norma de nueva elaboración aún no está extendida con carácter general en los laboratorios de control de actividad fotocatalítica.

No obstante, como las aplicaciones fotocatalíticas son muy diversas, a continuación se resumen en un listado las Normas internacionales empleadas tanto para evaluar su capacidad en exteriores, como en interiores:

Tabla 4
Resumen de Normas internacionales para evaluación de aplicaciones fotocatalíticas en exteriores e interiores

Capacidad	Método de ensayo	Convencionales (Exterior)		Ambiente Interior	
		Nº. Nacional	Nº. Internacional	Nº. Nac.	Nº. Internacional
Autolimpieza	Cambio ángulo con- tacto con el agua	JISR 1703-1:2007	ISO 27448-1:2010		ISO 19810:2017
	Azul de metileno	JISR 1703-2:2007	ISO 10678:2010		
	Rhodamina B	UNI 11259:2008			
Purificación del aire	Eliminación NOx	JISR 1701-1:2010	ISO 22197-1:2016 y CEN/ TS 16980-1		ISO Eliminación NOx 17168-1:2018
		UNI 11247:2010			
		UNI 11484:2013			
		XP B 44-011:2009			
	Eliminación VOCs	UNI 11238-1:2007			
		UNI 11238-2:2007			
		XP B 44-013			
	Acetaldehído	JISR 1701-2:2008	ISO 22197-2:2011 (actual- mente en revisión)		ISO 17168-2:2018
	Tolueno	JISR 1701-3:2007	ISO 22197-3:2011 (actual- mente en revisión)		ISO 17168-3:2018
	Formaldehído	JISR 1701-4:2008	ISO 22197-4:2013		ISO 17168-4:2018
	Metil-mercaptano	JISR 1701-5:2008	ISO 22197-5:2013		ISO 17168-5:2018
	Cámara de ensayo				ISO 18560-1:2014
Efecto Biocida	Actividad Antibacteriana	JISR 1702:2006	ISO 27447:2009		ISO 17094:2014
	Actividad Antibacte- riana (semi-húmeda)				ISO 22551:2020
	Actividad Antifúngica	JISR 1705:2008	ISO 13125:2013		
	Antiviral		ISO 18061:2014		ISO 18071:2016
	Antialga		ISO 19635:2016		
Agua	Dimetilsulfóxido		ISO 10676:2010		
Otros	Fuente de luz ultra- violeta	JISR 1709:2007	ISO 10677:2011		ISO 14605:2013
	Eficiencia cuántica		PWI 19728 (propuesta 2013)		
	Descomposición completa				ISO 19652:2018
	Oxígeno disuelto		ISO 19722:2017		
	Carbono orgánico total		CD 22601 (propuesta 2017)		
	Película de tinta		ISO 21066:2018		

Por último, cabe mencionar que el CEAM posee la Cámara Euphore, semiesfera que permite reproducir la contaminación ambiental de cualquier punto de una ciudad y realizar análisis de eficiencia fotocatalítica a escala 1:1, como se ha podido observar en los casos de estudio de los toldos (apartado 6.4) o los revestimientos cerámicos de fachada descontaminantes. (Apartado 6.5).

5.2 NORMATIVA DE 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 que sin embargo permiten conocer, el funcionamiento de estos productos, así como su eficacia a lo largo del tiempo, sin necesidad de afectar a la integridad del elemento constructivo (es decir, sin necesidad de extraer testigos).

En este sentido Empresas de Ingeniería, pioneras en el sector de la Fotocatálisis, como Eptisa, Servicios de Ingeniería, o Centros Tecnológicos de referencia, como el Instituto Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), han desarrollado equipos de evaluación *in situ* de la capacidad descontaminante de productos de construcción.



5.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN A ESCALA REAL

Los métodos de la evaluación del impacto de los materiales fotocatalíticos a escala real pueden llevarse a cabo en zonas controladas, como prototipos a escala casi real de tramos cañón (Proyecto LIFE PhotoPq) (simulación de efecto de calles confinadas entre edificios de gran altura), o en

escenarios reales eligiendo zonas adecuadas en una ciudad <http://www.lifeminoxstreet.com/life/documents/>, <https://life-equinox.eu/documentos/>.

Para la evaluación del impacto de la actividad de materiales fotocatalíticos *in situ* se pueden emplear diversos métodos de medición de la concentración de NO₂ en aire. Si bien, se podrían evaluar además otros contaminantes para evaluar el impacto que tendrían estos materiales en la calidad del aire. Las concentraciones de NO₂ sería el parámetro mínimo que habría que analizar. Hay que decir también que es el que resulta más sencillo y barato en términos de monitorización. Entre los métodos existentes para la medida de NO₂ en campo se pueden destacar los captadores pasivos, los sensores de bajo coste y el método oficial.

La medida de NO₂ siguiendo el método oficial, que es el que se emplea en las estaciones de vigilancia de calidad del aire, que tienen las ciudades y otras administraciones, requiere de equipos y procedimientos que resultan muy costosos para evaluar un material fotocatalítico.

El procedimiento pasivo de captación de NO₂ tiene su fundamento en los fenómenos de difusión y permeación (Comunidad de Madrid, 2016). De esta forma, las moléculas de un gas, que están en constante movimiento, son capaces de penetrar y difundirse espontáneamente a través de la masa de otro gas, hasta repartirse uniformemente en su seno. En el difusor pasivo se produce un gradiente de concentraciones del contaminante a determinar entre la concentración en el ambiente exterior y la concentración nula de este contaminante en el aire interior del agente absorbente. Este gradiente de concentraciones es la fuerza que mueve, por difusión, al contaminante desde el ambiente exterior, a través del captador, hasta llegar al absorbente.

La variedad de modelos de muestreadores pasivos disponibles en el mercado es creciente. La diferencia fundamental entre ellos se concreta en los materiales empleados como soporte de captación, que incluyen una amplia gama de sustancias, algunas de las cuales son las mismas que se utilizan en los sistemas activos.

Para realizar el seguimiento de la concentración de NO₂ con este sistema se necesita la instalación de un número adecuado de captadores y además situar algunos de ellos en una estación de referencia.

El hándicap fundamental para la utilización de este tipo de captadores es que el tiempo típico de muestreo es de un mes lo que hace que los perfiles disponibles para la evaluación de la influencia de materiales fotocatalíticos en la calidad del aire sea mensual, una resolución temporal baja y además requiriendo muestreos más largos.

La ventaja fundamental de este método sería la sencillez y el bajo coste.

Los denominados “sensores de bajo coste” suponen una alternativa intermedia entre las dos formas de medición anteriores. Estos sensores permiten una resolución temporal muy alta pero la fiabilidad y la sensibilidad de la información que proporcionan no alcanza a la del método oficial. Sin embargo, para este tipo de ensayos pueden ser adecuados buscando localizaciones con altos niveles de NO₂.

Existen varios dispositivos en el mercado con costes que oscilan entre los 3.000 y los 6.000€ que pueden emplearse para la monitorización de la zona de ensayo. El número de dispositivos necesarios dependerá de la superficie y de la metodología elegida para llevar a cabo la evaluación.

En relación a la metodología para realizar la evaluación del impacto de la aplicación de materiales fotocatalíticos en un área determinada hay que indicar que ha de contemplar que se busca identificar cambios en la concentración de NO_2 por parte de estos materiales en series temporales de datos que están influenciados además por otros factores -como los meteorológicos y el tráfico- que tienen una mayor influencia.

Por ello se recomienda diseñar una adecuada metodología de monitorización e incorporarla en los Pliegos de Condiciones de los Proyectos, si lo que se pretende es evaluar la eficiencia descontaminante final de este tipo de productos. Ejemplos de una metodología de estas características aplicada a gran escala serían el caso del proyecto LIFE PHOTOSCALING o el Proyecto LIFE EQUINOX. (<https://life-equinox.eu/documentos/>)

5.4 MODELOS DE PREDICCIÓN

Además de los métodos disponibles comentados anteriormente que requieren una monitorización específica, se puede emplear modelado para estimar el impacto que tendría la aplicación de productos fotocatalíticos en una zona determinada.

Existen varios estudios realizados que describen la metodología empleada. Se han empleado desde softwares comerciales como el ADMS (<https://life-equinox.eu/documentos/>) hasta modelos avanzados de mecánica de fluidos computacional <http://www.lifeminoxstreet.com/life/documents/> (CFD, por sus siglas en inglés).

Hay que comentar sin embargo, que la utilización de estos métodos requiere tanto medios como experiencia para poder tener unos resultados con un cierto grado de fiabilidad. Normalmente, tanto los medios como la experiencia, solo se suelen encontrar en universidades, organismos de investigación y centros tecnológicos. Aunque pueden ser adecuados para estimar el impacto que pueden tener estos materiales en la calidad del aire sin implementaciones en campo, **hay que asumir aún considerables grados de incertidumbre asociados a los propios modelos y a la información de entrada a los modelos.**

6. CASOS DE ESTUDIO

6.1 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS

6.1.1 PROYECTO VILLAVERDE

Dentro del Programa Operativo FEDER Madrid 2007-2013 (Iniciativa Urbana), el Ayuntamiento de Madrid adjudicó la primera obra de aplicación de productos fotocatalíticos a gran escala en España, sobre una superficie total de unos 21.000 m² en el distrito de Villaverde (Proyecto de innovación y desarrollo tecnológico en materia de fotocatalisis para la descontaminación del aire ambiente: aplicación de pavimentos y revestimientos sostenibles para la descontaminación del aire mediante la eliminación de óxidos de nitrógeno en el Distrito de Villaverde).

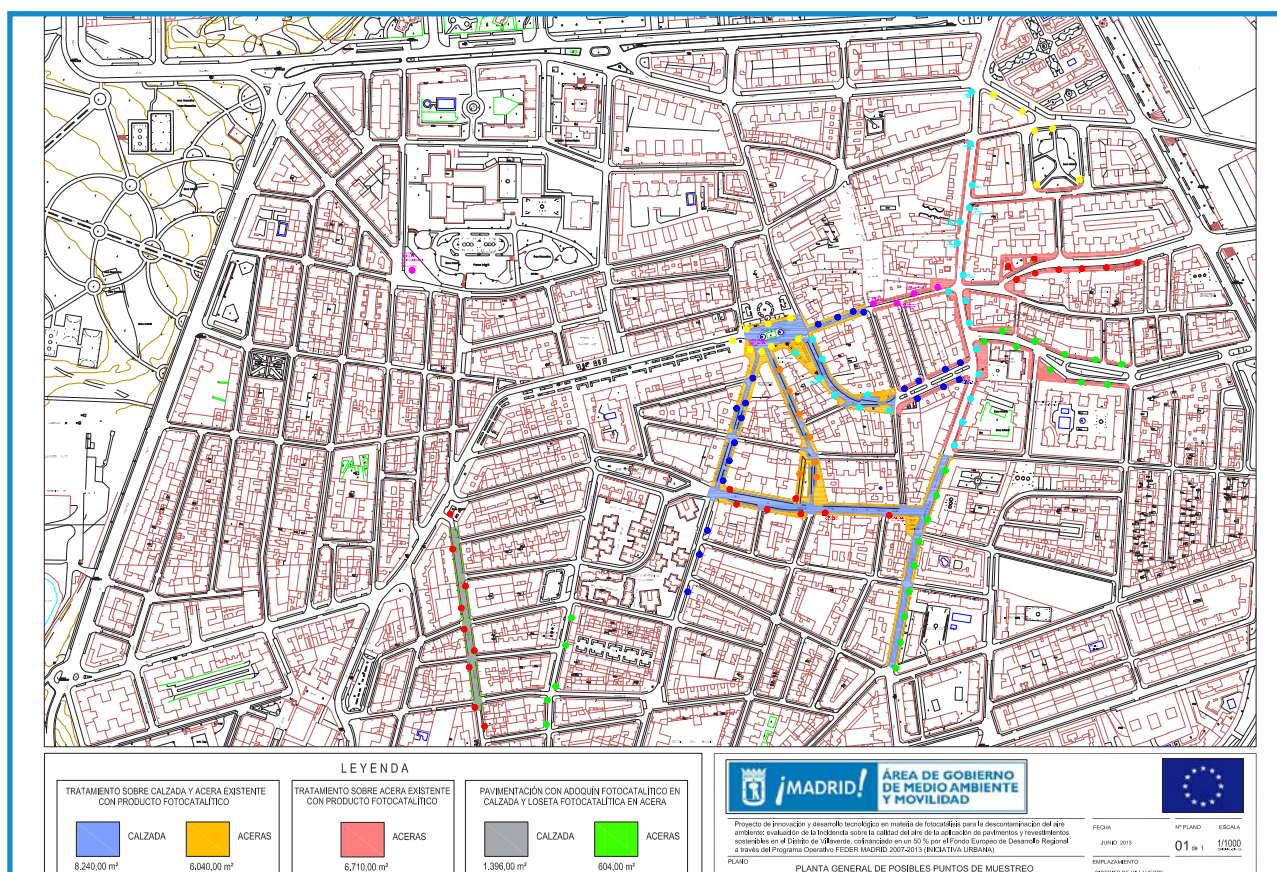


Figura 42: Distrito de Villaverde – áreas de aplicación de los productos fotocatalíticos. Fuente: Ayto. de Madrid

La empresa adjudicataria de esta obra fue ALVAC SA, que, en colaboración con Impresa Bacchi srl, realizó la obra en noviembre del 2014, con la aplicación del revestimiento superficial fotocatalítico sobre los pavimentos de aceras (adoquines y losas de hormigón y piedra natural) y calzadas bituminosas.

El Ayuntamiento de Madrid, a través de la UTE Eptisa – Fundación Cartif, llevó a cabo la evaluación de la incidencia de estas aplicaciones en la calidad del aire ambiente mediante:

- Campañas de medición de dióxido de nitrógeno con captadores pasivos tipo tubo.
- Monitorización en continuo de óxidos de nitrógeno y ozono, según método de referencia, y de variables meteorológicas y de radiación UV-A.
- Red experimental inalámbrica de sensores de gases basados en la tecnología metal-óxido o electroquímica.
- Medida del tráfico, mediante aforos.

Los resultados del proyecto no han sido publicados por el momento, que se tenga constancia, pero en las jornadas y congresos donde se ha presentado este estudio, por parte del Ayuntamiento de Madrid se ha manifestado, por una parte la dificultad de la interpretación de las mediciones obtenidas por los distintos aparatos y sensores, por otra, se confirma que la aplicación de esta tecnología no aumenta las concentraciones de ozono, O_3 , ni las partículas en suspensión $PM_{2,5}$ y PM_{10} , en cuanto a afecciones a la salud se refiere, y por otra, que los resultados finales de eficiencia descontaminante al cabo de un año son casi despreciables.

Los fabricantes y aplicadores, por su parte, reportan que una parte de la aplicación de este tratamiento se hizo sobre pavimentos en mal estado y bajo condiciones meteorológicas adversas (lluvias durante la ejecución). Tampoco se conocen las operaciones de mantenimiento y su frecuencia asociada, en su caso, que el Ayuntamiento pudiera haber llevado a cabo tras la aplicación del tratamiento.



Figura 43: Analizador automático en continuo para la determinación en el aire ambiente de óxidos de nitrógeno (NO , NO_2 , NO_x) y de ozono (O_3) puesto en la plaza de Ágata. Fuente: Eptisa.

6.1.2 PROYECTO LIGHT2CAT

Se trata de un proyecto de I+D (<https://www.facebook.com/Light2cat>) destinado a la mejora de la calidad del aire atmosférico, financiado por el Séptimo Programa Marco de la Unión Europea (FP7). El proyecto está liderado por el Instituto Tecnológico Danés y la participación española estaba formada por la Empresa HERMO, el Instituto Tecnológico de la Construcción (AIDICO), por la Fundación InnDEA Valencia y por el Ayuntamiento de Valencia.

La tecnología desarrollada consistió en el empleo de hormigones fotocatalíticos para la fabricación de baldosas de hormigón prefabricadas para pavimento peatonal, de elevada eficiencia bajo luz visible (artificial).

La calle elegida para este piloto fue Félix Pizcueta, donde se instaló un equipo de medida de la contaminación existente antes de la incorporación del pavimento fotocatalítico, con objeto de registrar medidas de concentraciones de NO_x antes y después de la incorporación del pavimento fotocatalítico.

Los trabajos de ejecución del pavimento peatonal fotocatalítico de baldosas comenzaron el 8 de Enero de 2015 y finalizaron a finales de Febrero de 2015.



Figura 44: Localización de la calle donde se desarrollaría el piloto a escala real. Fuente: Light2cat.



Figura 45: Equipo de medición de la calidad del aire en C/ Félix Pizcueta. Valencia. Fuente: Light2cat.



Figura 46: Suministro de baldosas prefabricadas con hormigón fotocatalítico. Fuente: Light2cat.

A la finalización del proyecto, a mediados del año 2015, se obtuvieron los primeros resultados y las primeras conclusiones. Para la interpretación de las mismas se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- No se dispone de datos del mes de Marzo de 2015
- Las medidas tomadas corresponden a 3 meses antes de la instalación del pavimento fotocatalítico y otros 2 meses después.
- La calle donde se realizó el piloto estuvo parcialmente cerrada al tráfico durante unos días del mes de Abril, debido a obras en la calzada.
- Se ha reducido la capacidad de la calzada de la calle, de dos a un carril.

Con los valores de concentraciones de NO_x , también se tomaron datos de radiación solar media, humedad relativa ambiente y temperatura ambiente. Todos ellos se corresponderían con valores medios medidos por mes.

Las conclusiones que se aportaron a la finalización del estudio, teniendo en cuenta los aspectos anteriormente mencionados fueron: “Se puede concluir que, aparentemente y a falta de tener un contraste mayor, sí se aprecia una reducción de concentraciones de NO_x en la calle donde se ha realizado el piloto”.

A mediados del año 2019, el Científico y Profesor Andrea Folli (School of Chemistry, Cardiff University), en relación al seguimiento del Proyecto Light2cat, comentó en la Jornada de presentación de conclusiones del Proyecto LIFE Photoscaling, en la cual intervino como ponente, que este pavimento actualmente, es decir, más de 4,5 años después de su aplicación, sigue teniendo eficiencia descontaminante.

	Nox ppb	Radiacion solar media	RH_Amb	T_Amb
Noviembre	65,3	71,5	64,8	17,1
Diciembre	95,1	51,9	58,7	12,8
Enero	82,4	58,1	55,4	12,4
Abril	27,9		63,9	16,9
Mayo	39,7		55,1	21,9

Valores medios por mes

Figura 47: Resultados de lecturas de parámetros en Proyecto Light2cat

6.1.3 PROYECTO LIFE EQUINOX

El objetivo general de este Proyecto (<https://life-equinox.eu/>), coordinado por Fundación Cartif y con el Ayuntamiento de Madrid, ELSAN y REPSOL como socios, era evaluar la eficacia de un tratamiento superficial fotocatalítico en base acuosa, cuyo diseño y formulación formaba parte del de un proyecto previo (dentro del Marco del Proyecto Fénix: www.proyectofenix.es), en la eliminación de óxidos de nitrógeno de una zona urbana. La evaluación del impacto del tratamiento se realizó empleando una monitorización *in situ* de la concentración de NO₂. Además, empleando el software ADMS road (<https://www.cerc.co.uk/environmental-software/ADMS-Roads-model.html>) se modelizó la calidad del aire de la zona y el posible impacto del tratamiento en las distintas épocas del año.

Tras el diseño y formulación del tratamiento superficial fotocatalítico, se llevó a cabo una aplicación, en dos fases, sobre un total de 95.100 m² de superficie asfaltada existente en el Barrio de Chamberí (Madrid). En esta zona hay vías con Intensidades Medias Diarias (IMD) que pueden llegar hasta los 80.000 vehículos por día y otras que se encontraban alrededor de los 10.000 vehículos por día. Para analizar la eficiencia de este tratamiento concreto se estableció una red de sensores y un modelo predictivo, a tal fin, además de la evaluación de la eficiencia sobre la extracción de testigos y su posterior ensayo a escala laboratorio.

Para el análisis de toda la información recogida se desarrolló una metodología aplicable a series de datos de calidad del aire para tratar de identificar diferencias significativas entre la calidad del aire antes y después de la aplicación del tratamiento fotocatalítico. Para aplicar dicha metodología, se tomaban como referencia tramos similares en tráfico y disposición y relativamente próximas a la zona de ensayo. De esta forma se podía evaluar la influencia de otras variables que afectan mucho a la calidad del aire.

El análisis de los resultados de la red de sensores no mostró resultados concluyentes de la efectividad del tratamiento en la mayoría de los tramos de estudio y de las condiciones de estudio evaluadas. Se encontró que para muchos tramos, durante los 3-4 primeros meses después de la aplicación se veía una reducción en la concentración de NO₂ frente a la esperada pero esta reducción no era estadísticamente significativa como para asegurar que se debía al tratamiento fotocatalítico. Sin embargo,



Figura 48: Detalle de sensor instalado en zona de aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico. Fuente: Cartif.

hay que destacar que durante la segunda fase de la aplicación a escala real, el tratamiento sí mostró registros que sugerían reducciones de la concentración de NO_2 estadísticamente significativas en un 42% y en un 25% frente a las esperadas respectivamente, para los tratamientos ejecutados en las calles de Alberto Aguilera y Ruiz Jiménez durante el primer mes después de la aplicación.

De los testigos ensayados, a escala laboratorio, en condiciones normalizadas (ISO 22197:1), se obtuvieron resultados medios en el entorno del 10% de reducción de NO_x , mostrando además una gran dispersión de resultados. Esta gran dispersión en los resultados mostraba que la aplicación tiene que realizarse adecuadamente para asegurar una mínima homogeneidad. Además, el estado del pavimento también influye en este resultado.

El estudio de modelado realizado mostró que, en ciertas situaciones, el tratamiento tiene un impacto positivo en la reducción de la concentración de NO_2 y en otras (fundamentalmente en épocas de inestabilidad atmosférica) el impacto es inapreciable en línea con lo encontrado cuando se emplearon sensores de NO_2 .

Como conclusiones finales se podría citar que la durabilidad del tratamiento diseñado expreso para este proyecto debería aumentarse (pero hay que tener en cuenta el reto que supone el alto valor de IMD registrado en la zona), con objeto de demorar futuras intervenciones, pues de lo contrario, debería aplicarse al menos 2 veces por año para asegurar su eficiencia descontaminante. En este sentido la recomendación, a nivel de mantenimiento, sería su aplicación en otoño para conseguir los mejores resultados durante los episodios de inversión térmica (suelen provocar periodos de altas concentraciones de contaminantes) que se producen durante los últimos días del otoño y el invierno. Sin embargo, se cree que una mayor investigación en el tratamiento puede conducir a aumentar la durabilidad del tratamiento y se recomienda que los tratamientos que se desarrollen para este tipo de aplicación se prueben en pequeños tramos en condiciones reales con altas IMD de tráfico antes de escalar el resultado.

En relación al impacto del tratamiento de materiales fotocatalíticos en pavimentos asfálticos se puede decir que no es sencillo de apreciar su efecto en la concentración de NO_2 a escala real. La gran cantidad de factores que afectan a la concentración NO_2 y que tienen una gran variabilidad horaria, diaria, semanal y estacional dificultan encontrar el impacto del tratamiento fotocatalítico en series temporales de la concentración de NO_2 . En este sentido se recomienda emplear una metodología de análisis de datos que tenga en cuenta estas variables y que estadísticamente pueda identificar cambios significativos debidos al tratamiento fotocatalítico como la desarrollada en este Proyecto.

Por otra parte, no se realizó un análisis de la viabilidad económica de la aplicación de este tratamiento como tal, pero un sencillo estudio de costes ha mostrado que el coste de la aplicación del tratamiento descontaminante es muy bajo en comparación con el coste de las operaciones de mantenimiento más habituales realizadas en pavimentos asfálticos. Además, estas aplicaciones son compatibles con la realización de otras operaciones como las de renovación de capa de rodadura, el re-pintado de las marcas viales u otras, lo que permite reducir el coste asociado a operarios y operaciones auxiliares. Realizar un análisis de la viabilidad económica del mismo, supondría disponer al menos de información sobre los costes reales que tiene la baja calidad del aire urbano en daños a la salud humana y del patrimonio (este ejercicio no se ha realizado en este proyecto).

Toda esta información ha sido extractada, casi literalmente del Documento, *Final Report* del Proyecto (<https://life-equinox.eu/documentos/>).

6.1.4 PROYECTO LIFE MINOX STREET

Este proyecto, finalizado en 2018 y financiado dentro del programa LIFE+ de la UE, ha sido coordinado por Ineco y ha contado con la participación del CIEMAT, el Ayuntamiento de Alcobendas y el CEDEX. Su objetivo ha sido evaluar la reducción mediante fotocatalisis de la contaminación del aire –fundamentalmente los óxidos de nitrógeno-, emitido por el tráfico en las ciudades. El proyecto ha pretendido ofrecer a las autoridades locales directrices en el uso de esta tecnología para la gestión de la calidad del aire. Para ello se seleccionaron 26 productos fotocatalíticos comerciales presentes en el mercado en 2014, para ser aplicados sobre tres tipos de superficies (calzadas, aceras y fachadas) en 2 escenarios urbanos diferentes de la ciudad de Alcobendas. Se determinaron sus eficiencias mediante ensayos de laboratorio según norma ISO 22197-1 hasta seleccionar los más eficientes para ser aplicados en condiciones de ensayo controlado y posterior ensayo en campo en condiciones reales. Se desarrolló un modelo numérico a microescala de la química atmosférica urbana considerando el efecto sumidero de NO_x en presencia de materiales fotocatalíticos.

Para la selección de los materiales fotocatalíticos más eficientes, además de determinar su eficiencia, se realizó una batería de ensayos de caracterización mecánica, durabilidad y envejecimiento. Finalmente se seleccionaron los materiales determinados como más eficientes tanto para pavimentos bituminosos sobre asfalto, como para pavimentos de hormigón para aceras y pinturas para fachadas.

Los ensayos acelerados de firme a escala real se realizaron en la pista de Ensayo del CEDEX con objeto de valorar la resistencia mecánica, resistencia al deslizamiento, sensibilidad al agua, contenido de huecos y pérdida de partículas de los diferentes materiales fotocatalíticos. En el caso de los pavimentos de hormigón, se llevaron a cabo ensayos físicos (caracterización de propiedades mecánicas), controles geométricos, ensayos de absorción de agua, resistencia a la rotura, resistencia al desgaste, resistencia al deslizamiento y resistencia al hielo-deshielo.

Una vez realizados estos estudios iniciales, se identificaron los productos con mejor comportamiento para su aplicación en obra, a escala real y su posterior seguimiento. Este seguimiento se realizó desde dos puntos de vista: seguimiento a escala real, mediante toma de muestras y ensayos de laboratorio de eficiencia descontaminante según norma y mediante modelos de predicción ambiental.

Algunos de los fabricantes que han participado en este proceso han publicado en su página web los resultados de las investigaciones realizadas con su producto. Concretamente, una micro-emulsión con base acuosa, Coverlite®, se ha aplicado sobre un soporte asfáltico existente (mezcla de tipo S12, actualmente denominada AC 16 SURF) y también sobre un soporte de hormigón existente.

A continuación se muestran algunos de los resultados más significativos de la aplicación sobre pavimento bituminoso, que ha declarado esta empresa:

A. Reducción de concentraciones de NO_x , en cuanto a la resistencia a envejecimiento

Se han realizado ensayos manteniendo las muestras en condiciones de intemperie, situándolas en un panel con orientación sur y ángulo de inclinación de 45° (latitud $40^\circ 27' 20''$ N, longitud $3^\circ 43' 48''$ W) tras una exposición de 1.500 h. En estas condiciones las muestras permanecen expuestas

a los cambios de radiación solar, variación de la temperatura y humedad así como concentración de óxidos de nitrógeno y otros contaminantes presentes en el aire exterior, características del ciclo día-noche.

A la luz de estos resultados se sugiere que este producto concretamente tiene una **buena resistencia a envejecimiento**, pues su eficiencia descontaminante no sólo no se ha reducido, sino que ha aumentado con el tiempo.

Muestra	Descripción	Área muestra cm ²	FOTO
M14A	Pavimento bituminoso S12, aditivado con Coverlite (enviado por la empresa Bacchi, febrero 2014)	48,5	
M14B	Pavimento bituminoso D12 sin envejecer, aditivado con Coverlite (enviado por la empresa Bacchi, abril 2014)	48,5	
M14C	Pavimento bituminoso envejecido, D12, aditivado con Coverlite (enviado por la empresa Bacchi, abril 2014)	48,0	

Figura 49: Codificación de muestras y aspecto. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET

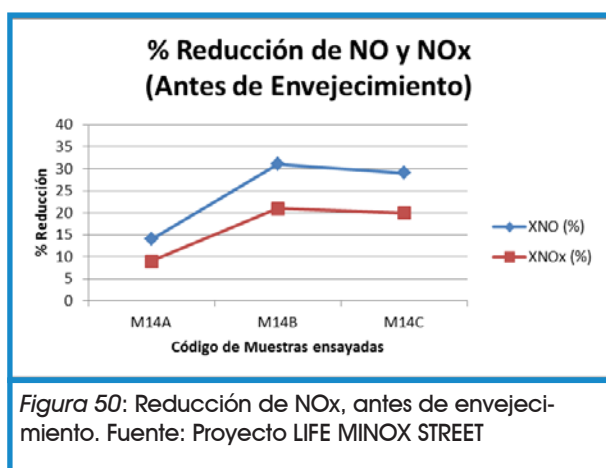


Figura 50: Reducción de NOx, antes de envejecimiento. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET

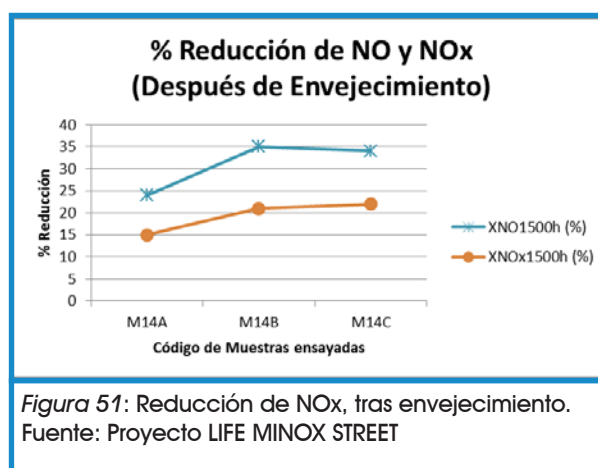


Figura 51: Reducción de NOx, tras envejecimiento. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET

B. Influencia en las características de una mezcla bituminosa de tipo AC 16, cuando se aplica sobre ella

Se han realizado ensayos de sensibilidad al agua sobre probetas sobre una muestra patrón convencional y sobre la misma muestra, pero con la aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico.

Aunque no se dispone de datos suficientes para poder establecer conclusiones, en este ensayo en concreto se observa una ligera reducción en la sensibilidad al agua de la mezcla cuando se le aplica el tratamiento fotocatalítico.

Se han realizado ensayos de resistencia a la deformación permanente sobre probetas sobre una muestra patrón convencional y sobre la misma muestra, pero con la aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico. Los resultados obtenidos, tampoco pueden ser concluyentes, dado el escaso número de ensayos ejecutados, pero en este ensayo en concreto se observa una ligera **mejora en la resistencia a la deformación** de la mezcla cuando se le aplica el tratamiento fotocatalítico.

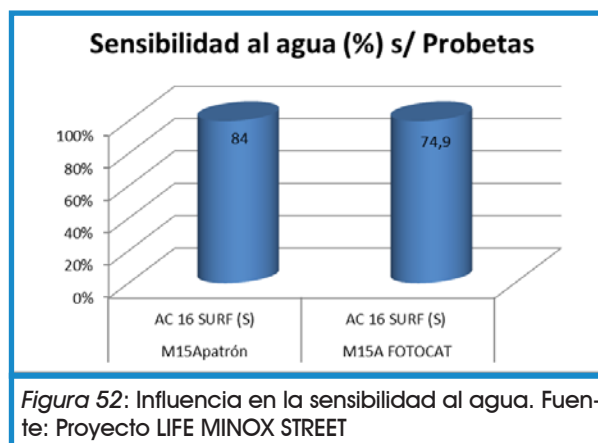
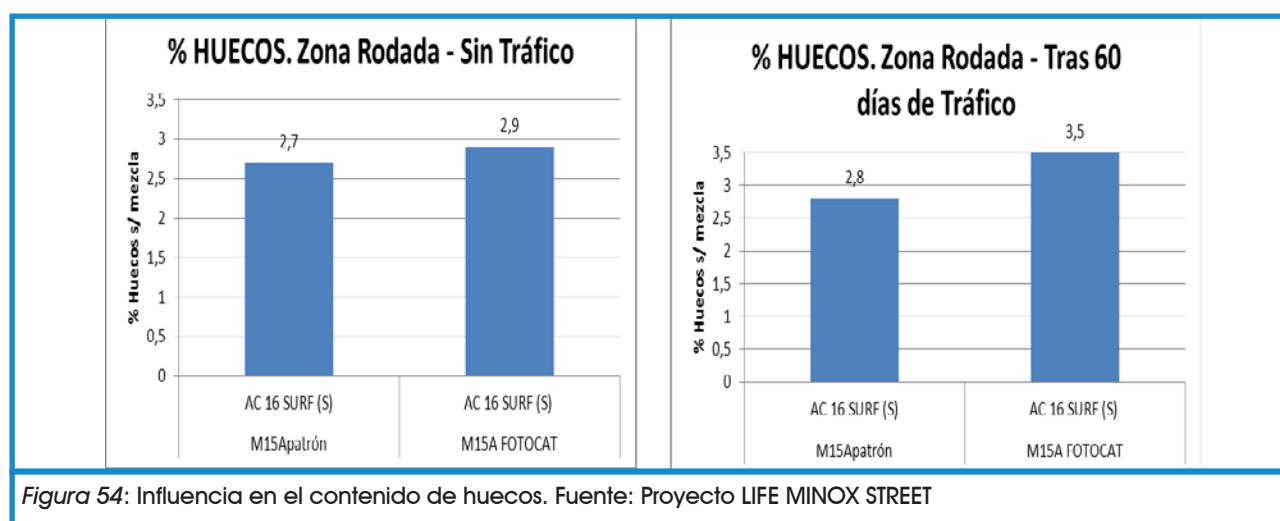
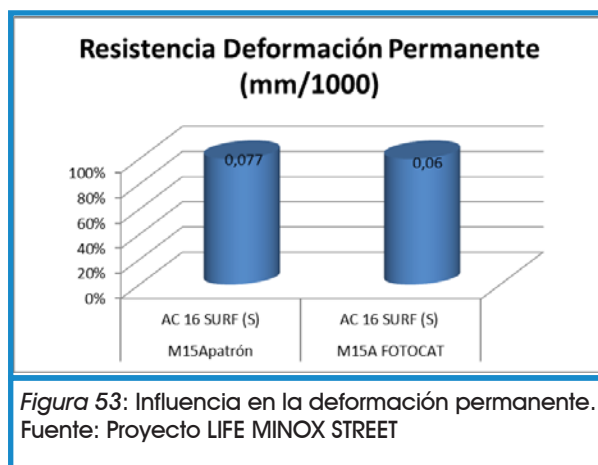


Figura 52: Influencia en la sensibilidad al agua. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET

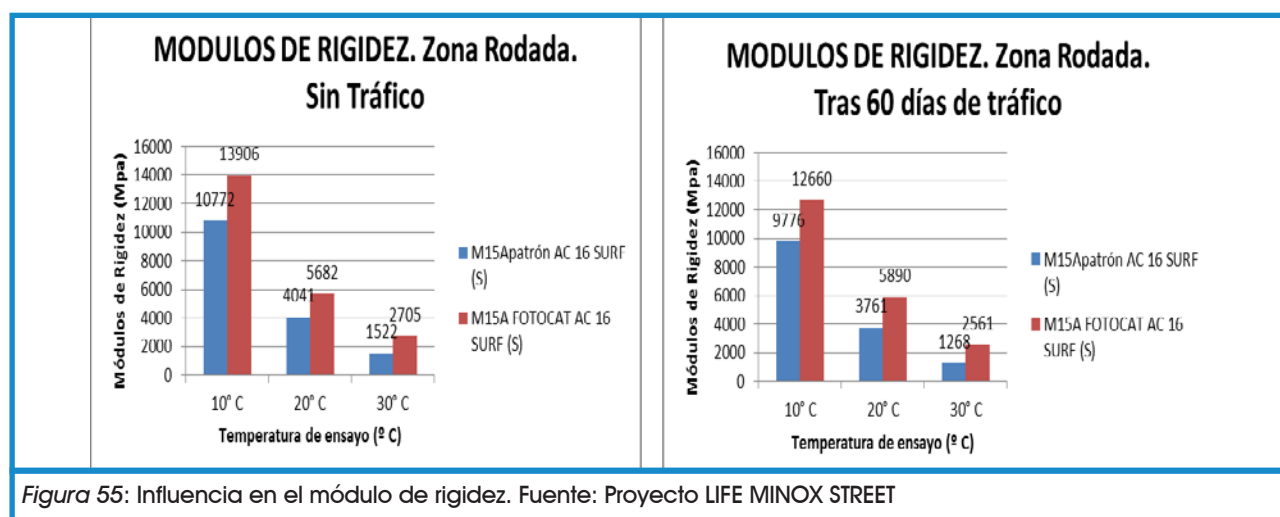
De la misma manera, se han realizado ensayos de contenido de huecos en la muestra (antes y después de la simulación del paso del tráfico durante 60 días) sobre probetas sobre una muestra patrón convencional y sobre la misma muestra, pero con la aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico.

Aunque no se dispone de datos suficientes para poder establecer conclusiones, en estos ensayos en concreto se observa un ligero aumento de los huecos cuando se le aplica el tratamiento



fotocatalítico, lo cual no tiene sentido alguno. Se entiende que no se modifica esta propiedad de la mezcla y los resultados no han tenido en cuenta la incertidumbre del ensayo.

También se ha estudiado el módulo de rigidez de las mezclas con y sin este tratamiento (sin tráfico y tras el paso de tráfico durante 60 días), obteniendo resultados muy elocuentes, pues parece claro que hay una fuerte tendencia a que el **tratamiento fotocatalítico mejora ostensiblemente las propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa**. Tampoco parece que el paso del tráfico modifique las propiedades mecánicas del tratamiento fotocatalítico.



Por último, en la tabla a continuación se observan resultados de análisis de resistencia al deslizamiento y de textura superficial, donde se puede observar que la muestra fotocatalítica, de código M15B, presenta una considerable reducción de la resistencia al deslizamiento, en el momento inicial de la aplicación, pero que tiende a igualarse con su homóloga patrón, con el paso del tráfico. Y que por otra parte, posee las mismas propiedades a nivel de textura que en el caso de la muestra patrón.

De la misma manera que con el pavimento bituminoso, este fabricante ha declarado y publicado el comportamiento de su tratamiento superficial fotocatalítico, a partir de microemulsión con base acuosa, sobre un pavimento de hormigón.

A continuación se muestran algunos de los resultados más significativos, haciendo más hincapié en la muestra codificada como M8C:

Muestra	Descripción	Área muestra cm ²	FOTO
M8A	Baldosa Valdelafuente Gris	47,5	
M8B	Terrazo 36 pastilla Rojo	46,0	
M8C	Terrazo 36 pastilla Blanco	45,6	

Figura 57: Presentación de muestras ensayadas con tratamiento fotocatalítico sobre loseta hidráulica.
Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET

ENSAYOS DE AUSCULTACIÓN DURANTE ENSAYO DE DESGASTE					
COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO – UNE-EN 13036-4					
	MOMENTO INICIAL	TRAS 15 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 30 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 45 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 60 DÍAS DE TRÁFICO
ZONA RODADA					
M15Bp (patrón)	52	50	50	51	51
M15B	45	42	44	47	51
ZONA NO RODADA					
M15Bp (patrón)	78	78	78	78	77
M15B	54	63	62	69	73
ENSAYO DE CÍRCULO DE ARENA (mm) – UNE-EN 13036-1					
	MOMENTO INICIAL	TRAS 30 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 45 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 60 DÍAS DE TRÁFICO	
ZONA RODADA					
M15Bp (patrón)	1,54	1,54	1,54	1,54	
M15B	1,62	1,60	1,56	1,54	
ZONA NO RODADA					
M15Bp (patrón)	1,97	2,00	1,97	1,94	
M15B	2,21	2,21	1,97	1,94	
ENSAYO DE MEDIDA DE TEXTURA MEDIANTE PERFILES DE SUPERFICIE (mm) – UNE-EN ISO 13473-5					
	MOMENTO INICIAL	TRAS 15 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 30 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 45 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 60 DÍAS DE TRÁFICO
ZONA RODADA					
M15Bp (patrón)	1,360	1,386	1,373	1,366	1,372
M15B	1,362	1,345	1,342	1,362	1,359
ZONA NO RODADA					
M15Bp (patrón)	1,360	1,375	1,362	1,359	1,368
M15B	1,379	1,366	1,371	1,381	1,384

Figura 56: Influencia en la resistencia al deslizamiento y a la macrotextura. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET

En cuanto a la eliminación de concentraciones de NO_x, se han obtenido resultados que alcanzan hasta el 30%.

	X _{NO} (%)	X _{NOx} (%)	NO _x _e (μmol)	NO _e (μmol)	NO _{2f} (μmol)
M8A	41	30	11,4	15,7	4,0
M8B	28	22	8,2	10,9	2,8
M8C	32	24	9,1	12,0	3,1

Figura 58: Resultados de eliminación de NO_x sobre loseta hidráulica. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET

A continuación se muestran los resultados de caracterización de la loseta hidráulica, donde se pueden comparar los obtenidos en la loseta convencional, denominada, loseta patrón (M8Cp (patrón), con la loseta tratada fotocatalíticamente, M8C (material con Coverlite®).

A la luz de los resultados se podría concluir (ocurre lo mismo con el resto de muestras caracterizadas), que **la aplicación de este tratamiento superficial fotocatalítico sobre estas losetas hidráulicas no compromete el cumplimiento de los resultados de caracterización de estos materiales.**

A continuación se procede a listar algunas de las conclusiones y recomendaciones de aplicación alcanzadas con estos estudios:

a. Se deberán elegir ubicaciones con buena exposición solar, idealmente con radiaciones mínimas de 8 W/m² y vientos moderados.

b. La humedad relativa óptima será la comprendida entre el 20 y el 60%.

c. Se deberá identificar el tipo de sustrato sobre el que se va a aplicar el material fotocatalítico: La rugosidad, la absorción, la formulación y la dotación juegan un papel muy significativo.

d. El sustrato sobre el que se aplicará el tratamiento fotocatalítico deberá estar en buen estado, seco y libre de cualquier tipo de suciedad.

e. Las aplicaciones fotocatalíticas no deben hacerse en condiciones meteorológicas adversas (las habituales en los pliegos de las obras civiles convencionales)

f. Existen productos con buena capacidad de descontaminación, superior al 50%, en condiciones controladas, que al ser aplicados en condiciones reales pierden relativamente rápido a medio plazo su eficiencia (meses).

g. Un producto de los ensayos sobre asfalto ha acreditado reducciones de NO_x superiores al 10% tras más de un año y medio desde su aplicación en condiciones reales.

h. Algunos productos aplicados sobre distintos sustratos muestran que aunque visualmente no se aprecien evidencias que hagan pensar que existe producto fotocatalítico, cuando se toma una muestra y se analiza detenidamente, se verifica que sigue teniendo actividad fotocatalítica.

i. Entre los productos aplicados sobre asfalto, los testigos recogidos de la zona de rodadas han mostrado una mayor actividad fotocatalítica que los tomados de la zona central (zona divisoria de carriles, mucho menos desgastada por el tráfico). La deposición de suciedad, grasas y aceites provenientes de los vehículos motorizados conlleva una pérdida de actividad fotocatalítica mayor que la abrasión por rodadura.

Baldosa terrazo 36 pastillas blanca M8Cp (patrón)				
Baldosa terrazo 36 pastillas blanca M8C (material tratado con emulsión fotocatalítica Coverlite®)				
RESISTENCIA CLIMÁTICA	VALOR MEDIO	CLASE	MARCADO	RESULTADO
ABSORCIÓN DE AGUA				
M8Cp (patrón)	5,5 %	2	B	CONFORME
M8C (material con Coverlite®)	5,8 %	2	B	CONFORME
ABSORCIÓN CAPILAR				
M8Cp (patrón)	0,28 g/cm ²	-	-	-
M8C (material con Coverlite®)	0,19 g/cm ²	-	-	-
RESISTENCIA AL HIELO-DESHIELO CON SALES DESCONGELANTES				
M8Cp (patrón)	0,00 kg/m ²	3	D	CONFORME
M8C (material con Coverlite®)	0,03 kg/m ²	3	D	CONFORME
RESISTENCIA AL DESGASTE (mm3/5000 mm2)	VALOR MEDIO	CLASE	MARCADO	RESULTADO
M8Cp (patrón)	31.334	1	F	CONFORME
M8C (material con Coverlite®)	33.983	1	F	CONFORME
	VALOR MEDIO	CLASE	MARCADO	RESULTADO
CARGA DE ROTURA				
M8Cp (patrón)	6,9 KN	45	4T	CONFORME
M8C (material tratado con Coverlite®)	6,1 KN	45	4T	
RESISTENCIA A FLEXIÓN				
M8Cp (patrón)	7,4 MPa	3	UT	CONFORME
M8C (material con Coverlite®)	6,7 MPa	3	UT	
RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (URSV)	VALOR MEDIO	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO
M8Cp (patrón)	85	>45		CONFORME
M8C (material con Coverlite®)	79	>45		CONFORME

Figura 59: Caracterización de loseta patrón (M8Cp (patrón) y M8C (material con Coverlite®). Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET

Figura 59: Caracterización de loseta patrón (M8Cp (patrón) y M8C (material con Coverlite®). Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET

j. Cómo mantenimiento, se han de realizar **limpiezas regulares con agua** (y idealmente 1 vez cada 15 días, salvo que se hayan producido precipitaciones recientes, en cuyo caso se podrían espaciar más en el tiempo) con **desengrasantes comerciales** usados habitualmente en labores de baldeo de calles por los Ayuntamientos, sin emplear barredoras. Este aspecto ha quedado muy presente en este proyecto, pues la eficiencia descontaminante tras la limpieza con desengrasante ha aumentado significativamente.

k. Se recomienda a las autoridades locales, solicitar a los fabricantes la verificación de que el tratamiento fotocatalítico no modifica las características del sustrato, mediante ensayos de caracterización

l. Se recomienda a las autoridades locales, solicitar a los fabricantes la realización de ensayos de envejecimiento acelerado, de desgaste por paso del tráfico y de resistencia a envejecimiento.

6.1.5 PROYECTO LIFE PHOTOSCALING

El objetivo global del proyecto LIFE-PHOTOSCALING (<https://www.life-photoscaling.eu/>), coordinado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), con el Ayuntamiento de Madrid y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM) como miembros del consorcio, ha sido el establecimiento de los instrumentos necesarios para escalar la tecnología fotocatalítica desde ensayos de laboratorio hasta la aplicación en las ciudades, mediante el desarrollo de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que permita establecer un criterio de conformidad de los productos “PhotoScaling Decision Maker”.

Uno de los principales problemas con que se encuentra la tecnología fotocatalítica en cuanto a su aplicación a escala real, es la dificultad para medir la eficiencia descontaminante. Es cierto que a pequeña escala (laboratorio) este tema está resuelto, con ensayos normalizados, pero la realidad es otra; hay constantes cambios de radiación solar, de humedad relativa, de régimen de vientos, de temperaturas, de confinamiento por efecto de la arquitectura urbana, etc., en una misma localización, lo que complica su monitorización y, por tanto, la valoración de la eficiencia final. Esto, junto con la falta de protocolos de referencia para establecer criterios de aceptación y rechazo en relación con la actividad, la durabilidad o los posibles efectos secundarios tras su aplicación en pavimentos, supone una barrera que a juicio del equipo LIFE-PHOTOSCALING desalienta a las autoridades públicas a promover el uso de esta tecnología.

Para dar respuesta a estos problemas nace el proyecto LIFE-PHOTOSCALING (2014 – 2019), en el que se han llevado a cabo las siguientes actividades:

1. Desarrollo de dos plataformas de demostración en las instalaciones del CSIC, una en Madrid y otra en Arganda del Rey (mismos materiales, emplazamientos diferentes) a escala de planta piloto.

2. Desarrollo de prototipos para la medición *in situ* de la eficiencia fotocatalítica (PHOTONSITE) y de la emisión de nanopartículas por simulación de la fricción con los neumáticos (TEMIS-1000).

3. Desarrollo de indicadores para la evaluación de la eficiencia fotocatalítica, comportamiento intrínseco del material y posibles efectos no deseados.
4. Modelado de los procesos fotocatalíticos junto con las acciones ambientales.
5. Desarrollo de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, para evaluar cada solución en particular, incluida una evaluación del ciclo de vida (LCA).
6. Validación de la herramienta desarrollada en condiciones reales.

Plataformas de demostración

El proyecto se inició con una invitación abierta, publicada en el Boletín oficial del Ayuntamiento de Madrid, por parte del equipo LIFE-PHOTOSCALING, a los fabricantes de productos fotocatalíticos, para aplicar sus productos en las dos plataformas demostrativas anteriormente comentadas. En la selección de los productos el criterio fundamental fue el de la representatividad de materiales (distintas familias), el mayor valor añadido por Networking con otros proyectos y a igualdad de condiciones anteriores, la actividad fotocatalítica mayor. Finalmente se testaron emulsiones sobre asfalto y baldosas, slurries percolados en asfalto y baldosas fotocatalíticas (prefabricados de hormigón y cerámicos con impresión 3D). En total 10 combinaciones de materiales diferentes.

Cada una de las plataformas está constituida por 3 bancos de pruebas, uno de ellos para envejecimiento natural, otro para lixiviación y el tercero para ensayos de fricción. El conjunto se completa con un banco referencia con los mismos materiales sin fotocatalizador y con una estación meteorológica. Cada banco de pruebas está constituido por losas de cada uno de los materiales de 2 m² o 4 m². El banco de pruebas de lixiviación está preparado para recogida de los lixiviados procedentes de cada uno de los fotocatalizadores.

Ensayos en las plataformas

En los materiales de estas plataformas se han llevado a cabo distintos ensayos, tanto *in situ* como en el laboratorio, realizándose más de 33 tipos diferentes de pruebas y más de 1600 ensayos correspondientes a los 3 bloques independientes que se llevaron a cabo en paralelo: 1) Eficiencia fotocatalítica, 2) Comportamiento intrínseco del material y 3) Posibles efectos no deseados.

Como ejemplos de algunos resultados, hay que señalar que con respecto al comportamiento intrínseco de los materiales no se pueden dar reglas generales sobre el efecto de la incorporación de fotocatalizadores basados en TiO₂, dependiendo principalmente de la estructura porosa de la matriz inicial, así como de las propiedades de la superficie fotocatalítica resultante.

Con respecto a la disminución de la eficiencia de NO_x a lo largo del tiempo, datos durante 17 meses medidos *in situ* con el prototipo PHOTONSITE indicaron que las emulsiones fotocatalíticas sobre el asfalto poroso experimentaron una pérdida significativa de actividad a lo largo del tiempo, independientemente de las condiciones climáticas. Sin embargo, la eficiencia de los slurries y baldosas de hormigón, con el fotocatalizador aplicado en la superficie o en masa, principalmente dependía de la humedad del sustrato con una dependencia diferente para cada familia de materiales. La actividad fotocatalítica se comprobó también mediante el uso de sondas de oxidación y reducción para determinar la producción de radicales hidroxilo y electrones libres respectivamente.

Paralelamente, se ha llevado a cabo la medición de la concentración de NO y NO₂ a ras de suelo de forma simultánea sobre una losa fotocatalítica y su referencia sin fotocatalizador mediante sensores low cost, calibrados cada 3 meses en las estaciones de calidad del aire más cercanas a cada una de las plataformas, del Ayuntamiento de Madrid y Comunidad de Madrid respectivamente. A partir de estos datos se ha llevado a cabo una modelización de la actividad con las acciones ambientales mediante el desarrollo de un modelo GAM entrenado utilizando los datos obtenidos en las plataformas, que permiten obtener una estimación del porcentaje de eficiencia de eliminación de NO₂. Con los productos fotocatalíticos utilizados en las plataformas, se alcanzaron reducciones de NO₂ a nivel del suelo del 0% al 30% dependiendo de las condiciones atmosféricas y del tipo y edad del fotocatalizador. Se observaron mayores valores de porcentajes de descontaminación que en los resultados obtenidos con los ensayos normalizados, lo que se ha atribuido a la magnitud de las concentraciones de NO y NO₂, cercanas a un orden de magnitud menor en el aire ambiente, al elevado flujo de gas en los ensayos normalizados y a la influencia de la humedad relativa ambiental.

Indicadores y sub-indicadores: Criterio de conformidad

Todos estos ensayos han permitido la discriminación de los aspectos más importantes a implementar en ensayos de laboratorio específicos para evaluar los sub-indicadores (SI) dentro en cada uno de los tres grupos de indicadores previamente identificados, que han permitido establecer la conformidad de un producto, siendo:

I1: Indicador Eficiencia fotocatalítica (PPE)

SI1-1: Band-Gap (eV) y posición de las bandas (V): Distancia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción y potencial redox de las mismas.

SI1-2: Eficiencia fotocatalítica del producto, según la Norma ISO 22197-1 (versión simplificada)

SI1-3: Adherencia del producto fotocatalítico al sustrato, según la Norma *Cross-Cut Test* ISO 2409: 2013 modificada.

SI1-4: Susceptibilidad a la carbonatación (ensayo diseñado *ad hoc*)

I2: Comportamiento intrínseco del material (IP)

I2-1: Coeficiente de resistencia al deslizamiento, con el péndulo TRRL, según Norma EN14231.

I3: Posibles efectos no deseados (USE).

SI3-1: Lixiviación de partículas de titanio (mgr Ti/ cm²) mediante 2 ensayos diferentes simulando agua de lluvia (ensayado según la Norma CEN/TS 16637-2 modificada) y agua tras la limpieza de calles con agua a presión. Este ensayo no tiene normativa asociada y se ha diseñado un ensayo *ad hoc* mediante irrigación.

SI3-2: Nivel de emisión de nanopartículas a la atmósfera mediante ensayo con TEMIS-1000, medido en Ud x 1000/cm³

SI3-3: Selectividad en la conversión fotocatalítica a nitratos, determinada a partir del mismo ensayo que para el I1-2.

Según el resultado obtenido en cada uno de los ensayos específicos, cada SI se ha clasificado en cuatro categorías: a la peor categoría se le ha asignado 1 punto y así sucesivamente hasta asignar 4 puntos para los resultados más favorables del método. Además, para algunos de los SI, se aplica la puntuación de 0 si el valor obtenido en el ensayo hace que el producto no se deba instalar en la calle. Si un producto tiene 0 en cualquiera de los SI, ese producto es rechazado. Los distintos SI están ponderados de forma diferente en función de su peso en la valoración final del indicador.

Después de calcular el valor obtenido para cada indicador, se aplica un factor de ponderación de cada uno de ellos en la clasificación global. Se ha aplicado un factor de 2.5 al indicador PPE. En el caso de IP se ha asignado a 1. USE ha sido el indicador con más peso ya que estos materiales se desarrollan para mejorar la calidad de nuestro medio ambiente y por tanto, si son susceptibles de producir algún efecto adverso, esto debe ser penalizado en gran medida. Por lo tanto, el factor asignado ha sido dos veces más que el de PPE, por lo tanto, un factor de 5.

Herramienta de soporte a la toma de decisiones “PhotoScaling Decision Maker”

Como uno de los principales resultados del proyecto, se ha desarrollado una herramienta de soporte para la toma de decisiones *PhotoScaling Decision Maker* que proporciona tres tipos de resultados:

1. Criterio de conformidad de un producto:

Este resultado es el aspecto más importante y práctico alcanzado en el proyecto. Se le pide al usuario que introduzca los valores obtenidos para cada uno de los SI definidos previamente. Cada dato de entrada tiene una explicación del significado y el método utilizado para determinarlo. La herramienta proporciona el resultado del producto para cada SI y la nota global promedio del producto en tanto por ciento.

2. Análisis del ciclo de vida:

“From gate to gate”, de acuerdo con la Norma ISO 14040: 2006. Como resultado del LCA, se obtienen dos bloques de impactos sobre la acidificación terrestre, la eutrofización marina, la formación de oxidantes fotoquímicos y la materia particulada: Como aspecto positivo, los resultados de la evaluación de impacto para la reducción de NO_x en el aire por los sistemas de pavimento fotocatalítico (por unidad funcional) y como negativo, los impactos por las materias primas y su transporte (por unidad funcional).

3. Estimación del porcentaje de eficiencia de eliminación de NO_2

Los resultados del modelo GAM entrenado utilizando los datos obtenidos en las plataformas se han implementado en la herramienta para obtener una estimación del porcentaje de eficiencia de eliminación de NO_2 . Da el promedio de un año en exposición al aire libre a nivel de suelo sin tener en cuenta otros efectos como la degradación debido a la fricción de los neumáticos. Debido a las hipótesis e incertidumbres asociadas, este valor debe considerarse un ejercicio a fines comparativos más que una predicción.

Validación en una calle de Madrid

De entre los ensayados, el producto que obtuvo la mejor puntuación, según el criterio de conformidad de *PhotoScaling Decision Maker* se aplicó a escala real en la calle José Antonio de Armona de Madrid. La calle Bernardino Obregón (sin tratamiento fotocatalítico) sirvió de “blanco” a efectos de comparación de resultados.

Los criterios de elección de la calle fueron los siguientes: orientación N-S; calle con configuración de “calle cañón”; zona de elevada contaminación; buen estado del pavimento existente; tramo de aplicación aproximado de 4000 m²; calle dotada de alumbrado público para colocación de tubos pasivos.

Tras la aplicación a escala real, se realizaron los ensayos de control tanto *in situ* como en laboratorio, a partir de testigos tomados antes y después de la aplicación. Se llevaron a cabo los ensayos correspondientes a los Indicadores, pudiéndose validar los resultados obtenidos en las plataformas.

Desde diciembre de 2018 a junio de 2019, se evaluó la eficiencia descontaminante del pavimento *in situ* mediante el dispositivo PHOTONSITE y sondas colorimétricas; se evaluó la emisión de nanopartículas por fricción mediante TEMIS-1000 y se analizó la lixiviación de Ti, así como pH, conductividad y nitratos mediante sonda multiparamétrica.

En cuanto a evaluación ambiental, se midió la concentración de nanopartículas en ambiente, no detectándose variación estadísticamente significativa en la concentración numérica o la distribución del tamaño de partículas finas suspendidas en la calle fotocatalítica en comparación con las calles vecinas. Se tomaron muestras de aire para análisis de partículas y sólo ocasionalmente, las partículas capturadas contenían Ti, pero siempre estaban en el rango de tamaño de micrómetros. Esto lleva a la conclusión de que para este producto las nanopartículas no se liberaron en una cantidad significativa del recubrimiento fotocatalítico al aire de acuerdo con los resultados obtenidos para ese producto utilizando la herramienta *PhotoScaling Decision Maker*.

Respecto a la monitorización de la eficiencia fotocatalítica en ambiente, se realizó mediante los sensores de bajo coste utilizados en las plataformas, mediante tubos pasivos y mediante la aplicación del modelo GAM desarrollado. Se utilizaron dos métodos distintos de cuantificación con los que se obtuvieron eficiencias de eliminación de NO₂ ambiental entre el 1% y el 4% a unos tres metros de altura. Cabe señalar que ninguno de ellos métodos se puede considerar estadísticamente significativo por la elevada incertidumbre en las medidas. La aplicación del modelo GAM dio como resultado un 28.6% de reducción media de NO₂ a nivel de suelo durante los tres primeros meses de aplicación.

Conclusiones y Recomendaciones equipo LIFE-PHOTOSCALING

Este proyecto, y la herramienta *PhotoScaling Decision Maker* desarrollada supone un hito en la evaluación de materiales de construcción fotocatalíticos, ya que por primera vez se dispone de criterios de conformidad cuantificados que permiten la aceptación o rechazo de un producto. *PhotoScaling Decision Maker* está alojada en la página web del proyecto, <https://www.life-photoscaling.eu>, y es de libre uso. Es una herramienta viva que se irá actualizando en base al nuevo conocimiento del que se vaya disponiendo. Los rangos de parametrización de cada sub-indicador así como los umbrales de aceptación se presentan en la web, en la que se ha implementado una ventana para hacer llegar comentarios al equipo Life-Photoscaling al respecto.

Como recomendación final, el equipo Life-Photoscaling considera que los productos que hayan obtenido puntuaciones menores del 50% para al menos uno de los sub-indicadores y que presenten una puntuación global menor del 60%, no deberían ser implementados en la calle como pavimentos.

6.1.6 PAVIMENTOS DESCONTAMINANTES: EXPERIENCIAS NACIONALES

El objeto del presente estudio, financiado por la Empresa Breinco, es la valoración de los resultados obtenidos en el Estudio de Inmisión de contaminantes atmosféricos (NO_x , O_3 , SO_2 y CO) y parámetros meteorológicos en el área de la plaza de Can Rosès (Barcelona) tras la implantación de un pavimento peatonal (a partir de prefabricados de hormigón) descontaminante sobre una superficie de 1.400 m².

Para ello se ha diseñado una estrategia del muestreo consistente en la instalación de dos equipos de medición en continuo, uno en el centro de la zona pavimentada (Plaza) y un segundo equipo como contraste a 50 m del anterior (Edificio Biblioteca) y fuera de la zona de influencia del pavimento, a modo de “blanco” (zona no tratada con fotocatalisis).



Figura 60: Ubicación de las estaciones de muestreo. Fuente: Breinco.

En las dos estaciones implantadas se miden los niveles de inmisión de los siguientes contaminantes:

- Óxidos de nitrógeno (monóxido y dióxido de nitrógeno)
- Ozono
- Monóxido de carbono
- Dióxido de azufre

Paralelamente, en una de las estaciones se ha instalado una estación meteorológica con objeto de presentar las siguientes variables:

- Temperatura (°C)
- Velocidad del viento (m/s)
- Dirección de viento
- Humedad (%)
- Radiación solar (W/m²)

Los trabajos de toma de muestras empiezan el día 11 de septiembre de 2010 y se finalizan el día 15 del mismo mes. Las determinaciones cuentan con registro continuo cada minuto, a lo largo de 24 horas.

Los equipos de medida utilizados en el presente estudio son analizadores de gases multiparamétricos marca AIRPOINTER. Se trata de una estación de monitoreo de calidad de aire en un formato de tamaño reducido, que puede configurarse para medir NO_x , CO, O_3 , SO_2 , HC, PM y meteorología, en un formato compacto.

A partir del análisis de los datos tratados (con una radiación superior a 100 W/m_2) a lo largo del estudio de inmisión realizado, se resumen en las tablas adjuntas las diferencias de concentraciones en porcentaje para cada uno de los días y los contaminantes determinados.

ÓXIDOS DE NITRÓGENO
Tabla 5 - Comparativa de reducción de NO_x

Día	Nº de datos	Promedio NO_x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Biblioteca	Promedio NO_x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Plaza	% de diferencia	Promedio Radiación
11/09/10	529	57,62	31,10	46%	619,75
12/09/10	490	58,71	37,74	36%	664,76
13/09/10	394	70,78	56,07	21%	651,40
14/09/10	525	62,30	59,25	5%	408,51
15/09/10	444	64,77	52,63	19%	529,17
TOTAL	476	62,83	47,36	25%	575

OZONO
Tabla 6 - Comparativa de reducción de Ozono

Día	Nº de datos	Promedio O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Biblioteca	Promedio O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Plaza	% de diferencia	Promedio Radiación
11/09/10	529	74,01	45,20	38,93%	619,75
12/09/10	490	100,86	46,35	54,04%	664,76
13/09/10	394	82,70	38,17	53,84%	651,40
14/09/10	525	88,49	39,86	54,95%	408,51
15/09/10	444	97,02	35,56	63,35%	529,17
TOTAL	476	88,62	41,03	53%	575

DIÓXIDO DE AZUFRE
Tabla 7 - Comparativa de reducción de SO_x

Día	Nº de datos	Promedio SO ₂ (µg/m ³) Biblioteca	Promedio SO ₂ (µg/m ³) Plaza	% de diferencia	Promedio Radiación
11/09/10	529	2,69	0,98	64%	619,75
12/09/10	490	1,84	0,97	47%	664,76
13/09/10	394	1,44	0,92	36%	651,40
14/09/10	525	1,51	1,25	17%	408,51
15/09/10	444	1,09	1,03	6%	529,17
TOTAL	476	1,71	1,03	34%	575

MONÓXIDO DE CARBONO
Tabla 8 - Comparativa de reducción de CO

Día	Nº de datos	Promedio SO ₂ (µg/m ³) Biblioteca	Promedio SO ₂ (µg/m ³) Plaza	% de diferencia	Promedio Radiación
11/09/10	529	0.72	0.17	76%	619,75
12/09/10	490	0.99	0.30	70%	664,76
13/09/10	394	0.76	0.37	52%	651,40
14/09/10	525	0.56	0.60	-5%	408,51
15/09/10	444	1.10	0.28	75%	529,17
TOTAL	476	0.83	0.34	53%	575

Como puede observarse el porcentaje de diferencia de concentración entre la estación de contraste y la de análisis para cada contaminante determinado y día es el que se muestra a continuación:

Tabla 9
Comparativa de reducción de todos los contaminantes analizados

Día	Radiación (W/m ²)	NO _x %	O ₃ %	SO ₂ %	CO %	% Diferencia
Diferencia	619	46,0	38,9	64,0	76,0	56,2
12/09/10	664	36,0	54,0	47,0	70,0	51,7
13/09/10	651	21,0	53,8	36,0	52,0	40,7
14/09/10	408	5,0	54,9	17,0	-	19,2
15/09/10	529	19,0	63,3	6,0	75,0	40,8
TOTAL		25,4	52,9	34	53,6	41,7

A la luz de estos resultados, se puede concluir, para este estudio concreto y las condiciones anteriormente especificadas, que la radiación solar tiene una influencia significativa en la disminución de la inmisión de contaminantes atmosféricos, cuando se aplican productos fotocatalíticos, que en este caso resultó de un valor medio de contaminantes (NO_x , O_3 , SO_2 y CO) del 41,7 % de disminución, con respecto a la zona no tratada fotocatalíticamente.

6.2 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS: EXPERIENCIAS INTERNACIONALES

6.2.1 AEROPUERTO DE MALPENSA (MILÁN)

En el año 2011, Impresa Bacchi, una empresa constructora de Milán que lleva desde el 2006 experimentando en colaboración con el Politécnico de Milán y aplicando soluciones fotocatalíticas para la disminución de la contaminación atmosférica (propietaria de la microemulsión fotocatalítica Coverlite ®), empezó una serie de importantes aplicaciones seguidas por medidas *in situ*, controlando la variación del contenido de los gases contaminantes en la atmósfera.

La primera aplicación a gran escala fue ejecutada en el mes de junio del 2011 en la Terminal 1 del Aeropuerto de Malpensa, tanto en la vía de acceso, como en el parking descubierto de la zona de llegadas, por un total de casi 20.000 m² de aplicación.

Para la aplicación se empleó un prototipo de maquinaria patentada que permite regular el flujo y la potencia de la microemulsión y mantener y garantizar la misma concentración de dióxido de titanio en el producto pulverizado.

En cuanto al control de la capacidad descontaminante del producto se adoptó el siguiente protocolo de medidas *in situ*, a partir de estaciones móviles dotadas de registro continuo de datos:

- 2 estaciones móviles de medida que se instalaron durante 8 semanas (4 semanas antes y 4 después del tratamiento)
- 1 estación móvil que fue instalada en una zona cercana sin tratamiento cercana al pavimento existente y donde los datos recogidos fueron utilizados como valores de referencia;
- 1 estación móvil que fue instalada en la zona donde se aplicó el tratamiento recogiendo datos antes y después del tratamiento fotocatalítico.



Figura 61: Aplicación de micro-emulsión fotocatalítica, mediante el prototipo patentado por "Impresa Bacchi", en la Terminal 1 del Aeropuerto de Malpensa (Milán)

Este protocolo de medidas *in situ* fue avalado y supervisado también por Legambiente (el equivalente italiano de “Ecologistas en Acción” en España), el Ente Italiano independiente para la protección del Medio Ambiente, cuya aportación ha dado valor añadido a este tipo de aplicación.



Figura 62: Estación móvil para la medida instalada en el Aeropuerto de Malpensa (Milán). Fuente: Impresa Bacchi.

La segunda aplicación fue ejecutada en el mes de Octubre 2011 en los alrededores del nuevo Edificio de la Región Lombardía (Milán), sede político-administrativa de la Comunidad de Milán, en las calles y en las aceras, por un total de casi 25.000 m² de superficie.

Esas aplicaciones, monitoreadas *in situ* como se ha descrito anteriormente, han dado resultados muy positivos:

En el caso del Aeropuerto de Malpensa la reducción de óxidos de nitrógeno ha alcanzado un 9 mientras que en el caso de los alrededores del Edificio de la Región Lombardía ha alcanzado un 7,4% de reducción a escala real. Resultados muy prometedores teniendo en cuenta que las distintas épocas del año y las distintas horas de irradiación solar de las dos aplicaciones, así como otros parámetros ambientales intervinientes.



Figura 63: Aplicación de micro-emulsión fotocatalítica en las aceras del Edificio de la Región Lombardía (Milán). Fuente: Impresa Bacchi.

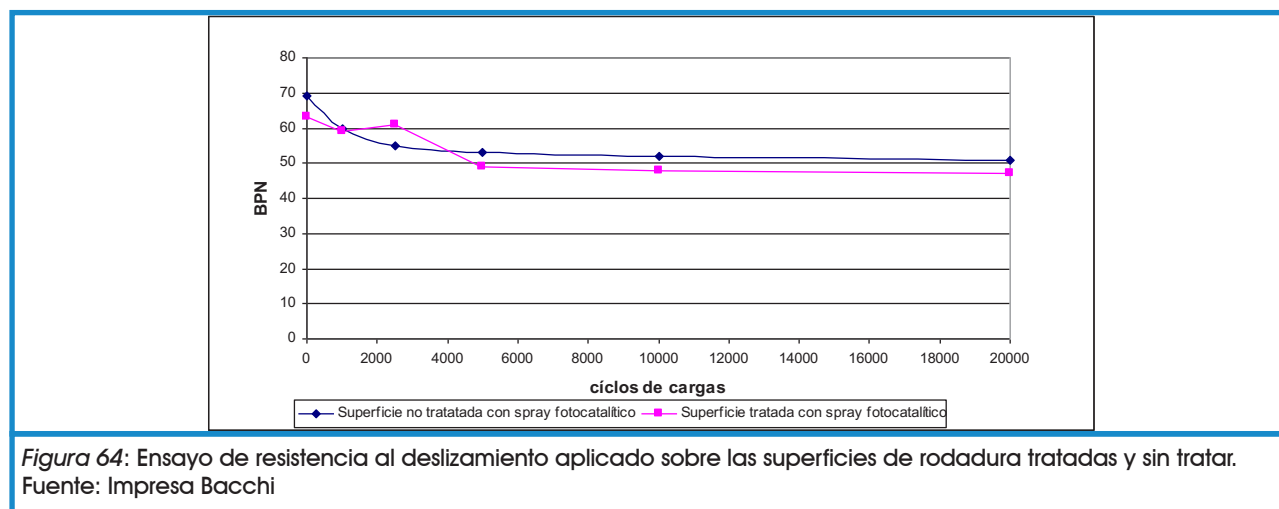
Sobre estos mismos estudios, para comprobar cómo afecta a la resistencia al deslizamiento y a su eficiencia fotocatalítica, la aplicación de una micro-emulsión con características descontaminantes, sobre una capa de rodadura de tipo AC 16 surf 50/70, se ha realizado un estudio en laboratorio, donde se han verificado estos dos parámetros. En una primera fase, se han efectuado dos ensayos de control de la resistencia al deslizamiento, según la Norma UNI EN 13036-Parte 1. El primero se realizó sobre la superficie de rodadura sin tratar previamente con spray, y el segundo, se realizó sobre la superficie tratada fotocatalíticamente.

A través de estos ensayos se simula el paso del tráfico, con miles de aplicaciones de ciclos de carga.

Posteriormente se llevó a cabo el análisis de la resistencia al deslizamiento, sobre ambas superficies (tratada y sin tratar) mediante el método del péndulo británico, según la Norma UNI

EN 12697-Parte 22, a partir del cual se obtiene una curva que relaciona los ciclos de aplicaciones de carga con el número BPN (British Pendulum Number).

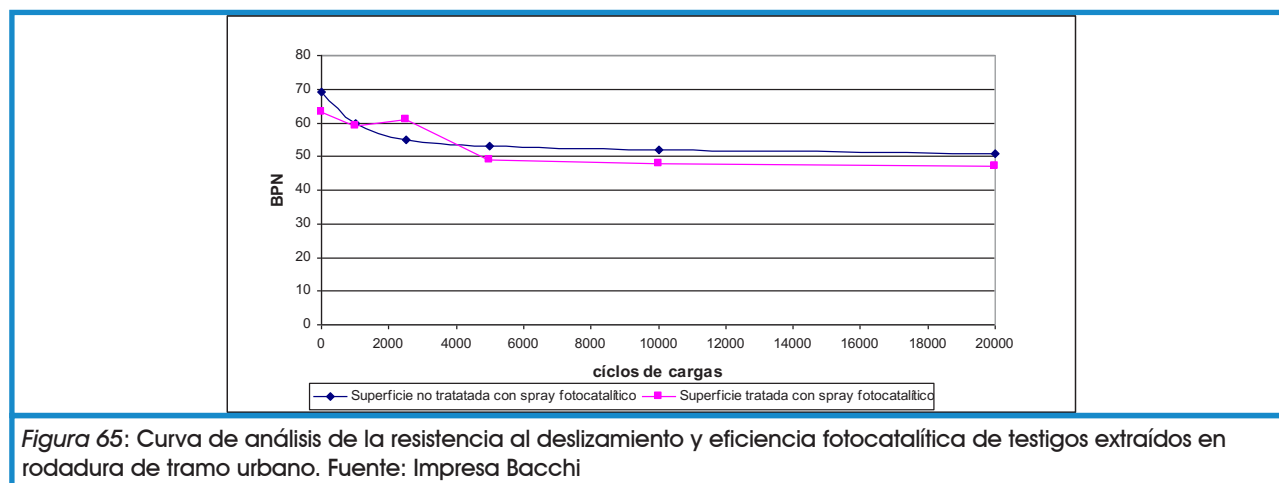
Los resultados obtenidos de este estudio se presentan en la figura a continuación:



A la luz de estos resultados se podría sugerir que la aplicación de micro-emulsiones descontaminantes sobre superficies de rodadura convencionales genera, a largo plazo, una ligera reducción en la adherencia entre el neumático y el pavimento.

En una segunda fase, y de cara a evaluar la eficiencia fotocatalítica de este tipo de revestimientos a largo plazo, se realizó un ensayo donde se medía la reducción de concentraciones de NO_x , en función del número de aplicaciones de cargas. Es decir, a partir de testigos tomados de la superficie ensayada, sobre la que se ha aplicado el tratamiento superficial, se han realizado ensayos de resistencia al deslizamiento en primera instancia (con péndulo UNI EN 13036), y sobre estas mismas muestras, ensayos de eficiencia fotocatalítica (UNI 11247/2010), hasta completar el gráfico adjunto.

A partir de los resultados obtenidos, se observa una reducción de eficiencia fotocatalítica, con tendencia asintótica, a medida que aumenta el número de ciclos de carga. En el estudio se llegan a alcanzar reducciones de concentración de NO_x del orden del 43%, que tras la aplicación de 20.000 ciclos de péndulo de fricción se reducirían al 26%. La tendencia descendente de este parámetro está íntimamente relacionada con la curva de desgaste de la Figura 72.



6.2.2 APARCAMIENTO EN ROSKILDE (DINAMARCA)

La Empresa Photocat A/S, en colaboración con el Ayuntamiento de Roskilde han llevado a cabo ensayos *in situ* sobre un pavimento asfáltico al que se le ha aplicado un tratamiento fotocatalítico, con microemulsión con base acuosa, durante tres años. La aplicación se realizó sobre 5.000 metros cuadrados de superficie en la zona de aparcamiento de Takeda. Para evaluar la eficiencia del tratamiento se diseñó un dispositivo de medición *in situ* que permitía ensayar y medir la actividad fotocatalítica de la superficie de rodadura durante un periodo de tres años.

Los resultados de la prueba realizada reportados por la empresa Photocat sugieren que la eficiencia fotocatalítica observada se mantiene estable en el tiempo, concluyendo que con una irradiación solar de 563 kWh/m² por año, con una estimación del 5% de luz UVA, colabora en la descontaminación del aire de la zona del aparcamiento tratado con más de 13.8 gramos de NO_x/m² al año.

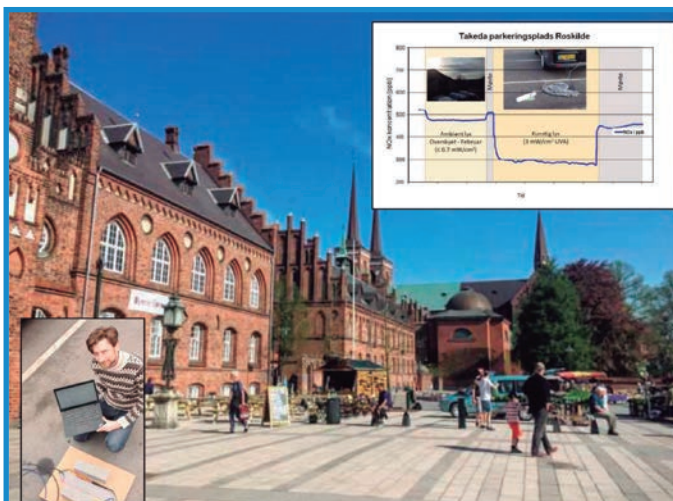


Figura 66: Pavimento Fotocatalítico en Roskilde (Dinamarca).
Fuente: Photocat

6.2.3 AEROPUERTO DE COPENHAGUE (DINAMARCA)

La Empresa Photocat A/S en colaboración con el fabricante de hormigón IBF Beton, CK Environment, el Grupo BMI y el Aeropuerto de Copenhague han llevado a cabo un seguimiento durante dos años, de un tratamiento fotocatalítico ejecutado a partir de prefabricados de hormigón (adoquín), sobre 300 m² de una zona de aparcamiento de la Terminal 1, en la zona llamada “Kiss-fly”.

Para la monitorización del pavimento se empleó un analizador de NO_x, tipo Eco Physics NO_x que recoge los datos NO, NO₂, NO_x.

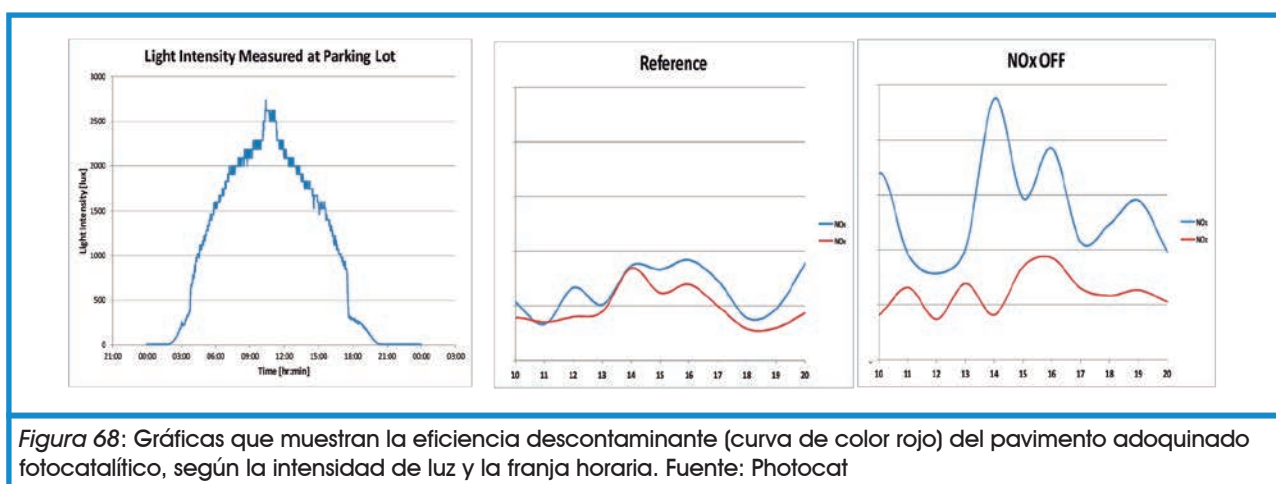


Figura 67: Panorámica de pavimento fotocatalítico en la Terminal 1 del aeropuerto de Copenhague (Dinamarca).
Fuente: Photocat

Este equipo consiste en dos válvulas solenoides de multiplexación, controladas por un registrador de datos instalado a una altura de 0,5 m del suelo. El multiplexor mide cada 30 segundos, tanto en la zona tratada con adoquín dot catalítico, como en la no tratada. La transmisión de datos se realiza vía GSM.

Entre el 17 de marzo y el 28 de abril se realizan 41 mediciones al día, antes de la instalación del pavimento fotocatalítico. Las medidas con el pavimento adoquinado fotocatalítico y la zona de referencia (“blanco” o zona no tratada de pavimento convencional) se realiza entre el 11 de Mayo y el 4 de Julio -en total 43 días realizando mediciones.

La intensidad de luz en la zona de aparcamiento alcanza su cota máxima entre las 9 am y la 1 pm del día. Por lo que la mayor eficiencia fotocatalítica en los adoquines se puede observar entre las 10am y las 8pm.



En las gráficas se puede ver la capacidad de reducción de concentraciones de NO_x comparando la zona de referencia con la zona tratada con fotocatalisis, que se sitúa en el entorno del 20%.

6.3 CUBIERTAS FOTOCATALÍTICAS

Se trata de cubiertas planas descontaminantes (no transitables), formadas por una lámina asfáltica autoprotegida con unos micro-gránulos (carga mineral) aditivados con fotocatalizador.

Estas cubiertas impermeabilizantes fotocatalíticas, fabricadas por el Grupo BMI, han sido sometidas a ensayo de eficiencia descontaminante (NO_x) por el Instituto de Combustión, Aerotermia, Reactividad y Medioambiente (ICARE) de Francia. El ensayo trató de reproducir los niveles de concentración medios de NO y NO₂ habituales en una gran ciudad como fue el caso de París. Primero se realizó el ensayo con un “blanco” (sin muestra, en



Figura 69: Cubiertas impermeabilizantes fotocatalíticas en centro logístico de Amazon. Getafe (Madrid). Fuente: BMI

este caso) con y sin radiación ultravioleta, y posteriormente con la cubierta impermeabilizante fotocatalítica, con y sin radiación.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 10
Comparativo de resultados de eficiencia descontaminante. Fuente: BMI

		Concentraciones iniciales NO _x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ eq NO ₂)	Concentraciones finales NO _x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ eq NO ₂)
En la oscuridad	Sin muestra fotocatalítica	577,6	539,33
	Con muestra fotocatalítica	464,7	457,5
Bajo radiación	Sin muestra fotocatalítica	539,3	501,1
	Con muestra fotocatalítica	457,7	53,2

Estas láminas han sido implantadas a lo largo de todo el mundo y en especial en España. Algunos ejemplos de ello son las tiendas Ikea de A Coruña, Sevilla, San Sebastián, las tiendas de Leroy Merlin de Azuqueca de Henares, Oviedo, Alboraya, Sevilla, el almacén logístico de Amazon Getafe, los depósitos de agua Canal Isabel II de Collado Villalba y San Fernando de Henares y un considerable número de cubiertas de edificios residenciales con cubierta plana no transitable.

6.4 TELAS DESCONTAMINANTES

El propósito del proyecto LIFE PHOTOCITYTEX <http://photocitytex.eu/> fue evaluar la efectividad del uso de nanomateriales fotocatalíticos basados en TiO₂ en la construcción de textiles, como una forma de mejorar la calidad del aire en zonas urbanas. El proyecto estaba coordinado por el CEAM, a través de la Doctora Amalia Muñoz, y contaba con los siguientes socios: Aitex, el Ayuntamiento Quart de Poblet, Legambiente y Next Technology.

En particular, el proyecto pretendía:

- Revisar las tecnologías actuales disponibles e identificar compuestos fotocatalíticos que son adecuados para su uso con textiles.
- Revisar la legislación europea relacionada con la concentración de contaminantes en los entornos urbanos para establecer las condiciones de demostración a gran escala.
- Desarrollar prototipos textiles a escala industrial en forma de toldos y cubiertos de paredes.
- Demostrar a gran escala el uso de textiles fotocatalíticos para la descontaminación de los entornos urbanos mediante el empleo de las cámaras EUPHORE.
- Adquirir información sobre productos secundarios formados durante las pruebas, mejorar la comprensión de todo el proceso y de sus implicaciones.
- Instalar los textiles fotocatalíticos en dos localizaciones urbanas en Quart de Poblet (Valencia).

A tal fin se comenzó primero a tratar de estimar la eficacia de los textiles fotocatalíticos identificados, lona y toldo, en condiciones controladas atmosféricas, usando la cámara de simulación atmosférica EUPHORE.

Posteriormente, se instalarían esos mismos dos textiles, lona y toldo, en la entrada a un falso túnel urbano de la A3 en el Municipio de Quart de Poblet, y en un colegio de la misma población (C.P. Ramón Laporta), respectivamente, midiendo la polución, antes y después de la instalación de ambos textiles.

Las conclusiones del proyecto demostraron reducciones de las concentraciones de NO_x , del orden del 25%, y Ozono (O_3) en ambos casos, según expuso la Dra. Amalia Muñoz (CEAM) en la Jornada de Fotocatálisis: Materiales de última generación para construcciones sostenibles (Valencia) con fecha 30 de Noviembre de 2017.

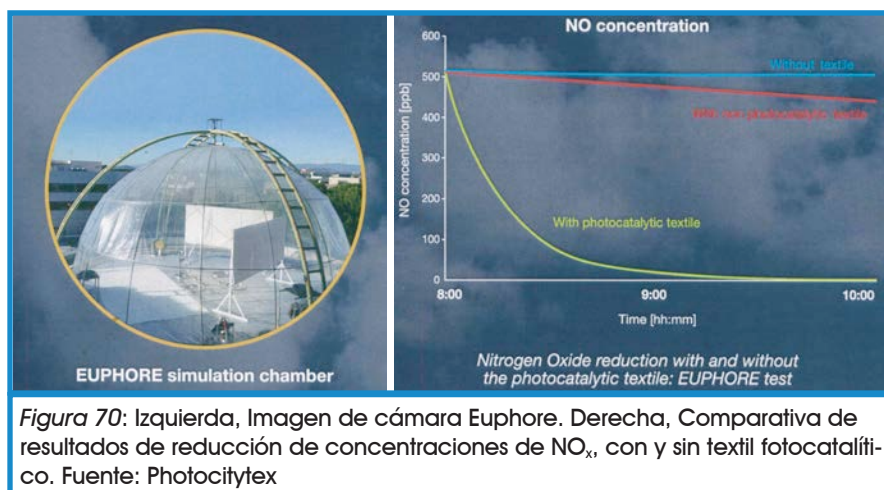


Figura 70: Izquierda, Imagen de cámara Euphore. Derecha, Comparativa de resultados de reducción de concentraciones de NO_x , con y sin textil fotocatalítico. Fuente: Photocitytex

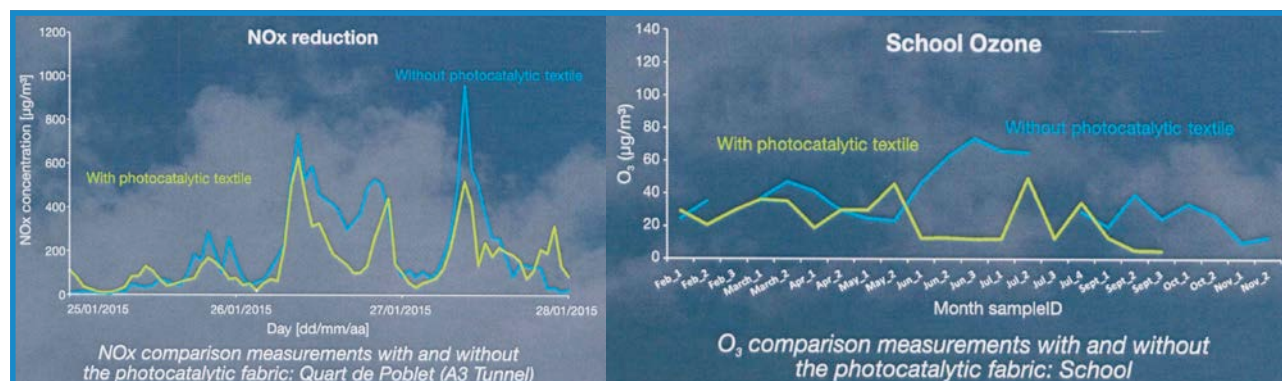


Figura 71: Izquierda, comparativa de resultados de reducciones de NO_x , con y sin tela fotocatalítica en Túnel de la Autovía A3. Derecha, comparativa de reducciones de ozono, con y sin toldo fotocatalítico en Colegio. Fuente: Photocitytex

Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos desde que se comenzara el proyecto se diseñó una herramienta matemática para simular cómo la instalación de textiles fotocatalíticos puede ayudar a reducir la contaminación, disponible en la página web del proyecto.

6.5 REVESTIMIENTOS CERÁMICOS FOTOCATALÍTICOS PARA FACHADAS

La Empresa Ceracasa encargó en su día al Centro de Estudios Experimentales del Mediterráneo (CEAM) la evaluación de la eficiencia fotocatalítica de un revestimiento cerámico de fachadas.

Las pruebas se realizaron en la Cámara Euphore (CEAM), pero para ello, se tuvieron que simular las condiciones ambientales reales de una calle de Valencia como base del estudio.

Para el establecimiento de las condiciones experimentales a simular en la cámara, en cuanto a niveles de óxidos de nitrógeno y humedad relativa en un ambiente urbano se tomaron los datos de contaminación ambiental de la estación Calidad del Aire de la Calle Linares en Valencia, por considerarse representativos del

ambiente en grandes avenidas y calles con elevado tráfico. Se utilizaron los valores promedio calculados entre Noviembre y Febrero de 2004 a 2009.

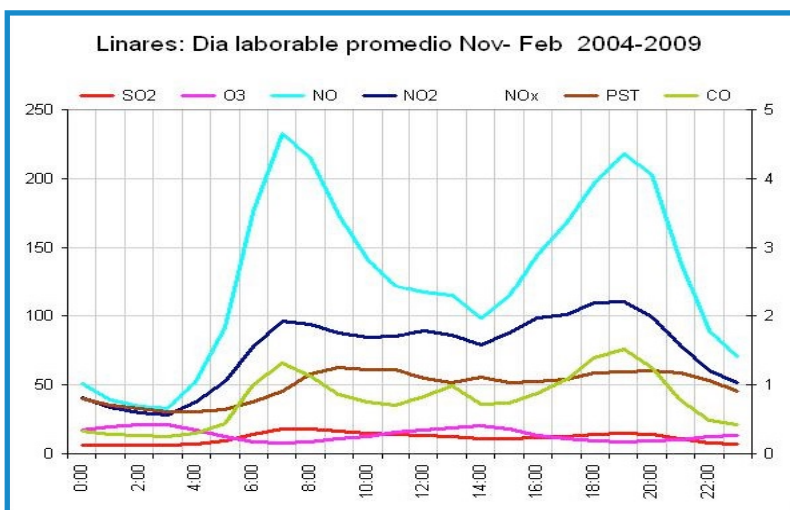


Figura 72: Análisis horario de concentraciones medias de contaminantes entre 2004 y 2009 en una calle de Valencia. Fuente: Ceracasa

Los experimentos se llevaron a cabo durante los cinco primeros días de febrero de 2010, durante un periodo de anticiclón que se mantuvo mientras se realizó el ensayo.

Las características de las pruebas fueron las siguientes:

- Cámara Euphore: cúpula presurizada de 200 m³.
- Monitorizada en todo momento para el control del aire y su variación con el tiempo.
- Con una insolación natural durante dos días (22 horas) sobre 5 m² de cerámica fotocatalítica, situada hacia distintas orientaciones. El formato de la cerámica utilizada es de 49x98.2 cms.
- Introduciendo de forma continua, bajo demanda de NO Y NO₂ en cantidades reales de (150-250 ppb NO_x), simulando el aire de una ciudad.
- Se controla la superficie cerámica para la confirmación de nitratos y nitritos.



Figura 73: Vista de la Cámara Euphore. Fuente: CEAM

El primer experimento (sin cerámica fotocatalítica, es decir el experimento "blanco") se realizó el 1 de febrero desde las 14:00h (hora solar) al día 2 de febrero a las 14:00h (hora solar).

Experimento	Inicio: Fecha y hora (solar)	Fin: Fecha y hora (solar)
BLANCO	01/02/2010 – 14:00h	02/02/2010 – 14:00h
CICLO 1	02/02/2010 – 23:00h	03/02/2010 – 22:00h
CICLO 2	04/02/2010 – 16:00h	05/02/2010 – 15:17h

Figura 74: Fechas, horas y ciclos de experimentación

El segundo y tercer experimentos se realizaron desde el 2/2/2010 a las 23:00h (hora solar) al 2/3/2010 a las 22:00h (hora solar) de un día soleado y desde el 4/2/2010 a las 16:00h (hora solar) hasta el día 5/2/2010 a las 15:17h (hora solar) de un día nublado.

A la hora de interpretar estos resultados, se debe tener en cuenta que en la atmósfera simulada en los laboratorios EUPHORE las especies de partida fueron NO y H₂O; no se estudió el efecto sobre otros compuestos.

En base a los resultados obtenidos se pudo concluir lo siguiente:

- 1.** Se observó una disminución de los niveles de ácido nítrico (HNO₃) al utilizar las placas cerámicas fotocatalíticas dentro de la cámara. Concretamente una disminución con respecto al experimento en Blanco del 74.44% en el Ciclo 1 (día nublado) y el 57.65% en el Ciclo 2 (día soleado)
- 2.** Con las piezas cerámicas fotocatalíticas se detectaron niveles más bajos de radicales HO₂, es decir, el ciclo de reacciones químicas se encuentra desplazado hacia la formación de radicales OH que, junto con el metano (CH₄) que siempre está presente en el aire utilizado en los simuladores (es un compuesto difícil de ser eliminado por el sistema de acondicionamiento de aire) da lugar a la formación de formaldehído (HCHO).
- 3.** También se detectó ácido fórmico (HCOOH) que es el siguiente producto de oxidación del formaldehído lo que indica que existe cierta actividad fotoquímica dentro de la cámara.
- 4.** En el lavado de las piezas se obtuvo una concentración media de nitratos de 9.71 mg/m² mientras que la de nitritos fue de 0.014 mg/m², no pudiéndose confirmar que existan diferencias significativas en cuanto a la orientación de las piezas cerámicas.
- 5.** Se ha confirmado que el nitrato analizado procede de la propia actividad fotocatalítica de las piezas y no es producto de su deposición directa sobre las mismas, debido a que los niveles detectados se encuentran por debajo de sus límites de detección.
- 6.** Al realizar un balance global de Nitrógeno, el 9.21% del nitrógeno introducido fue atrapado por las piezas en forma de NO₃⁻, mientras que el 0.02% en forma de NO₂⁻.
- 7.** Utilizando el nitrógeno como especie trazadora, se estimó que la cantidad de nitrógeno recogida en forma de nitratos y nitritos equivale a un total de 5.96 mg NO_x/m², que teniendo en cuenta el número de horas de exposición solar durante el experimento y extrapolando al número total de horas de sol en la ciudad de Valencia de Noviembre a Enero equivalen a 132 mg NO_x/m² (bajo las condiciones de simulación en la cámara EUPHORE).

Se puede concluir que los estudios realizados por el Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (Fundación CEAM) en la cámara EUPHORE, han señalado que las piezas cerámicas fotocatalíticas ensayadas a escala real son capaces de descomponer el NO_x y HNO₃ en una atmósfera real con humedad y concentraciones de contaminación iguales al aire que se respira en una gran ciudad con paso de tráfico permanente de vehículos. De igual forma se ha contrastado que el efecto descontaminante de estas cerámicas fotocatalíticas actúa de forma continuada, siempre que haya radiación solar.

6.6 PINTURAS FOTOCATALÍTICAS DE FACHADA DESCONTAMINANTES

Dentro del Proyecto MINOX STREET, también se llevaron a cabo análisis de comportamiento de pinturas fotocatalíticas aplicadas sobre diferentes tipos de fachadas.

Una de las empresas que suministró al Proyecto tres de sus pinturas fotocatalíticas fue Nanopinturas. En primer lugar, se evaluó la actividad fotocatalítica de las tres pinturas, sobre diferentes tipos de fachadas, mediante la Norma ISO 22197-1.

La aplicación de las pinturas sobre los distintos soportes de fachada se realizó según las indicaciones del fabricante.

En segundo lugar, se analizó la concentración de nitratos y nitritos tras la reacción fotoquímica, el efecto del envejecimiento y la respuesta a un proceso de lavado con agua, de las muestras que presentaban mayor capacidad de eliminación de NO_x .

Las pinturas analizadas se codificaron, dentro del Proyecto, como Muestras, 17, 25 y 26.

A continuación se presentan los resultados de los estudios realizados sobre la serie de la Muestra 17: 17A, 17B y 17C, aplicadas sobre fachada de piedra rugosa, sobre ladrillo cerámico tipo 1 y sobre ladrillo cerámico tipo 2, respectivamente.

En la siguiente figura se muestran los resultados de eliminación de NO_x .

Muestra	Descripción	Área muestra cm^2	FOTO
M17A	Fachada Rugosa con NP 23 1K	46,1	
M17B	Ladrillo Tipo 1 con NP 231K	48,5	
M17C	Ladrillo Tipo 2 con NP 231K	49,0	

Figura 75: Presentación de pinturas de fachada bajo el código de Muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET

	X_{NO} (%)	X_{NO_x} (%)	NO_{x_e} (μmol)	NO_e (μmol)	NO_{2f} (μmol)
M17A	37	28	10,9	14,8	3,3
M17B	29	15	5,6	10,9	5,0
M17C	18	11	6,9	4,8	2,8

Figura 76: Eliminación de NO_x . Muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET

Se puede observar que los mejores resultados se han obtenido sobre la fachada rugosa, con un 28% de reducción de concentraciones de NO_x .

Posteriormente, siguiendo la norma anteriormente citada, se ha analizado la concentración de nitratos y nitritos en la muestra mediante cromatografía iónica (Dionex ICS-2000). Los resultados se muestran en la siguiente figura.

El siguiente paso fue la realización de ensayos en cámara de envejecimiento acelerado (Aralab Fitoclima 200-EDTU) sometiendo las muestras a condiciones severas de 500 horas al 85% de humedad relativa y 85 °C, conforme a la Norma UNE_EN61215 para módulos expuestos a condiciones de intemperie.

	ρNO_3^- (mg/l)	ρNO_2^- (mg/l)
M17A	6,2	1,7
M17B	6,5	<0,1
M17C	4,2	<0,1

Figura 77: Concentraciones de nitritos y nitratos. Muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET

	X_{NO} (%)	X_{NO_x} (%)	NO_{x_e} (μmol)	NO_e (μmol)	NO_{2f} (μmol)
M17A-cámara	10	6	2,5	3,9	0,7

Figura 78: Envejecimiento en cámara de envejecimiento acelerado. Muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET

La muestra que mejores resultados obtuvo en el ensayo ISO 22197-1 de laboratorio fue la que se eligió para este ensayo acelerado. En esta ocasión los resultados obtenidos mostraban un nivel de reducción de NO_x del 6%.

Por último, se realizaron ensayos de envejecimiento manteniendo las muestras en condiciones de intemperie, situándolas en un panel con orientación sur y ángulo de inclinación de 45° (latitud 40° 27' 20" N, longitud 3°43'48" W). En estas condiciones las muestras permanecieron expuestas a los cambios de radiación solar, variación de la temperatura y humedad así como, a concentración de óxidos de nitrógeno y otros contaminantes presentes en el aire exterior, característicos del ciclo día-noche.

Los ensayos de lavado con agua denominados Suaves "L-S" se realizaron sumergiendo las muestras 30 veces consecutivas en agua destilada, a una velocidad de 5 cm s⁻¹. De forma complementaria se hicieron lavados denominados Fuertes "L-F" de acuerdo al lavado detallado en la norma ISO22-197 para la extracción de nitratos y nitritos tras el análisis de la eficiencia fotocatalítica.

La cara con el componente fotoactivo de la muestra se sumergió en agua destilada durante 60 minutos. Tras este periodo, se cambió el agua de lavado y se repitió el proceso. El recipiente donde se colocó la muestra con el agua, se sometió a un ligero movimiento, en un equipo Heidolph Titramax 1000 a 150 rpm para favorecer el proceso de lavado. Los resultados se muestran en la figura siguiente:

	Tiempo exposición h	LAVADO	X_{NO} (%)	X_{NO_x} (%)	NO_{x_e} (μmol)	NO_e (μmol)	NO_{2f} (μmol)
M17B	-	L-S	41	26	9,4	15,2	6,0
M17B	500	L-S	34	19	7,4	13,2	6,3
M17B	1000	L-S	30	17	6,0	10,7	5,3
M17B	1000	L-S+ L-F	10	6	2,1	3,51	1,8
M17C	-	L-S	36	22	8,6	14,1	5,6
M17C	-	L-S+ L-F	14	8	3,3	5,6	2,5

Figura 79: Envejecimiento a la intemperie y efecto de lavados. Muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET

La muestra M17B sometida a lavados suaves fue la que obtuvo mejores resultados, hasta un 26% de reducción de NO_x , incluso mejorando los resultados obtenidos antes de envejecimiento, que eran del 15%. El mismo fenómeno se ha producido, aunque en menor medida, con las muestras M17B y M17C: en ambos casos se observa una mejora sustancial de eficiencia fotocatalítica, tras el ensayo de envejecimiento y el efecto del lavado sobre las muestras, con respecto al ensayo inicial realizado con ISO 22197-1.

A continuación se analizan las Muestras codificadas como M25 y M26 (esta última con dos variantes M26A y M26B).

Muestra	Descripción	Área muestra cm^2	FOTO
M25	Ladrillo Tipo 2 con NP23/2K	48,7	
M26A	Ladrillo Tipo 2 con NP x2 23/2K	49,5	
M26B	Ladrillo Tipo 2 con NP x2 23/2K solo COMPONENTE A	49,5	

Figura 80: Presentación de pinturas para ladrillos cerámicos. Muestras 25 y 26. Fuente: LIFE MINOX STREET

En la siguiente figura se muestran los resultados de eliminación de NO_x de las muestras analizadas.

	X_{NO} (%)	X_{NO_x} (%)	NO_{x_e} (μmol)	NO_e (μmol)	NO_{2f} (μmol)
M25	4	3	1,5	1,1	0,7
M26A	10	6	3,9	2,5	1,7
M26B	26	17	10,4	6,7	3,9

Figura 81: Eliminación de NO_x . Muestras 25 y 26. Fuente: LIFE MINOX STREET

La Muestra 26B es la que mejores resultados presenta, con un 17% de eliminación de NO_x .

6.7 PINTURAS FOTOCATALÍTICAS AUTOLIMPIANTES

A continuación se expondrá un breve resumen de la prueba a escala real que la Empresa KEIM realizó durante 5 años en sus instalaciones de Alemania, para demostrar la capacidad autolimpiante de dos de sus pinturas al silicato fotocatalíticas, una de ellas representada por las Muestras 10651 y 1062 y otra, por las Muestras 10657 y 10658, con respecto a pinturas convencionales (que se comercializan como especialmente limpias) codificadas como Comp A (Muestras 10663 y 10664) y Comp B (Muestras 10669 y 10670).



Figura 82: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.

Para ello se pintaron 8 paneles, 4 con pinturas fotocatalíticas y otros 4 con pinturas convencionales y se expusieron a la intemperie durante 5 años.



Figura 83: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.



Figura 84: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.

Cada año se han ido tomando microfotografías de cada uno de los paneles, con objeto de analizar las impurezas (componentes orgánicas o inorgánicas) que iban quedando adosadas a las superficies de la pintura, donde se obtuvieron los siguientes resultados comparativos:



Figura 85: Comparativa de microfotografías tomadas sobre los paneles tratados y no tratados con fotocatalisis, tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.

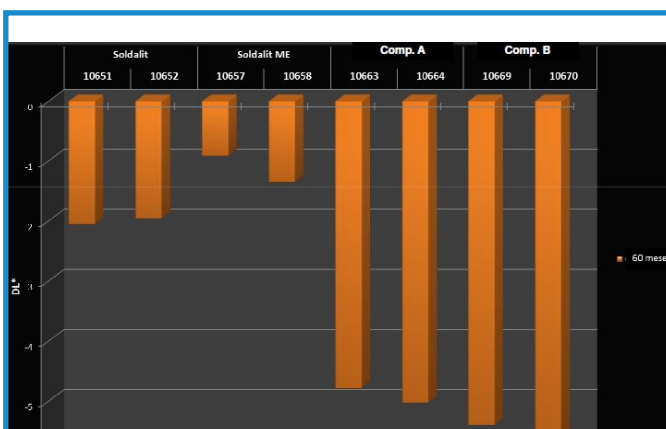


Figura 86: Comparativa de resultados de microfotografías tomadas sobre los paneles tratados y no tratados con fotocatalisis, tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.

6.8 PROYECTO ECO-SEE (REVESTIMIENTOS FOTOCATALÍTICOS INTERIORES)

ECO-SEE (www.eco-see.eu) es un proyecto de cuatro años (2013 – 2017) que se propuso desarrollar y evaluar el desempeño de materiales innovadores de construcción ecológica, entre los que estaban las aplicaciones fotocatalíticas para interiores.

Con la eficiencia energética en los edificios a la cabeza de la agenda política europea, Bruselas es sin duda el lugar donde mayor conciencia hay sobre la importancia de generar edificios con alto rendimiento energético. Sólo una minoría de la población mundial es consciente de que la calidad del aire en espacios interiores es un serio problema que debe abordarse con urgencia, por las graves consecuencias que tiene sobre la salud.

Según figura en la documentación pública de la web del Proyecto ©ECO-SEE, el aire interior de los edificios podría estar entre 2 y 5 veces más contaminado que en el exterior, debido a la presencia de contaminantes como los compuestos orgánicos volátiles (COV), liberados por muebles, productos de limpieza y textiles. También el moho y las bacterias resultantes de niveles excesivos de humedad son habituales en baños y cocinas.

En reconocimiento de este problema, la Comisión Europea ha apoyado una serie de proyectos de investigación que desarrollan materiales ecológicos para mejorar la calidad ambiental interior. El proyecto ECO-SEE, financiado con fondos comunitarios, ha desarrollado recubrimientos higrotérmicos que regulan los niveles de humedad relativa y la temperatura, materiales de aislamiento biológicos modificados para capturar los VOC y recubrimientos fotocatalíticos para eliminar los contaminantes interiores utilizando fuentes de luz visibles. Además, como estos materiales son naturales, la energía incorporada para producirlos es muy baja y al final de su vida útil pueden eliminarse de forma segura o, incluso reciclarse.

Los resultados del proyecto se mostraron en un taller final en Bruselas el 29 de junio de 2017. Los socios desarrollaron un panel de pared "multifuncional", que integraba varios de los materiales ecológicos mejorados durante el proyecto, para mostrar el potencial de estos materiales cuando se combinan. El panel estuvo en exhibición durante el evento, habiendo completado recientemente pruebas a escala real en con demostradores en el Reino Unido y en España.

Las principales conclusiones fueron las siguientes:

- 60% de mejora en la resistencia térmica y 80% de mejora en el rendimiento de amortiguación de la humedad de los revoques de arcilla;
- 180-720% de mejora en el potencial de captura de COV del aislamiento de lana de oveja;
- Desarrollo de revestimientos fotocatalíticos para la eliminación de contaminantes orgánicos (COV) bajo fuentes de luz visible. De hecho a día de hoy, según se establece en el apartado "Eco materiales en el mundo real" del Booklet ©ECO-SEE, ya se han instalado paneles fotocatalíticos en las oficinas centrales de la Empresa Skanska en Reino Unido para mejora de la calidad del aire interior.
- Hasta un 50% de mejora en el rendimiento energético de la pared ECO-SEE en comparación con paneles convencionales, que se tomaron de referencia, donde se emplearon materiales de aislamiento tradicional y acabado estándar.

Esta información ha sido extraída en su totalidad del Booklet ©ECO-SEE, February 2017 (Ling, J. et al.) y de la web: www.eco-see.eu.

7. CRITERIOS DE DISEÑO Y APLICACIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS

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, exposición, longitud de onda de la radiación, concentración de catalizador en el material de construcción, tamaño de partícula, fase cristalina, zona geográfica, tipo de sustrato sobre el que se aplica, etc. (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 existente, como su porosidad, el tipo y tamaño de los áridos o carga mineral que lo componen, el método de aplicación, la dotación aplicada, el grado de adherencia al soporte y la resistencia al envejecimiento (Shen y col. 2012).

7.1 DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES. EMISIÓN E INMISIÓN

- Se define como **emisión** de un contaminante la cantidad emitida desde una fuente contaminante en un tiempo definido, expresándose en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o partes por millón (ppm).
- Se define como **inmisión** la cantidad de contaminante que alcanza un punto determinado tras su transporte y difusión en la atmósfera. Los valores de inmisión de un lugar determinado dependen de sus características: condiciones atmosféricas, localización geográfica, características topográficas, etc.

Los estudios de **dispersión de contaminantes** y su impacto ambiental se realizan mediante programas de cálculo capaces de modelizar de forma representativa los procesos de emisión e inmisión, en función del tiempo y el espacio.

Los modelos son una vía de evaluación local, regional y global del impacto de una fuente contaminante, y se consideran instrumentos válidos para planificar y adoptar medidas paliativas. Mediante estos modelos, se localizan las zonas que sufren un mayor impacto de la contaminación atmosférica.

Por lo que respecta a fuentes móviles, los métodos para estimar la concentración de los contaminantes que generan se basa en el conocimiento de los vientos imperantes y la estabilidad atmosférica, ya que dicha concentración es directamente proporcional al número de fuentes emisoras, pero inversamente a la velocidad del viento. Por otra parte, la permanencia de los contaminantes depende de diferentes factores, como los mencionados vientos, las lluvias y la reactividad química del contaminante, entre otros. El conocimiento a día de hoy de los factores físicos y químicos que determinan el transporte, la dispersión, la transformación y la deposición de los contaminantes es limitado, puesto que dependen de un gran número de variables que no pueden ser cubiertos en su totalidad por los modelos.

En entornos urbanos, es importante tener en cuenta, a la hora de realizar estimaciones de dispersión de contaminantes, los tipos de vía y sus características: amplitud, pendiente, carriles utilizados, velocidades permitidas, puntos de parada de vehículos, combustibles utilizados, dispositivos reductores de emisiones, estado técnico de los vehículos, etc.

En resumen, la dispersión de los contaminantes emitidos por diferentes fuentes móviles puede ser modelizada mediante métodos complejos de computación. Algunos de ellos son de acceso libre, como los de la *Environmental Protection Agency* americana, y han sido mejorado en sucesivas versiones, como por ejemplo las CALINE 2, CALINE 3, CAL3QHC, CAL3QHCR y CALINE 4.

7.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DINÁMICA DE DISPERSIÓN

7.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS EMISIONES

- **Naturaleza del contaminante:** los gases permanecen durante períodos de tiempo más largos en la atmósfera que los sólidos o los líquidos, que tienden a precipitar.
- **Temperatura de emisión:** para el caso de gases contaminantes, la temperatura de la fuente determina su comportamiento en la atmósfera. Así, si son emitidos a mayor temperatura que la ambiente, tenderán a ascender favoreciéndose su dispersión. Si su temperatura es menor, se acumularán en las capas bajas de la atmósfera.
- **Velocidad de salida:** cuanto mayor sea la velocidad a la que es emitido el contaminante, tenderá

a ascender más rápido. En caso de inversión térmica, con mayor velocidad la probabilidad de atravesar la capa se invierte, y por tanto su facilidad de dispersión será mayor.

- **Altura de la fuente:** si la fuente se encuentra a mayor altitud, los contaminantes se dispersarán más fácilmente.

7.2.2 CONDICIONES ATMOSFÉRICAS

Como se ha indicado anteriormente, la dispersión de los contaminantes depende en gran medida de las condiciones atmosféricas, siendo los factores más importantes los siguientes:

- **Temperatura de aire y su variación con la altitud:** el gradiente térmico vertical. En los casos (la mayoría) en que la temperatura disminuye con la altitud, los contaminantes ascenderán con el aire y se irán diluyendo hasta alcanzar la estratosfera donde se dispersarán totalmente debido a los vientos en altura. Si no se dan estas corrientes de aire, los contaminantes se dispersarán más difícilmente. En el extremo, en zonas de inversión térmica, donde la temperatura aumenta con la altitud, los contaminantes se quedan en las capas bajas de la atmósfera. Los anticiclones, con pocos vientos, gran estabilidad atmosférica y mayor probabilidad de inversión térmica, favorecen esta última situación.

- **Velocidad del viento:** determina la rapidez con la que se dispersan los contaminantes.

- **Dirección del viento:** determina las zonas hacia las que se desplazan los contaminantes.

- **Dirección del viento.** Determina el área hacia donde se pueden desplazar los contaminantes emitidos.

- **Precipitaciones:** tienen un efecto positivo en la eliminación de los contaminantes atmosféricos,

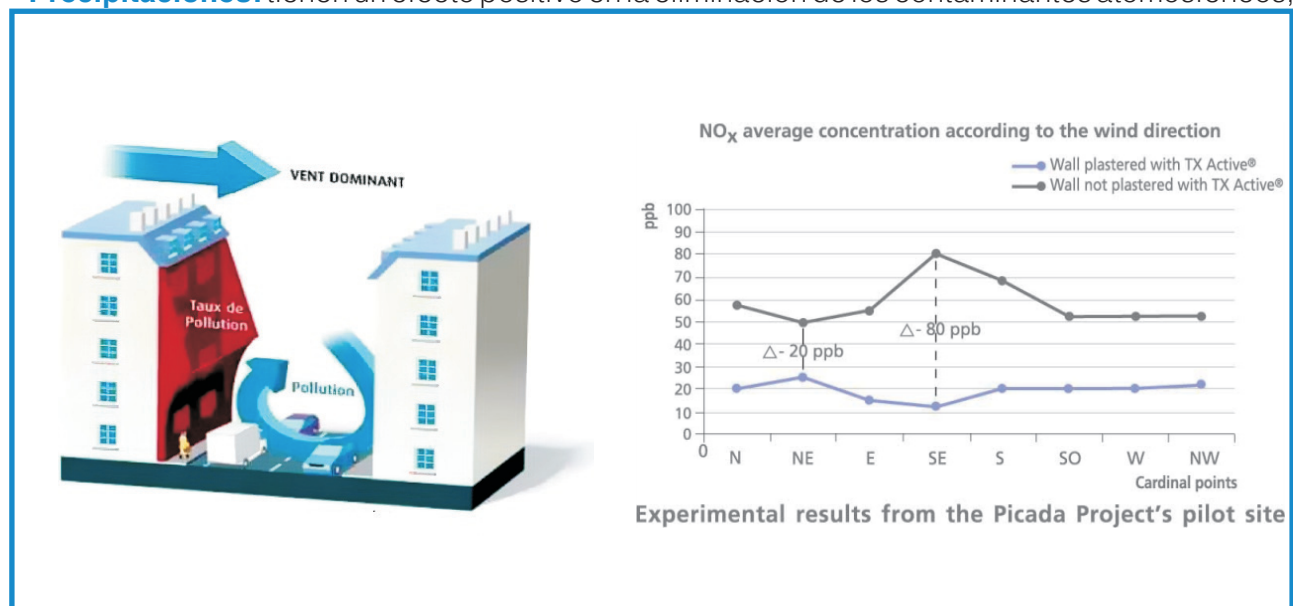


Figura 87: Influencia de la dirección del viento en los niveles de contaminación. (Italcementi. Resultados científicos. Proyecto PICADA)

arrastrándolos al suelo y “lavando” la atmósfera. Las bajas precipitaciones impiden este lavado y favorecen la resuspensión de los contaminantes depositados por el tráfico rodado.

• **Insolación:** la luz solar inicia reacciones fotoquímicas que generan contaminantes secundarios. En verano, la elevada insolación y las situaciones anticiclónicas favorecen la formación de aerosoles (p. ej. de sulfato y nitrato), NO_2 y ozono y su permanencia en la troposfera. Por este motivo, a igualdad de emisiones, el tráfico produce una mayor contaminación atmosférica en zonas del sur de Europa frente al centro y al norte.

7.2.3 CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS Y GEOGRÁFICAS

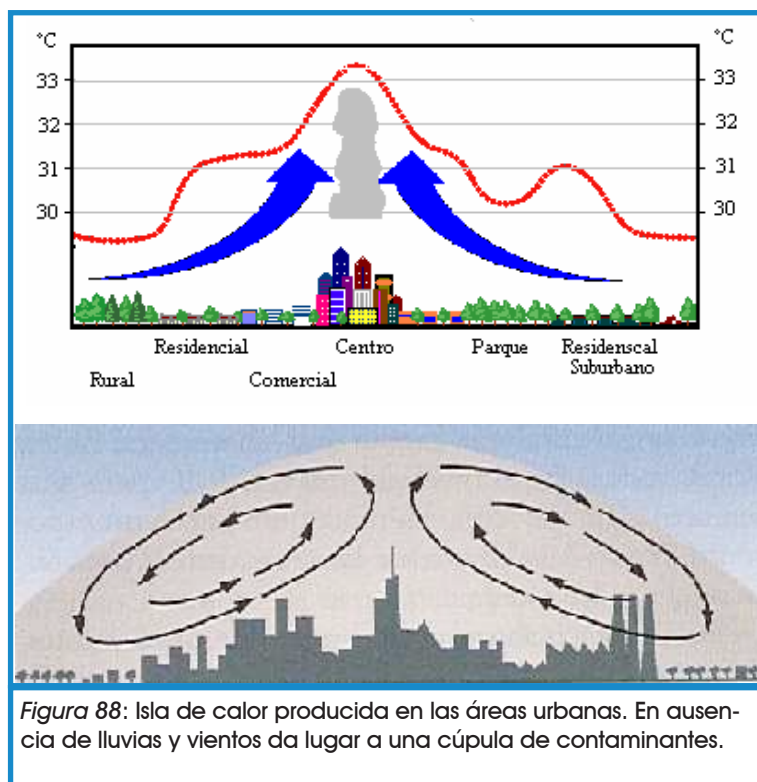
Como se indicó anteriormente, la situación geográfica de una localización y su relieve influyen en los vientos que provocan la dispersión o la acumulación de contaminantes.

Por otra parte, las masas vegetales disminuyen la contaminación del aire, puesto que al oponerse a la velocidad del viento favorecen su deposición en el suelo.

Por lo que respecta a la topografía, esta puede favorecer la inversión térmica, bien por la presencia de montañas en zonas costeras que dificulten la acción de los vientos marinos, o bien por la existencia de valles profundos con poca insolación en invierno.

• **Islas de calor:** las grandes urbes producen calor, no solo por las propias actividades que lo generan, sino también por la presencia de materiales (ladrillo, asfalto, cemento...) que lo retienen en mayor medida que el suelo y la vegetación. Por otra parte, generan contaminación cuya dispersión por el viento se dificulta por las construcciones que frenan los vientos. El nombre de “islas de calor” deriva del hecho de que en las ciudades se suelen registrar varios grados más de temperatura que en las afueras. Por este motivo, el aire urbano asciende y es sustituido por aire de la periferia, donde suelen estar las industrias contaminantes, que a su vez se desplazará hacia la ciudad donde se calentará y continuará el ciclo (Fig. 88). A falta de vientos fuertes y lluvias, este ciclo dificulta enormemente la dispersión de los contaminantes, dando lugar a las cúpulas de contaminación que suelen lucir las grandes ciudades (Fig. 88).

• **Brisa montaña-valle:** en zonas montañosas se suele dar este tipo



de brisa. Las laderas de las montañas se calientan durante el día, provocando una corriente de aire hacia arriba, mientras que en el valle, sin insolación, se acumula el aire frío, originándose una inversión térmica que dificulta la dispersión de contaminantes, como se ha explicado arriba. Durante la noche se acentúa esta inversión al descender el aire frío por la ladera.

- **Brisa marina:** en zonas de costa se producen brisas que, durante el día, al calentarse más la tierra que el mar, llevan aire marino al interior llevándose la contaminación, mientras que de noche se da la situación contraria. Esto favorece la dispersión de los contaminantes, pero al ser un fenómeno cíclico éstos no se dispersan completamente.

7.3 DURABILIDAD DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS

La durabilidad de los materiales fotocatalíticos depende de muchos factores.

En primer lugar se han de considerar las condiciones geográficas, topográficas y ambientales del emplazamiento a tratar.

En segundo lugar, es importante tener en cuenta las características y el estado del soporte de aplicación.

En tercer lugar, debe considerarse el uso que se le va a dar. No es lo mismo un pavimento sometido a la abrasión del tráfico que una pintura de fachada o una cubierta no transitable, por citar algunos ejemplos.

En cuarto lugar, no debe olvidarse el cumplimiento de los propios procesos de aseguramiento de la calidad del fabricante, desde la fase de suministro del principio activo o fotocatalizador. Es decir, la calidad del fotocatalizador y la calidad del proceso de fabricación y aplicación es esencial.

En quinto lugar estaría la calidad en la aplicación y/o colocación del material fotocatalítico en obra, teniendo en cuenta las posibles limitaciones ambientales en el momento de la colocación, especialmente a nivel de temperatura y viento, dependiendo del material fotocatalítico a emplear. Por último y no menos importante, estarían las operaciones de mantenimiento, sobre todo limpieza, y especialmente en pavimentos fotocatalíticos.

A continuación se procede a describir brevemente algunos de estos factores, cuyo efecto tendría un considerable impacto en la durabilidad.

Adicionalmente, se recomienda la lectura del apartado de la Guía de uso de materiales fotocatalíticos de este documento. (Apartado 7.4).

7.3.1 LIMPIEZA DE PAVIMENTOS

La aplicación de materiales fotocatalíticos en zonas urbanas es una tecnología que mejora la calidad del aire en áreas contaminadas, como se ha comentado anteriormente.

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 hormigones fotocatalíticos para infraestructuras urbanas, da 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 3.223.334 personas (personas empadronadas según el INE de 2018), con un consumo de agua diario de 445.135 m³/día (usando 136 L/heq/día) (https://www.ine.es/prensa/essa_2016.pdf), y considerando una superficie fotocatalítica de 1.000.000 m², 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/m² 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 0,13 mg/L al lavar completamente con agua 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 (*Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero y WHO. Guidelines for drinking-water quality. 4 th ed Geneva: WHO; 2011.*). (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_x, 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 o desengrasantes, 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 (*Richarson 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 evitasen la adsorción prolongada de elevadas concentraciones de nitratos, eliminando de este modo

parte o todos los nitratos adsorbidos en su superficie con las aguas de lavado. (Recomendable cada semana o quince días).

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_x según se trate de un recubrimiento fotocatalítico tipo emulsión o de una lechada fotocatalítica percolada para infraestructuras urbanas.

7.3.2 INFLUENCIA DE LA HUMEDAD RELATIVA

Al contrario de lo que se pensaba hace años se observa que los rendimientos o porcentajes de eliminación de óxidos de nitrógeno pueden variar significativamente con la humedad relativa de la zona de aplicación, lo que determina la considerable influencia de este parámetro en la reducción final de NO_x para los materiales fotocatalíticos.

Una de las muchas conclusiones extraídas del Proyecto LIFE MINOX STREET (se recomienda consultar www.lifeminoxstreet.com) es que, para garantizar el mayor rendimiento de los materiales fotocatalíticos, se recomienda que estos se apliquen en zonas geográficas que tengan unos valores de humedad relativa comprendidos entre 20% y 60%.

7.3.3 ABRASIÓN SUPERFICIAL (SOLO PARA PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS)

Los pavimentos fotocatalíticos pueden contribuir a reducir la contaminación debida al tráfico rodado al situarse cerca de la fuente contaminante y al tener una gran superficie de contacto con el aire contaminado. Sin embargo, también debido a su emplazamiento, sufren un estrés mecánico debido al tráfico y una erosión por las condiciones meteorológicas que pueden derivar en la liberación (ver apartados 9.14 y 10.3) y la pérdida del fotocatalizador. Por ello, los estudios de viabilidad de estos materiales deben incluir todo su ciclo de vida.

Estos estudios se han realizado en varios Proyectos, pero quizá el Proyecto LIFE PHOTOSCALING sea uno de los que más ha incidido en analizar esta cuestión. Los resultados obtenidos dependen de varios factores, aunque quizá los más influyentes sean la capacidad de adherencia al soporte y la resistencia a la abrasión del tráfico de cada producto. (Se recomienda la lectura del apartado 6.1.5 LIFE PHOTOSCALING).

7.3.4 LUZ

La luz es un componente esencial del proceso fotocatalítico, puesto que activa el fotocatalizador. En ausencia de luz, por tanto, el proceso simplemente no se da. La longitud de onda, y por tanto la energía, de la luz que puede activar el proceso depende de las características del fotocatalizador. El más habitual, TiO_2 , se activa con luz en la región del ultravioleta A (UV-A),

entre aproximadamente 320 y 400 nm de longitud de onda, que supone en torno al 5% de la luz solar que llega a la superficie terrestre. Por tanto, en exteriores, la luz solar es capaz de activar al TiO_2 para el proceso fotocatalítico. Sería deseable, por supuesto, utilizar en un porcentaje mayor la luz solar, y por ello uno de los objetivos clásicos de la investigación en fotocatalisis es conseguir materiales que se activen con luz visible, más abundante en la radiación solar que nos llega.

En interiores, sin embargo, es necesario el uso de lámparas UV-A para activar el TiO_2 , puesto que la luz ultravioleta del Sol es filtrada por el vidrio de las ventanas y las lámparas de luz blanca habituales no emiten apenas luz UV. Hay que tener en cuenta, en este sentido, que debe evitarse el uso de radiaciones UV-B y UV-C que, por una parte, son nocivas para la salud y, por otra, son innecesarias para activar el proceso fotocatalítico.

En aplicaciones interiores sería especialmente importante disponer de fotocatalizadores activos bajo luz visible. A nivel de investigación, se realizan ensayos en este sentido utilizando materiales alternativos al TiO_2 (p. ej. óxido de wolframio WO_3), o bien modificando éste mediante dopaje o combinación con otros materiales o sustancias que amplíen su espectro de actividad.

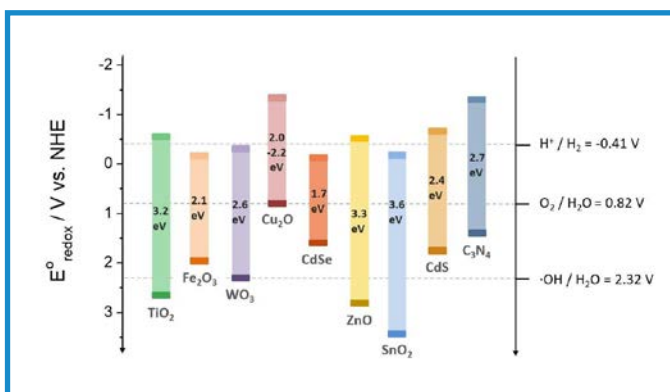


Figura 89: Potenciales redox a pH 7 frente al electrodo normal de hidrógeno de las bandas de valencia (inferior) y de conducción (superior) de algunos semiconductores potencialmente utilizables como fotocatalizadores, comparados con los de algunas semirreacciones relevantes. Los valores dentro de las barras coloreadas indican la anchura de banda prohibida (band gap) de cada material. Adaptada de Fresno y col., 2018.

Para más información se recomienda la lectura del apartado 6.8 referido al Proyecto ©ECO-SEE.

7.3.5 COLOR

Estos materiales de construcción con propiedades fotocatalíticas mantienen su actividad cuando se aditivan pigmentos de color, aunque los mejores resultados normalmente se obtienen con colores claros. Los colorantes empleados en la formulación deben ser pigmentos inorgánicos para evitar la propia degradación de la molécula orgánica y la pérdida de su capacidad colorante debido a la actividad fotocatalítica.



Figura 90: Algunos ejemplos de gamas cromáticas de productos fotocatalíticos.

7.3.6 HERRAMIENTAS DE AYUDA A LA SELECCIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS

En la actualidad hay algunas herramientas informáticas, actualmente en fase experimental, y que son de acceso libre que podrían emplearse para estimar la capacidad que podría tener un determinado material fotocatalítico. Este documento ha identificado dos, una asociada a textiles fotocatalíticos (<http://photocitytex.eu/>) y otra a pavimentos (PhotoScaling Decision Maker: <https://www.life-photoscaling.eu>). Para el empleo de esta última es necesario la realización de una batería de ensayos previos, de caracterización del material (ver apartado 6.1.5 de Proyecto LIFE PHOTOSCALING).

En cualquier caso, se recomienda que el potencial comprador de materiales fotocatalíticos solicite los pertinentes Certificados de Calidad de Producto, según los estándares ISO citados en este documento (en función de la aplicación) y el Certificado de Eficiencia Fotocatalítica que expide la Asociación Ibérica de Fotocatálisis, como primer paso.

7.4 GUÍA DE USO DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS – FOTOAIR

Introducción

Esta guía recoge las conclusiones finales que la Unidad de Análisis y Tratamiento Fotocatalítico de Contaminantes en Aire (FOTOAIR del CIEMAT) ha alcanzado después de realizar más de 418 análisis de las eficiencias fotocatalíticas obtenidas según norma ISO de un total de 26 materiales existentes en el mercado.

Un acuerdo de confidencialidad firmado entre los empresarios suministradores de los materiales fotocatalíticos y los componentes del equipo de investigación del proyecto Life MINOX-Street en el que se sustenta esta investigación, impide identificar por su nombre o fabricante los materiales ensayados.

Objetivos

El proyecto se enmarca en la Estrategia Temática sobre la Contaminación Atmosférica de la UE, cuyo propósito es la protección de la salud pública a través del cumplimiento de objetivos de calidad del aire, limitando la concentración de determinados contaminantes.

El proyecto LIFE MINOX-STREET se ha dirigido a la reducción de óxidos de nitrógeno (NO_x) en la atmósfera como principales contaminantes asociados al tráfico rodado.

Así, el proyecto ha desarrollado numerosas acciones destinadas fundamentalmente a demostrar las posibilidades reales de aplicación de los materiales fotocatalíticos en entornos urbanos.

Esta Guía resume las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto por el Grupo FotoAir del CIEMAT y se presenta a las Administraciones Públicas responsables de la gestión de la calidad del aire, y al público en general, con el objetivo de establecer pautas útiles de cara a la implementación de materiales fotocatalíticos como coadyuvantes para la reducción de la contaminación atmosférica en el entorno urbano.

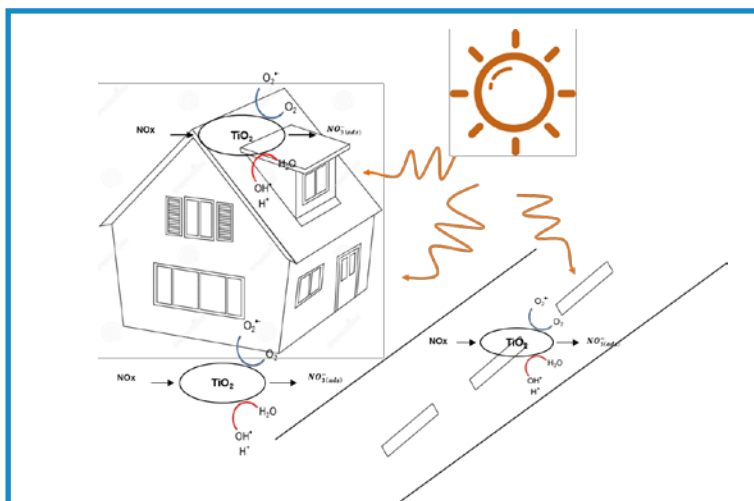


Figura 91: Eliminación fotocatalítica de NO_x mediante el uso de materiales fotocatalíticos en diferentes emplazamientos.
Fuente: Fotoair.

La Figura 91 muestra un esquema que representa la eliminación fotocatalítica de NO_x mediante el uso de materiales fotocatalíticos. Una revisión más profunda de los principios y fundamentos básicos que sustentan la fotocatalisis se puede leer en español en el libro editado por el CIEMAT (Blesa. 2004.).

1. Selección del emplazamiento

Uno de los parámetros básicos para que la fotocatalisis funcione de la manera más eficiente posible es la relación superficie/volumen. Resulta prioritario potenciar que esta relación sea lo más alta posible. Así pues, es recomendable implementar los materiales fotocatalíticos en tejados y cubiertas de edificios así como en calles relativamente “estrechas” con fachadas “altas”, intentando que no se vea por ello comprometida en exceso la cantidad de luz que reciben las superficies tratadas.

1.1. Sustrato

Durante el proyecto se ha trabajado con tres tipos de sustratos urbanos: asfaltos, pavimentos de acera y fachadas.

Una de las conclusiones principales del proyecto ha sido que la elección del sustrato es un factor determinante en la potencial reducción de óxidos de nitrógeno por productos fotocatalíticos. Por ello, se recomienda la realización de ensayos sobre los sustratos a seleccionar antes de decidir su aplicación sobre el producto final.

La aplicación de productos fotocatalíticos sobre cada uno de ellos tiene ventajas, inconvenientes y consideraciones especiales que deben tenerse en cuenta y que se pasan a relatar.

1.1.1. Asfaltos

En general, los asfaltos utilizados en las carreteras españolas pueden ser mezclas bituminosas abiertas (por ejemplo BBTM 11B) o cerradas (por ejemplo AC16S). Los ensayos realizados a lo largo del proyecto han revelado que el rendimiento fotocatalítico para la eliminación de óxidos de nitrógeno es mayor si el producto se deposita sobre mezclas cerradas. También se ha demostrado que se obtienen mejores resultados si se aplica el producto sobre asfaltos

envejecidos (zonas por las que ya se haya producido tránsito de vehículos). Además, conviene realizar una limpieza a conciencia de la zona (con agua y desengrasantes comerciales) antes de aplicar el producto fotocatalítico, para mejorar de esa manera la adherencia de este al sustrato. A lo largo del proyecto se ha determinado que el tráfico rodado puede producir el arrastre del material y, consecuentemente reducir la actividad fotocatalítica. Sin embargo, se ha demostrado que este efecto no es tan influyente como la deposición de grasas, partículas y suciedad procedentes de los vehículos a motor. Algunos productos han demostrado que pueden conservar actividad fotocatalítica después de 20 meses desde su aplicación.

Por último, es necesario tener en cuenta que los productos fotocatalíticos pueden modificar las propiedades del material soporte, por lo que es necesario asegurar que no se producen pérdidas de las propiedades físico-mecánicas exigidas para su uso.

Por este motivo, se hace necesario ensayar estos aspectos con el fin de asegurar que el material soporte sigue cumpliendo, tras la aplicación del producto fotocatalítico, las normas específicas para su aplicación. Estos ensayos pueden llevarse a cabo en el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

1.1.2. Pavimentos de acera

A lo largo del proyecto se han ensayado hasta 9 sustratos de acera diferentes: baldosas, loseta, adoquines negro y rojo, terrazos blanco y rojo, cemento gris y hormigones.

Tras analizar todas ellas, se determinó que los sustratos con mayor porosidad eran los más adecuados para la aplicación de productos fotocatalíticos. El aumento de la porosidad tiene como consecuencia un incremento de la superficie específica del sustrato. Así, el producto aplicado sobre una mayor superficie específica tendrá más centros activos disponibles para que se den las reacciones por las cuales se mineralizan los NO_x presentes en el aire ambiente.

A la vista de los resultados obtenidos, resultó más adecuada la selección de mezclas cementosas u hormigones para la aplicación de productos fotocatalíticos, en detrimento de baldosas o adoquines.

Al igual que para las mezclas asfálticas, se hace necesario asegurar que no se producen pérdidas de las propiedades físico-mecánicas exigidas para el uso de los pavimentos de acera.

1.1.3. Fachadas

El principal sustrato de fachada utilizado en España es el ladrillo. De esta manera, gran parte de los ensayos realizados en laboratorio para fachadas se han llevado a cabo utilizando el ladrillo como soporte. Además, 14 de los 25 productos ensayados durante el proyecto estaban destinados a su aplicación sobre fachadas.

Esta superficie presenta claras ventajas sobre las asfálticas y de acera, ya que en ella no se produce desgaste por el tránsito de vehículos y personas. Además, las fachadas tienden a ensuciarse en menor medida que las superficies pisables.

Lamentablemente, los resultados obtenidos a partir de los materiales fotocatalíticos ensayados para fachadas presentaron una menor durabilidad que los preparados para asfaltos y aceras.

Esto hecho puede deberse a la falta de rugosidad de este tipo de materiales, que tiene como consecuencia una peor adherencia del producto sobre el sustrato y por lo tanto una menor eficiencia fotocatalítica.

Así pues, para obtener actividad de los productos fotocatalíticos estudiados sobre fachadas, es necesario implementarlos en sustratos más rugosos que el ladrillo, como son el hormigón o el cemento.

1.2. Condiciones ambientales

La climatología de la zona en la que se pretenda implementar los productos fotocatalíticos es otro de los factores a tener en cuenta a la hora de seleccionar un emplazamiento.

En las zonas muy ventosas, se hace difícil que se produzcan episodios de contaminación importantes, ya que predomina el efecto de dispersión de los contaminantes.

Resulta evidente que la presencia de luz solar es uno de los parámetros clave para el óptimo desarrollo de los procesos de eliminación fotocatalítica de NO_x . Los ensayos en laboratorio han revelado que no es necesaria una gran irradiancia para obtener un rendimiento óptimo (a partir de 10 W m^{-2} el rendimiento es máximo aunque aumente la irradiancia). A efectos prácticos, se debe buscar un emplazamiento que tenga las máximas horas de luz diarias y tener en cuenta que los productos fotocatalíticos pueden seguir funcionando con actividades aceptables aún con la presencia de nubes.

En cuanto al grado de humedad, en general se ha observado que los productos fotocatalíticos tienen mejor rendimiento con bajos porcentajes de humedad relativa y presentan su máximo de actividad entre el 40% y el 50%.

En cuanto a la concentración de NO_x en la zona, se ha demostrado que no es un factor dominante en lo que a la actividad fotocatalítica significa. En términos prácticos, los gestores de los municipios ubicados en lugares con humedad relativa elevada, han de tener en cuenta este parámetro para la selección de un producto fotocatalítico adecuado a las condiciones en las que debe operar (materiales hidrófobos entre otros).

2. Selección del producto fotocatalítico

Entre los productos fotocatalíticos comerciales estudiados, existe una gran variabilidad en las eficiencias de reducción fotocatalítica de NO_x . Esta es una de las principales conclusiones del proyecto Life MINOX-Street.

La ausencia de una norma común para determinar la actividad fotocatalítica de los productos presentes en el mercado a día de hoy hace difícil la elección al usuario final.

Por este motivo, urge la adopción de sistemas de control oficiales que garanticen los datos ofrecidos en el etiquetado de los productos.

Hasta que estos sistemas de gestión queden establecidos, los usuarios finales de los productos fotocatalíticos deberán acudir a laboratorios especializados en la realización de ensayos normalizados y reproducibles, como el grupo Fotoair de Ciemat.

Los laboratorios especializados deberán acreditar si el producto que se desea implementar posee un aceptable rendimiento fotocatalítico para la reducción de NO_x , una durabilidad máxima y una elevada capacidad de regeneración tras lavado.

2.1. Evaluación de la actividad fotocatalítica inicial

Se debe evaluar el potencial de eliminación de NO_x de los materiales comerciales mediante ensayos estandarizados (norma ISO 22197-1:2007 y UNE-ISO 22197-1:2012) o similares, con el fin de poder comparar claramente las capacidades fotocatalíticas de los diferentes productos.

Desde el grupo Fotoair-Ciemat se ha propuesto una clasificación de los materiales en función de su actividad fotocatalítica inicial. La clasificación se describe en la Tabla siguiente:

Tabla 11
Clasificación propuesta para la actividad fotocatalítica inicial de materiales evaluados según norma ISO.

Clasificación	NO_{x_e} (μmol)	X NO_x (%)
A	> 10	> 25
B	$5 < B < 10$	$12,5 < B < 25$
C	$0,5 < C < 5$	$1,2 < C < 12,5$

Resulta deseable que la capacidad de eliminación mostrada por el producto sea lo más alta posible (tipo A).

2.2. Durabilidad de los materiales

La durabilidad de los materiales es un parámetro clave a la hora de implementarlos en condiciones reales. Los ensayos de envejecimiento en intemperie realizados en el marco del proyecto han resultado muy útiles para establecer la resistencia a las condiciones de intemperie de diversos materiales. Sin embargo, estos ensayos requieren grandes periodos de tiempo para evaluar la evolución de la actividad fotocatalítica con el tiempo. Desde el grupo Fotoair-Ciemat se propone un procedimiento alternativo, que podría evaluar la durabilidad de los materiales en cuestión de 2 días.

Este procedimiento consistiría en la saturación acelerada de los materiales en reactor y en presencia de NO . Se pretende evaluar el tiempo que tarda un material en dejar de eliminar NO_x cuando es sometido a las condiciones establecidas en la norma ISO (salvo la concentración de NO inicial). Basándonos en ensayos previos, se recomienda una concentración inicial de en torno a 7 ppm, con el objetivo de acelerar el proceso. Así, el ensayo puede llevarse a cabo en un rango de entre 5 y 15 horas, según el material.

Así, cuanto mayor sea el tiempo que tarde el material en saturarse, mayor será la durabilidad del material.

2.3. Capacidad de regeneración

Como se ha establecido en las conclusiones del proyecto, la pérdida de actividad fotocatalítica debida a la acumulación de nitratos en la superficie fotoactiva, procedentes de las reacciones de fotooxidación de NO_x , puede revertirse mediante lavado con agua de lluvia o procesos de baldeo.

El último factor a evaluar sería el grado de recuperación que se puede alcanzar tras la desactivación total del material y posterior lavado. El ensayo consistiría en realizar un lavado de 15 minutos con agua destilada de la muestra saturada anteriormente en reactor. El tiempo se ha establecido en relación a los ensayos de regeneración realizados en el marco del proyecto. Así, el material que muestre una mayor conversión de NO_x tras lavado, será el que regenere sus capacidades de eliminación de NO_x en mayor proporción tras los procedimientos de lavado establecidos.

3. Aplicación y mantenimiento

Una correcta aplicación de los productos fotocatalíticos y un mantenimiento periódico de las zonas fotocatalíticas son imprescindibles para el correcto funcionamiento de los mismos.

3.1. Aplicación

Sea cual sea la superficie sobre la que se van a implementar los productos fotocatalíticos, esta debe encontrarse limpia antes de la aplicación de los mismos. Se debe llevar a cabo, pues, una limpieza concienzuda de la zona, utilizando para ello agua y desengrasantes comerciales. Este proceso asegurará la correcta adherencia del producto al sustrato.

En cuanto al método de aplicación, en muchas ocasiones es el fabricante el que recomienda el que más favorece a las especificaciones de su producto. Así mismo, conviene tener en cuenta la posibilidad de que el fabricante/suministrador únicamente asegure los resultados del producto si es él mismo quien se encarga de su aplicación, en cuyo caso será necesario prever los aspectos logísticos y los costes asociados a esta elección. En cualquier caso, debe asegurarse que el producto se aplique con la máxima homogeneidad posible, ya que es un factor determinante en la actividad fotocatalítica. A efectos prácticos, una aplicación con rodillo resulta más eficaz que la aplicación mediante spray.

Ciertos productos requieren de un proceso de activación previa, como un simple lavado con agua que promueve sus propiedades fotocatalíticas. Este proceso elimina de su superficie restos del proceso de síntesis que inhiben su capacidad descontaminante. Por ese motivo, es recomendable la realización de un lavado de la superficie cuando el producto se encuentre totalmente seco. Por último, cabe mencionar la importancia de no reabrir el tramo implementado al tránsito normal (de peatones o de vehículos para aceras y asfaltos) hasta que el producto se encuentre totalmente seco.

3.2. Mantenimiento

Una de las principales conclusiones del proyecto ha sido que, en condiciones de exposición a intemperie, los materiales muestran una reducción de sus capacidades fotocatalíticas. Este

decaimiento en la actividad se ha relacionado con la acumulación de nitratos en la superficie del material y con la deposición de materia orgánica (hollín, partículas, suciedad...). La acumulación de nitratos en superficie es el resultado de las propias reacciones de mineralización del contaminante, que tienen como subproducto final los óxidos de nitrógeno.

Tras los estudios de regeneración realizados en el marco del proyecto, se puede concluir que los lavados con agua y desengrasantes comerciales son un método efectivo para la eliminación tanto de los nitratos como de la materia orgánica acumulada.

Así pues, las tareas de baldeo de calles y aceras realizadas habitualmente por los ayuntamientos y lavado producido por el agua de lluvia de manera natural son métodos más que suficientes para la regeneración de los materiales fotocatalíticos. No obstante, conviene tener en cuenta que los baldeos realizados con barredora pueden resultar un método demasiado abrasivo, lo que puede traducirse en una pérdida de material fotocatalítico. Así pues, se recomienda no utilizar estas barredoras en las zonas implementadas con productos fotocatalíticos.

Además de las tareas de lavado, resulta necesario realizar un seguimiento del rendimiento a lo largo del tiempo mediante un sistema de medidas *in situ* de la actividad fotocatalítica, con el fin de conocer cómo evoluciona la capacidad de reducción de NO_x del material y establecer cuándo es necesario reaplicar el producto. Las normas de estandarización seguidas en este proyecto han requerido unas dimensiones de las probetas determinadas lo que ha influido en la actividad fotocatalítica final de las mismas. Se recomienda evitar el corte de las probetas de forma posterior a su implementación en escenario real para alterar lo menos posible la superficie fotoactiva. De acuerdo con lo indicado en el apartado de durabilidad, será necesario tener prevista la necesidad de reaplicar el producto en el momento en que, conforme a lo identificado en el seguimiento de la evolución de su rendimiento fotocatalítico, éste se encuentre por debajo del nivel que se considere aceptable.

8. AVANCES EN FOTOCATÁLISIS EN ESPAÑA DURANTE EL SIGLO XXI

En el tercio final del siglo XX, la fotocatalisis era una tecnología prácticamente desconocida en gran parte del mundo y por supuesto en Europa. Sólo Japón, gracias al gran crecimiento económico vivido entre los años 60 y 80 (conocido como el “Milagro Japonés”), pudo desarrollar ampliamente esta tecnología y aplicarla con carácter general a sus infraestructuras. El Profesor y Dr. Akira Fujishima (Expresidente de la prestigiosa Universidad de Ciencias de Tokio y actual Director del Centro Internacional de Fotocatalisis), es a día de hoy el máximo exponente científico-técnico del sector de la fotocatalisis.

A principios del siglo XXI la fotocatalisis se comenzó a desarrollar en Europa, pero no fue hasta la primera década del año 2000 cuando se comenzaron con las primeras aplicaciones. El caso más destacado es el de Italia, que contaba por decenas sus aplicaciones en construcción durante esos primeros años. Posteriormente, otros países como Alemania, Francia, España y Dinamarca tomaron la iniciativa. Especial mención merece España que durante la década del 2010 ha llevado a cabo numerosos Proyectos de Investigación, cuyo objetivo fue aumentar el conocimiento en las condiciones de aplicación de la tecnología fotocatalítica, así como establecer protocolos de medida de su eficiencia. España, por su gran cantidad de horas de radiación solar, se sitúa como uno de los países del mundo con mayor potencial de aplicación de estas tecnologías.

Sin embargo, el desconocimiento de esta tecnología, por parte de numerosas Administraciones Públicas y Privadas, la ausencia de protocolos de actuación y medición de su eficiencia, el intrusismo de Empresas fraudulentas que comercializan productos fotocatalíticos sin realmente serlo, y el



Figura 92: Dr. Akira Fujishima, Director del Centro Internacional de Fotocatalisis en Tokio, y el Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatalisis, David Almazán, en un Congreso de Fotocatalisis celebrado en Copenhague en Abril de 2018. Fuente: AIF.

coste de estos nuevos materiales, hacen que el mercado no esté suficientemente maduro en la actualidad.

Conscientes de esta situación, la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y otros Centros Tecnológicos, llevan trabajando varios años en tratar de establecer un protocolo de actuaciones encaminadas a dar la mayor información posible al consumidor final, a identificar productos fraudulentos del mercado y a estimular a los prescriptores de las ventajas del uso de estas tecnologías.

A continuación se describen brevemente algunos de los logros que se han llevado a cabo en materia de fotocatalisis en los últimos años.



Figura 93: Iglesia Dives in Misericordia. Roma (Italia), construida con elementos prefabricados de hormigón blanco con cemento fotocatalítico de Heidelberg Cement Group y cuyo arquitecto fue Richard Meier.

8.1 CERTIFICADO DE EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA

Entre los años 2011 y 2013, Eptisa, Servicios de Ingeniería, con financiación del CDTi, desarrolló el primer prototipo multiensayo de evaluación de la eficiencia fotocatalítica de productos, en cuanto a sus prestaciones de abatimiento de NO_x se refiere. Este prototipo permitía realizar ensayos tanto con la Normativa ISO 22197-1, como con la Norma UNI 11247:2010, aunque también se desarrolló una metodología de ensayo *in situ*, que evitaba la extracción de testigos de la superficie descontaminante.

Para la realización de las pruebas de verificación del equipo multiensayo se realizaron ensayos interlaboratorios, en una primera fase, de comprobación de resultados. Y en una segunda fase se hizo un llamamiento al mercado para evaluar la eficiencia descontaminante de productos, por las Normas ISO y UNI antes mencionadas.

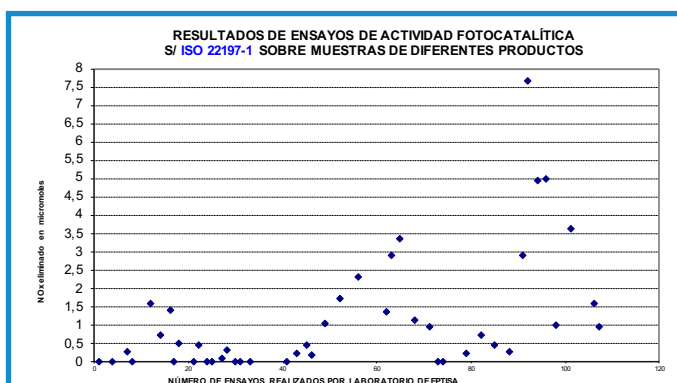


Figura 94: Resultados de ensayos realizados por EPTISA durante los años 2011 y 2013, con la Norma ISO.

Con la Norma ISO se realizaron más de 50 ensayos durante los años 2011 y 2013. Los resultados obtenidos fueron muy heterogéneos y en esos años no había un umbral de aceptación, a partir del cual se considerase que un producto era fotocatalítico en el mercado español. Por ello se acudió a adoptar los umbrales aceptados en Japón. En este país un producto tenía la consideración de fotocatalítico, cuanto a abatimiento de óxidos de nitrógeno se refiere, cuando el ensayo demostraba un abatimiento de 0,5 micromoles.

De los resultados obtenidos se pudo concluir que prácticamente la mitad de los productos comerciales ensayados en el mercado no tenían actividad fotocatalítica, y sin embargo se vendían como tal. Por cautela todos aquellos ensayos que sugerían una actividad fotocatalítica inferior a 0,5 micromoles eran repetidos nuevamente en laboratorio. Si bien, los resultados no fueron distintos.

De la misma manera que se hizo con la Norma ISO, se hizo con la Norma UNI. En este caso la unidad resultante son porcentajes de NO_x eliminados. Igualmente los resultados obtenidos fueron muy heterogéneos, pues estaban comprendidos en el rango 0% a 48% de reducciones de NO_x.

En esta ocasión no existía un umbral de aceptación, a partir del cual se puede clasificar un producto como fotocatalítico o no.

En esos años comenzaban las primeras demandas de nuevos materiales fotocatalíticos en el sector de la construcción y con ello la mejora en la eficiencia descontaminante de los productos ensayados. En este sentido, los resultados obtenidos por el laboratorio de Eptisa se ordenaron cronológicamente, tanto los realizados con la Norma ISO, como con la Norma UNI, donde se pudo demostrar una clara tendencia en la mejora de materiales fotocatalíticos.

A partir de este estudio, donde quedó de manifiesto la circulación de productos fraudulentos en el mercado, la AIF empezó a trabajar, en colaboración con la Federación Europea de Fotocatálisis (EPF, en adelante), en la elaboración de un Certificado que diera más información al Cliente final del producto que se adquiría y que de manera indirecta permitiera regular el mercado, eliminando los productos fraudulentos.

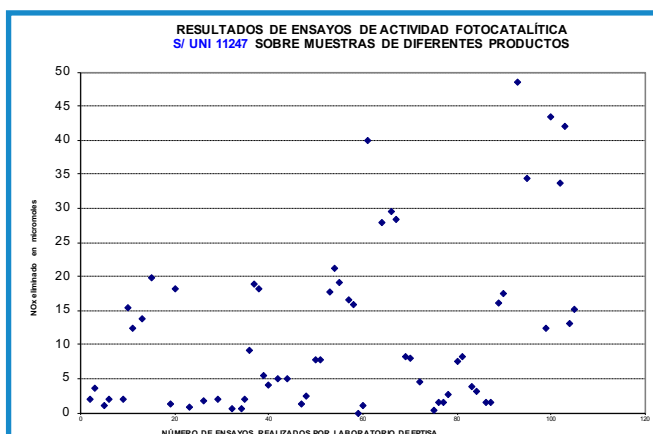


Figura 95: Resultados de ensayos realizados por EPTISA durante los años 2011 y 2013, con la Norma UNI.

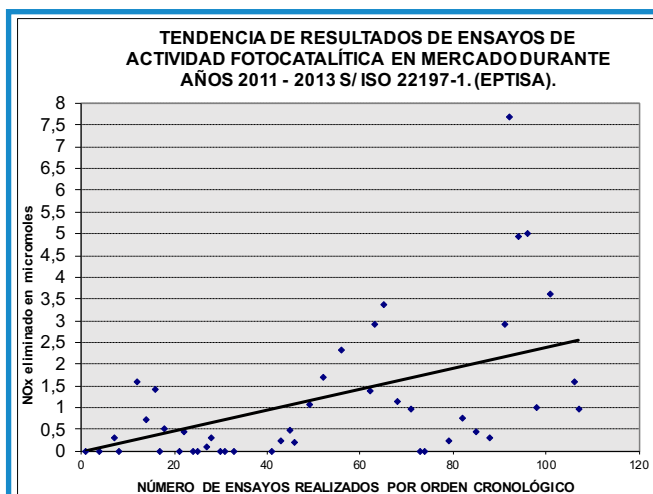


Figura 96: Tendencia de mejora de eficiencia de materiales fotocatalíticos entre los años 2011 y 2013, según la Norma ISO. Fuente: Laboratorio de EPTISA.

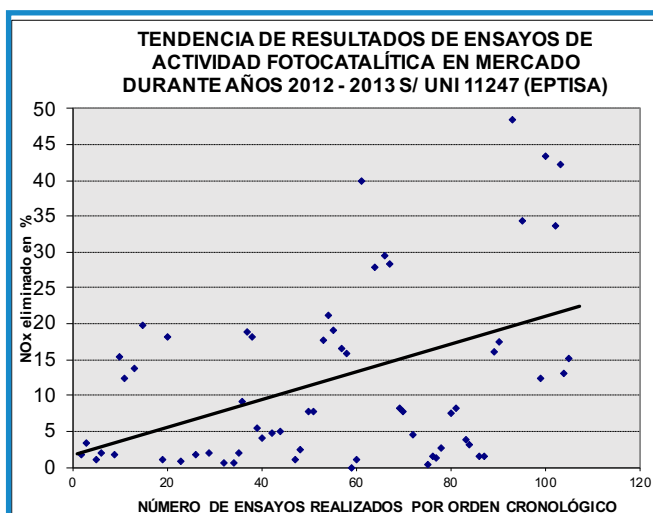


Figura 97: Tendencia de mejora de eficiencia de materiales fotocatalíticos entre los años 2011 y 2013, según la Norma UNI. Fuente: Laboratorio de EPTISA.

La complejidad de crear una metodología europea común para otorgar Certificados de Eficiencia Fotocatalítica de materiales, debido a la gran diversidad de productos, a las distintas culturas que poseen los países que componen la EFP y al distinto grado de avance de la tecnología fotocatalítica en cada mercado, ha propiciado que cada país miembro de la EFP diseñe y otorgue su propio Certificado de Producto.



Figura 98: Imagen de prototipo multiensayo.
Fuente: Eptisa.

Definición de protocolo de articulación de Certificado en la AIF (España y Portugal)

El Certificado de producto fotocatalítico se otorgará por parte de AIF en las siguientes condiciones:

1. Sólo se otorgará a socios de AIF
2. Se otorgará por producto y no por empresa y se anexará el ensayo que certifique la eficiencia fotocatalítica del mismo. Si este ensayo tuviera una antigüedad superior a un año, será un responsable autorizado de esta empresa quien emita un Certificado que garantice que tanto la formulación del producto fotocatalítico, como la calidad del producto final fabricado, mediante proceso industrial, bajo las condiciones de la Norma estandarizada que avale su capacidad fotocatalítica (UNI, ISO o CPF de acuerdo al mercado CE, etc.), no ha variado con respecto al año de realización del ensayo. Este certificado se anexará al que expida AIF.
3. En el caso de que un socio industrial incorpore un mismo revestimiento superficial fotocatalítico, testado por un laboratorio externo y revisado en su día por el Comité científico-técnico de AIF, sobre distintos productos auxiliares o soportes, deberá emitir un documento (firmado por responsable autorizado) que certifique esa casuística, exponiendo que se ha comprobado científicamente que la aplicación de este único recubrimiento sobre distintos materiales auxiliares o soportes, no modifica su eficiencia fotocatalítica. Esta situación sería también de aplicación para todos aquellos socios que comercialicen recubrimientos fotocatalíticos de distintos colores.
4. En el caso de que un socio industrial utilice un mismo material fotocatalítico, testado por un laboratorio externo y revisado en su día por el Comité científico-técnico de AIF, en distintos formatos, deberá emitir un certificado (firmado por responsable autorizado) que indique que las distintas versiones del producto utilizan el mismo material fotocatalítico que el ensayado.
5. Si en alguna ocasión se produjera alguna denuncia, por parte de algún Cliente, a AIF o a algunos de sus socios, que demostrara que un producto Certificado como producto fotocatalítico



Figura 99: Certificado de eficiencia de producto fotocatalítico. Fuente: AIF.

por AIF, en las condiciones certificadas por AIF, no coincidiera con lo expuesto en el certificado de garantía expedido por el responsable autorizado de la compañía involucrada, se realizará un ensayo de comprobación, preferiblemente en uno de los laboratorios de AIF, y posteriormente se revisará por el comité científico de AIF. Si el resultado es favorable se comunicará a ambas partes. Si el resultado es desfavorable se anulará el Certificado del producto y se decidirán las acciones a llevar a cabo, respecto al socio en cuestión, mediante asamblea general.

8.2 ISLA FOTOCATALÍTICA

En el año 2012, la Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo (EMVS) del Ayuntamiento de Madrid, en colaboración con AIF, inicia el proceso de gestión de convertir el Eco-barrio de la Rosilla (Madrid) en una Isla Fotocatalítica. Además de perseguir los efectos descontaminantes y autolimpiantes (en fachadas), también se implementaron otra batería de medidas encaminadas a la reducción de consumos energéticos, con carácter general.

El Ecobarrio de La Rosilla se enmarca en la iniciativa de la EMVS de programa piloto sobre barrios ecológicos, que junto a Plata y Castañar, San Francisco Javier, Nuestra Señora de los Ángeles, Los Olivos, El Lucero y el Barrio del Aeropuerto, expresa la voluntad de aplicar criterios de sostenibilidad desde el primer momento de su diseño, ejecución, gestión y mantenimiento. El objetivo de la operación era convertir una superficie de 98.000 m² en 400 viviendas para más de 1300 personas que conformen una “comunidad urbana sostenible”.

En lo que respecta a la Isla Fotocatalítica, se llevó a cabo la primera fase, fase de urbanización, donde el pavimento destinado al tráfico rodado fue fotocatalítico y el pavimento peatonal también.

Lamentablemente, debido a la fuerte crisis financiera y económica que azotó a Europa y sobremanera a España durante esos años, la segunda fase, la de edificación, no se llegó a llevar a cabo. Para esta segunda fase estaba previsto el diseño de envolventes de edificación fotocatalíticas, con objeto de completar la isla.

Se trataba de experimentar un nuevo concepto de “microciudad” autónoma, energéticamente autosuficiente, que se sustente en una estrecha relación con el medio en que se sitúa, el empleo generalizado de tecnologías avanzadas y el establecimiento de un marco distinto de relaciones urbanas orientadas a favorecer su habitabilidad.

En cualquier caso, esta acción sienta las bases para futuras islas fotocatalíticas.



Figura 100: Imágenes que muestran el estado del Barrio de La Rosilla (Distrito de Vallecas. Madrid) antes y después de convertirlo en Eco-Barrio. Fuentes: Ezquiaga Arquitectura y Eptisa.

8.3 INCLUSIÓN EN PLIEGOS DE ADMINISTRACIONES PÚBLICAS

A principios de la década del 2010, el Ministerio de Medio Ambiente Italiano publica un Documento, “La calidad del aire en la Escuela: Un deber de todos, una derecho de los niños”, donde en su capítulo 4 se toma como medida de mejora del calidad del aire la tecnología fotocatalítica.

Unos años después, en la Jornada de Pavimentos y Edificios Descontaminantes y Autolimpiantes de Octubre de 2014, organizada por AIF, D. Manuel Valdés, Gerente de

Infraestructuras del Ayuntamiento de Barcelona en ese año, anunció la inclusión de los materiales fotocatalíticos en los Pliegos de Condiciones de Obras del Ayuntamiento de Barcelona.

Ese mismo año se incluye la tecnología fotocatalítica dentro de las *Instruccions Tècniques per a l'aplicació de criteris de sostenibilitat*, y ya en el año 2018, se publica el documento de *Introducció de Criteris de Sostenibilitat en la Contractació*, que incluye la tecnología fotocatalítica dentro de la Guía de Contratación Pública Innovadora.

En Abril de 2019 el Consejo Rector de la Gerencia de Urbanismo, Obras e Infraestructuras del Ayuntamiento de Málaga, procedió a la aprobación de varias recomendaciones de empleo de materiales destinados a garantizar la sostenibilidad, durabilidad e innovación en obras promovidas por dicha Gerencia.

Una de estas recomendaciones fue el empleo de pavimentos de

asfalto percolado en firmes de viales, dentro de los cuales se incluyen las lechadas cementosas autopercolantes con actividad fotocatalítica.

QUALITÀ DELL'ARIA NELLE SCUOLE: UN DOVERE DI TUTTI, UN DIRITTO DEI BAMBINI	
ALLEGATI	
	
4. Migliorare la qualità dell'aria utilizzando le vernici giuste: le vernici fotocatalitiche	
31	

INDICE	
1. Principali inquinanti e allergeni indoor	3
a. Agenti biologici	8
b. Sostanze chimiche	18
c. Agenti fisici	18
2. Vivere con l'asma: alcuni consigli utili	21
a. A scuola	21
b. Fare sport	21
3. Migliorare la qualità dell'aria usando le piante	25
4. Migliorare la qualità dell'aria utilizzando le vernici giuste: le vernici fotocatalitiche	31
5. Prevenzione e gestione per l'ambiente	39

Figura 101: “La calidad del aire en la Escuela: Un deber de todos, una derecho de los niños”, reconoce el empleo de tecnología fotocatalítica como mejora de la calidad del aire. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente Italiano.



Figura 102: (Izda.) Instrucciones Técnicas para la Aplicación de Criterios de Sostenibilidad en la Contratación de Obra Pública, que incluye la aplicación de tecnología fotocatalítica en los Pliegos de Condiciones (2014) del Ayuntamiento de Barcelona. (Dcha). La nueva Guía de Contratación Pública Social, Ambiental y la Guía de Contratación Pública Innovadora (2017) del mismo Ayuntamiento.

Por último, en la Jornada de presentación de conclusiones del Proyecto LIFE PHOTOSCALING (25 de Junio de 2019. Madrid), el Ayuntamiento de Madrid, a través de D. Emilio Martínez, que fue invitado como ponente, anunció dos importantes temas que muy probablemente tendrán a futuro, una considerable relación con la aplicación de productos fotocatalíticos, al menos en la Ciudad de Madrid:

- La inclusión de la fotocatalisis como criterio objetivo ambiental puntuable en las próximas licitaciones de obras.
- La actualización del Pliego de Condiciones para Proyectos del Ayuntamiento de Madrid, incluyendo las baldosas hidráulicas fotocatalíticas (prefabricadas de hormigón) y dejando pendiente de decidir para el futuro, si también se incluirían los tratamientos superficiales a partir de microemulsiones fotocatalíticas.

8.4 GRUPO DE TRABAJO CON MINISTERIO DE FOMENTO

Dentro del Plan de Innovación para el Transporte y las Infraestructuras, 2017-2020, del Ministerio de Fomento, se incluyó la tecnología fotocatalítica. A tal fin el Ministerio de Fomento configuró un Grupo de Trabajo con el objeto final de elaborar un Manual de Aplicación de las tecnologías fotocatalíticas en infraestructuras de transporte. El Grupo de Trabajo estaba compuesto por la Dirección General de Carreteras, CEDEX, Puertos del Estado, ADIF, INECO, CIEMAT, Fundación CARTIF, Eiffage Infraestructuras, Instituto Eduardo Torroja (CSIC) y la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (AIF).

Durante el primer semestre de 2018 se mantuvieron varias reuniones técnicas de gran utilidad, puesto que el grupo de trabajo estaba compuesto por representantes de diferentes ámbitos del sector de la construcción y con amplia experiencia en fotocatalisis, pero lamentablemente los condicionantes políticos de cambio de gobierno en Junio de 2018, obligaron a suspender los trabajos.

No obstante, una buena parte de ese Grupo de Trabajo, liderado por la Asociación Ibérica de Fotocatálisis, dieron continuidad con carácter altruista a esta iniciativa, hasta convertirla en el presente documento.

9. PREGUNTAS FRECUENTES (FAQ)

9.1 ¿CÓMO INFLUYE LA FOTOCATÁLISIS EN LA RESISTENCIA MECÁNICA DE PAVIMENTOS?

Las experiencias llevadas a cabo por varios Proyectos de investigación en los últimos años han demostrado que la influencia que tienen las aplicaciones fotocatalíticas en la resistencia mecánica de los aglomerados bituminosos, las baldosas o adoquines prefabricados de hormigón, los hormigones o las piezas cerámicas es positiva. Es decir, el tratamiento fotocatalítico no sólo no tienen ningún tipo de afección sobre sus propiedades mecánicas, sino que las puede incluso llegar a mejorar sustancialmente. Tal es el caso de las lechadas fotocatalíticas con base cemento que se percolan sobre mezclas bituminosas drenantes, que le confieren al pavimento un comportamiento semi-rígido y mejor resistencia al derrame de hidrocarburos, a las deformaciones plásticas y a los fundentes en episodios de viabilidad invernal, que los pavimentos bituminosos convencionales.

Para mayor nivel de detalle se recomienda la lectura del capítulo del Proyecto LIFE MINOX STREET (Pavimentos percolados fotocatalíticos).

9.2 ¿CÓMO INFLUYE LA FOTOCATÁLISIS EN LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE PAVIMENTOS?

Este parámetro ha sido especialmente analizado en varios de los Proyectos de Investigación que se han llevado a cabo en la última década, por su posible influencia en la seguridad vial.

Concretamente en dos de ellos, Proyecto LIFE MINOX STREET y la Experiencia en el Aeropuerto de Malpensa, Milán (Italia) (ambos recogidos en este documento), los resultados sugerían una ligera reducción (menor del 6% en el caso más desfavorable, tras 60 días de paso de tráfico) de la resistencia al deslizamiento en comparación con los pavimentos existentes antes de la aplicación del tratamiento fotocatalítico. En cualquier caso, de cara a interpretar estos resultados, merece la pena comentar que dado que este tipo de tratamientos está más indicado para tramos urbanos, es decir, con velocidades limitadas entre 30 y 50 Km/h, ya que entonces el efecto

de pequeños porcentajes de reducción podrían considerarse de bajo riesgo, en cuanto a su impacto se refiere, en materia de seguridad vial.

Sin embargo, en un tercer Proyecto de Investigación, LIFE PHOTOSCALING, los resultados obtenidos, en este sentido, demuestran que los tratamientos superficiales fotocatalíticos incluso mejoran este parámetro. Así lo explicó el Ayuntamiento de Madrid, en la Jornada de Presentación de Conclusiones del Proyecto LIFE PHOTOSCALING del 25 de Junio de 2019 (Video Jornada: <https://www.life-photoscaling.eu/>), donde los resultados obtenidos, a nivel de macrotextura y resistencia al deslizamiento, mejoraban ambos parámetros, con respecto a los existentes, tras la aplicación a escala real de un tratamiento superficial a partir de microemulsiones. Es importante destacar que esta conclusión no tiene porqué ser extrapolable a todo tipo de aplicaciones en pavimentos, ya que lo que se testaba en este caso era un único material en unas determinadas condiciones.

Es más, parece claro, que este parámetro muestra unos resultados u otros, dependiendo de los condicionantes asociados (fabricante, aplicador, condiciones y características del soporte, etc.)

Para mayor nivel de detalle se recomienda adicionalmente la lectura del capítulo del Proyecto LIFE MINOX STREET 6.1.4 y la Experiencia en el Aeropuerto de Malpensa (Italia) 6.2.1.

9.3 ¿CUÁL SERÍA LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE ESTOS TRATAMIENTOS COMO ALTERNATIVA A LOS PAVIMENTOS EXISTENTES?

¿Qué impacto tendría sobre la salud de los ciudadanos, los costes hospitalarios y el PIB Nacional, una posible reducción de los niveles de contaminación en las grandes ciudades entorno a un 10% en un año? Se trata de un estudio macroeconómico que a día de hoy no se ha realizado, que se tenga constancia. Pero sin duda, no sería posible contestar concienzudamente a esta pregunta sin obtener la respuesta anterior.

Lo que sí existen son estudios toxicológicos y epidemiológicos que establecen una relación directa entre los ingresos hospitalarios y los episodios de alta contaminación (Fuente: Pope y Dockery, 2006). En esta misma línea, en el año 2014, la AIF mantuvo una reunión con un equipo de neumólogos del Hospital Ramón y Cajal, donde se pudo comprobar de primera mano la buena correlación que se producía entre los ingresos hospitalarios en relación con enfermedades respiratorias y cardiovasculares y las puntas de contaminación, medidas en la Estación de Calidad del Aire más cercana a este Hospital.

En cualquier caso, parecería lógico pensar que la respuesta a esta pregunta debería estar relacionada con la durabilidad de los tratamientos fotocatalíticos en pavimentos.

Alguno de los Proyectos de investigación llevados a cabo ya han estudiado este parámetro, tales como el Proyecto LIGHT2CAT, LIFE EQUINOX, LIFE MINOX STREET, LIFE PHOTOSCALING o las Experiencias llevadas a cabo en Roskilde y la Terminal 1 del Aeropuerto de Copenhague, y

los resultados obtenidos son muy diversos. Hay tratamientos que están demostrando actividad fotocatalítica tras varios años de aplicación. Quizá el caso más representativo es el del Proyecto Light2cat, por llevar más de 4,5 años, desde su aplicación y seguir colaborando en la descontaminación de la calle de Valencia donde se instaló.

El Proyecto LIFE PHOTOSCALING, que ha tenido en cuenta el parámetro durabilidad, ha diseñado una Herramienta de Evaluación de Pavimentos Fotocatalíticos, que redunda en una calificación de la aptitud del producto y por tanto lleva asociada su recomendación -o no- para su puesta en obra.

9.4 ¿CUÁL ES LA EFICACIA DESCONTAMINANTE DE LOS PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS?

No todos los pavimentos fotocatalíticos son iguales y por tanto, sus eficiencias son también muy diversas.

Desde el punto de vista de lo que sería la escala laboratorio, donde se emplea la Norma ISO 22197-1 (o UNE 127197-1:2013, o UNE 83321 EX:2017), como referencia, existen productos que registran niveles de descomposición de NO_x de más del 50%.

Normalmente a escala real estos porcentajes son difícilmente mantenibles a corto plazo, a día de hoy, pero los mejores productos analizados en recientes Proyectos de investigación (e incluidos en el presente documento) han demostrado eficiencias superiores al 10%, tras varios años de aplicación.

En definitiva, esta eficiencia dependerá en una parte del fabricante y/o aplicador, sin olvidar que hay otros muchos parámetros intervinientes (estado del soporte, horas de exposición a luz, condiciones geográficas y ambientales, etc.).

De nuevo, merece la pena hacer referencia al Proyecto LIFE PHOTOSCALING, que ha tenido en cuenta el parámetro de eficiencia descontaminante (NO_x), y ha diseñado una Herramienta de Evaluación de Pavimentos Fotocatalíticos, que redunda en una calificación de la aptitud del producto, y por tanto, lleva asociada su recomendación o no de su puesta en obra, en base a la puntuación final obtenida.

Por último, es recomendable destacar la importancia del mantenimiento de los pavimentos fotocatalíticos, de cara a mantener o incluso mejorar su eficiencia descontaminante. Ha quedado demostrado que la ausencia de los mismos por un periodo prolongado puede bloquear el fotocatalizador y con ello su funcionamiento.

Se recomienda, por tanto, que se realicen lavados periódicos de los pavimentos fotocatalíticos, normalmente con desengrasantes (ya han demostrado su efectividad en varios Ayuntamientos españoles), para mantener o mejorar su capacidad descontaminante.

A falta de otros datos aportados por el fabricante, se recomienda llevar a cabo operaciones de baldeo de calles con carácter quincenal, salvo que se produzcan precipitaciones atmosféricas, en cuyo caso se podrían posponer estas en la misma medida.

Para complementar esta respuesta, se recomienda la lectura del apartado 7.4 de la Guía de Uso de Materiales Fotocatalíticos-FOTOAIR, incluida en este mismo documento.

9.5 INFLUENCIA DE POSIBLES DERRAMES DE HIDROCARBUROS

Los derrames puntuales de hidrocarburos (aceites, lubricantes, combustibles, etc.) normalmente se producen en zonas de estacionamiento. Si el pavimento reservado a estas zonas fuera fotocatalítico, es posible que el derrame de estas sustancias bloquee la exposición del fotocatalizador al efecto de la luz, y por tanto, en esas zonas puntuales no funcione su capacidad descontaminante, pero en el resto de la superficie sí.

La forma de mitigar estos efectos no deseados, sería mediante operaciones de limpieza de calles (baldeos), y el empleo de desengrasantes, que permitan renovar la exposición del fotocatalizador al efecto de la luz.

9.6 POTENCIAL AUTOLIMPIANTE DE PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS

El concepto de autolimpieza está más asociado a las envolventes de edificación (paramentos verticales), pues esta capacidad fotocatalítica lo que evita es que se les adhieran elementos orgánicos a su superficie.

El concepto de autolimpieza debe entenderse como un mantenimiento más prolongado de la cualidad estética de la envolvente (color, brillo, etc.) frente a la pérdida de esta por acumulación de suciedad. Esta capacidad no es ni una protección anti-grafiti, ni permite la eliminación de compuestos o materiales químicamente muy estables, pues de ser así, no son susceptibles de ser oxidados por las reacciones fotoquímicas que favorece la fotocatalisis. Un ejemplo de estos materiales serían las partículas de arena que pudieran quedar incrustadas en los poros de una envolvente fotocatalítica.

En el caso de los pavimentos, dado que se trata de superficies horizontales, cualquier material particulado que exista en el ambiente, con independencia de su origen, tenderá a depositarse sobre el pavimento por gravedad. De hecho si la densidad de este material particulado fuese excesivo podría acabar bloqueando el fotocatalizador, siendo necesarias las operaciones de limpieza de calles, para desbloquearlo, dentro de las actividades de conservación que los Ayuntamientos tienen encomendadas.

9.7 DURACIÓN DE LA ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA

En las respuestas a las preguntas 9.3 y 9.4 queda contestada esta cuestión.

9.8 CONDICIONES DE MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS

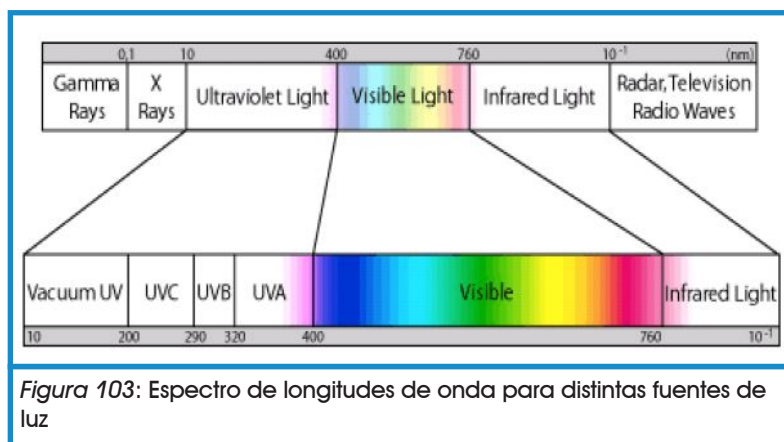
En la respuesta a la pregunta 9.4 queda contestada esta cuestión.

9.9 ¿EN QUÉ RANGO DE LONGITUDES DE ONDA SE OBTIENEN LAS MEJORES EFICIENCIAS?

Las ondas electromagnéticas pueden tener diferentes longitudes de onda. El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético, y el conjunto de las longitudes de onda emitidas por el sol se denomina espectro solar.

La proporción de la radiación solar en las distintas regiones del espectro es aproximadamente:

- Ultravioleta: 7%
- Luz visible: 43%
- Infrarrojo: 49%
- El resto: 1%



Normalmente los pavimentos fotocatalíticos se diseñan para que se activen por efecto de la luz ultravioleta (UVA), es decir, con espectros comprendidos entre los 320 y los 400 nanómetros. Si bien, en la última década se están estudiando formulaciones que permitan la activación del fotocatalizador también bajo luz visible (tal fue el caso del pavimento colocado bajo el Proyecto Light2cat, que ha mostrado unos resultados muy prometedores). Esto se puede conseguir modificando la química del fotocatalizador (dopándolo) o modificando la fuente de luz (cambio a LEDs).

Por otra parte, en base a las lecciones aprendidas de los Proyectos de investigación recientemente realizados e incluidos en este documento, niveles de irradiancia superiores a 8W/m^2 permiten la activación de los fotocatalizadores habituales.

Por último, merece la pena destacar que el espectro de luz no es un parámetro único en la reacción química que activa el fotocatalizador; pues también hay otros tales como el pH del soporte sobre el que se aplica el pavimento, la celeridad en que se produce la reacción de reducción con el oxígeno, la humedad relativa, el régimen de vientos, la temperatura y la zona geográfica en general. No se puede olvidar que la calidad del producto fotocatalítico desde el origen, pasando por la fabricación y aplicación es fundamental.

9.10 ¿SE PODRÍAN EMPLEAR REVESTIMIENTOS FOTOCATALÍTICOS EN TÚNELES?

Siguiendo con la reflexión de la pregunta anterior, en los túneles no se dispone de luz ultravioleta. Por lo tanto, las opciones son dos: actuar sobre el fotocatalizador dopándolo o actuar sobre la fuente de luz y cambiarla a luminarias de tipo LEDs (La tecnología LED UV funciona en el rango espectral entre 365 nm y 405 nm).

En el Proyecto @ECO-SEE, por citar un ejemplo, se han desarrollado recubrimientos para interiores activados bajo luz visible, que ya se están empleando en oficinas, según se explica en el Booklet de Conclusiones del proyecto en 2017.

9.11 INFLUENCIA DE CONDICIONES METEOROLÓGICAS, HUMEDAD, VIENTO, LUZ, ETC

Para responder esta pregunta se recomienda la lectura del apartado de Criterios de diseño y aplicación de materiales fotocatalíticos, incluido en el presente documento.

9.12 INFLUENCIA DEL COLOR EN LA EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA

Aunque esta pregunta quedaría respondida en el apartado Criterios de diseño y aplicación de materiales fotocatalíticos, incluido en el presente documento, merece la pena mencionar que lo habitual es trabajar con materiales fotocatalíticos de colores claros, con objeto de aumentar el

efecto Albedo (las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras; un albedo alto enfría el entorno porque la radiación de luz absorbida que calienta el elemento es mínima, mientras que un albedo bajo calienta el elemento, porque la mayor parte de luz es absorbida por el mismo) y, por tanto, colaborar en la reducción del calentamiento de las ciudades.

9.13 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA DE MEDIDA AL FOCO CONTAMINANTE

Distintos estudios de investigación realizados recientemente en España (e incluidos en este documento) han demostrado que la eficiencia descontaminante de los materiales fotocatalíticos depende de muchos factores, pero uno de ellos es la altura a la que se mida dicha eficiencia. Por citar un ejemplo reciente, en la Jornada de Presentación de Conclusiones del Proyecto LIFE PHOTOSCALING del 25 de Junio de 2019 (Video Jornada: <https://www.life-photoscaling.eu/>), se describió el Estudio realizado *in situ* en la C/ José Antonio Armona, mediante captadores pasivos.

A tal fin se instalaron en báculos de alumbrado una red de 75 unidades de captadores pasivos de NO₂ a una altura de 3 metros respecto del nivel del suelo, en dos calles (la tratada con tecnología fotocatalítica y la no tratada).

Las conclusiones finales fueron las siguientes:

- Se observan reducciones medias del orden del 7%, con respecto a la calle no tratada
- Se observan cambios en la eficiencia descontaminante, dependiendo de la altura de colocación de los captadores. Más eficiencia cerca del foco (nivel suelo).

Por tanto, los mejores resultados de capacidad descontaminante se obtuvieron con sensores colocados a 2 cm del pavimento fotocatalítico. Aquellos sensores que se colocaron a 3 metros del pavimento también han registrado el efecto descontaminante, pero en menor medida que cerca del foco de contaminación.

Finalmente, merece la pena comentar que estas conclusiones no tienen por qué ser extrapolables a todo tipo de aplicaciones en pavimentos, ya que lo que se testaba en este caso era un único material en unas determinadas condiciones.

9.14 GENERACIÓN DE EFECTOS ADVERSOS A LA SALUD HUMANA

Como se ha indicado en repetidas ocasiones, el TiO₂ es el fotocatalizador más ampliamente utilizado. El titanio es el noveno elemento más abundante en la Tierra (constituye el 0,63% de

la corteza terrestre), y existen abundantes yacimientos de minerales que lo contienen. Por este motivo, el dióxido de titanio es un material de bajo coste, que se utiliza fundamentalmente, además de sus aplicaciones catalíticas y fotocatalíticas, como pigmento blanco en pinturas, plásticos y papel. Su baja toxicidad lo hace también apto para su uso en productos de consumo humano, por lo que se emplea como excipiente en medicamentos, como componente de cremas solares de alto factor de protección y de pastas dentífricas, e incluso como colorante alimentario (el colorante E-171 aprobado por la EFSA). Desde el punto de vista ecológico, sus efectos ambientales negativos son sólo apreciables en el caso de vertidos masivos.

Aunque este óxido no sea una sustancia tóxica, existen discrepancias acerca de su posible efecto en formato nanoparticulado (ver apartado de implicaciones en REACH). Esto, unido a la evidente pérdida de actividad del producto asociada al desprendimiento del fotocatalizador, hace que un aspecto de gran relevancia en el desarrollo de un producto fotocatalítico sea maximizar su adherencia a las superficies sobre las que se vaya a aplicar.

Recientes investigaciones sobre el comportamiento de los pavimentos fotocatalíticos en España (se hace referencia a los pavimentos, porque son los que están sometidos a la abrasión de cargas de tráfico, y por tanto son las condiciones más desfavorables para evaluar un material fotocatalítico), apuntan a que la capacidad de liberación de nanopartículas de titanio a la atmósfera no suponen una amenaza a para la salud humana. Concretamente en la Jornada de Presentación de Conclusiones del Proyecto LIFE PHOTOSCALING del 25 de Junio de 2019 (Video Jornada: <https://www.life-photoscaling.eu/>), en relación a los efectos adversos para la salud pública por liberación de aerosoles y nanopartículas, se midieron la concentración de estas últimas en ambiente, no detectándose variación estadísticamente significativa en la concentración numérica o la distribución del tamaño de partículas finas suspendidas en la calle con pavimento fotocatalítico en comparación con las calles vecinas (sin tratar). Se tomaron muestras de aire para análisis de partículas y sólo ocasionalmente las partículas capturadas contenían Ti (con tamaños inferiores a 20 μm), pero siempre estaban en el rango de tamaño de micrómetros (el umbral de alerta estaría por los 360 μm). Esto llevó a la conclusión de que para este producto las nanopartículas no se liberaron en una cantidad significativa al aire, con lo cual no se generaron efectos adversos a la salud.

En cualquier caso, es recomendable que estos aspectos sean evaluados con anterioridad a su puesta en obra, con objeto de verificarlos, pues los resultados podrían ser distintos, dependiendo del tipo de material fotocatalítico que se tratara y las condiciones de aplicación, y muy especialmente, si su uso fuera sobre pavimentos.

9.15 AFECCIONES DE LOS LIXIVIADOS A LAS ESTACIONES EDAR

La referencia más reciente que se posee a este respecto es la Jornada de Presentación de Conclusiones del Proyecto LIFE PHOTOSCALING del 25 de Junio de 2019 (Video Jornada: <https://www.life-photoscaling.eu/>), donde se realizaron controles de lixiviado, tras la aplicación de un pavimento fotocatalítico en una calle de Madrid.

Los controles de niveles de lixiviado se realizaron mediante sonda multiparamétrica. Las concentraciones que se obtuvieron de partículas de titanio en agua fueron de 0,015 ppm. Y las concentraciones de nitratos en agua fueron menores de 50 ppm. En ambos casos, las concentraciones tienen la consideración de bajas, a día de hoy, pero lo cierto es que los umbrales de aceptación no están definidos en la actualidad.

Merece la pena destacar que estas conclusiones no tienen por qué ser extrapolables a todo tipo de aplicaciones fotocatalíticas, ya que lo que se testaba en este caso era un único material en unas determinadas condiciones.

Para más información se recomienda la lectura del apartado 7.3.1 de Limpieza de pavimentos, dentro de los Criterios de Diseño y Aplicación de Materiales Fotocatalíticos.

9.16 DIFERENCIAS DE RESULTADOS ENTRE LABORATORIOS

Desde que en el año 2012 se identificara este problema, donde los resultados de eficiencia descontaminante de un material fotocatalítico podrían variar dependiendo del laboratorio que los realizara, la Asociación Ibérica de Fotocatálisis ha llevado a cabo una serie de acciones encaminadas a mitigarlo.

La primera acción fue la realización de una batería de ensayos interlaboratorios (dentro de AIF hay 3 laboratorios que realizan el ensayo ISO 22197-1 o el UNE 127197-1:2013) sobre mismas familias de muestras, pero de distintos fabricantes, que se repartieron entre los tres laboratorios, y siempre con un “blanco” (muestras sin tratamiento fotocatalítico) en cada familia. Los resultados obtenidos fueron bastante homogéneos por parte de los 3 laboratorios, en algunos materiales, pero no tanto en otros. Tras esta primera acción, se pudieron identificar algunas diferencias entre los 3 laboratorios, pero no se encontró ningún patrón que indujera a pensar dónde podían estar generándose las diferencias. Este estudio tuvo secuelas, pues hubo intercambios de las mismas muestras ensayadas por parte de los tres laboratorios. De este estudio se sacaron algunas conclusiones, entre las que estaba la posible heterogeneidad fotocatalítica en algunas de las muestras ensayadas.

Entre los años 2014 y 2015 se llevó a cabo un nuevo estudio interlaboratorios, por parte de AIF. En esta ocasión se pidió a un único fabricante que elaborara 15 muestras patrones iguales (tres de ellas serían “blancos” sin tratar), que se codificarían y repartirían entre los 3 laboratorios.

Antes de llevar a cabo los ensayos se estableció un protocolo de trabajo que consistió básicamente en los siguientes puntos:

- 1.** Influencia de lámpara y radiómetros. Se realizaron pruebas conjuntas de irradiancia (lámpara-radiómetro) en uno de los laboratorios miembros de AIF, así como un ensayo supervisado, por los tres laboratorios.

- 2.** Selección de lámpara para ensayo. Finalmente se identificó una fuente de luz tipo común, de acuerdo con la norma UNE 127197-1:2013.
- 3.** Muestra patrón. Crear muestra patrón de ensayo (forma común de aplicación y dotaciones) aplicada sobre soporte liso común, con objeto de crear 15 muestras iguales y repartirlas entre los laboratorios AIF
- 4.** Protocolo ensayo. Se siguió la metodología Round-Robin de actividad fotocatalítica según la norma UNE 127197-1:2013, pero creando una plantilla de cálculo común para uso de los laboratorios AIF.
- 5.** Concentraciones de entrada de NO. Con objeto de reducir posibles dispersiones de ensayo entre laboratorios AIF se acordó acotar las concentraciones de entrada de NO, siempre en cumplimiento de la Norma UNE 127197-1:2013.

Este estudio permitió acotar considerablemente los parámetros fundamentales que pudieran tener influencia en el resultado final.

Desde el año 2016, los laboratorios miembros de AIF se reúnen con la periodicidad que se estableciera en Asambleas Generales para calibrar medidas de radiómetros.

En la actualidad los 3 laboratorios miembros de AIF están interconectados y trabajan de manera coordinada. Cualquier problema que pudiera surgir con alguna muestra es analizado, a modo de contraste, por al menos otro laboratorio.

9.17 ¿EN QUÉ MATERIA SE TRANSFORMAN LOS NO_x, SO_x Y COV, TRAS LA FOTOCATÁLISIS Y CÓMO SE EVACUAN/LIMPIAN?

El objetivo de la fotocatalisis es mineralizar los contaminantes, es decir, transformarlos en compuestos totalmente oxidados, que en el caso que nos ocupa son inocuos y de fácil eliminación. En el caso de los COV, la mineralización total da lugar a CO₂ y agua fundamentalmente. La segunda sustancia no precisa ningún comentario, mientras que el CO₂, por su estado gaseoso en condiciones atmosféricas, se libera inmediatamente a la atmósfera. Hay que decir en este sentido que, efectivamente, el CO₂ es un gas de efecto invernadero y que sus emisiones antropogénicas representan uno de los factores clave en la lucha contra el cambio climático. Podrían plantearse por tanto dudas razonables acerca de la benignidad medioambiental de este proceso. Sin embargo, puede considerarse que el efecto pernicioso de la formación de CO₂ y su liberación a la atmósfera, en este caso, es insignificante con respecto al efecto positivo, tanto para el medio ambiente como para la salud, de eliminar los COV. Por lo que respecta a contaminantes inorgánicos como NO_x y SO_x, los productos finales de oxidación serán nitratos y sulfatos que, por su solubilidad en agua, se eliminarán fácilmente por la lluvia o mediante limpieza, según la aplicación.

9.18 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS

Para responder esta pregunta se recomienda la lectura del apartado 7 de Criterios de Diseño y Aplicación de Materiales Fotocatalíticos, así como consultar a los profesionales del sector.

9.19 ¿SE GENERA O_3 O PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN CON LA FOTOCATÁLISIS?

El fotocatalizador más habitual, TiO_2 , no es termodinámicamente capaz de generar ozono (O_3) a partir del oxígeno (O_2) o del agua (H_2O). Por tanto, este gas no se produce en los procesos fotocatalíticos, ni es un intermedio habitual de las reacciones involucradas en estos procesos.

Aunque una pequeña parte de los productos de degradación de contaminantes sean sólidos, en general, se puede decir que la generación de materia particulada susceptible de afectar negativamente al ser humano es poco probable. Sí puede darse, en el caso de la aplicación de la fotocatalisis en superficies (pavimentos, fachadas...) el desprendimiento de partículas de TiO_2 (ver respuesta a la pregunta Efectos Adversos a la Salud Humana. Apartado 9.14).

9.20 ¿CUÁNTO CUESTAN LOS MATERIALES FOTOCATALÍTICOS?

La respuesta a esta pregunta dependerá de los condicionantes del mercado del momento y de la cuantía de material a aplicar o colocar, como es lógico.

A modo orientativo, se puede decir que un material fotocatalítico sería del orden de un **20%** más caro que su homólogo convencional.



9.21 ¿DÓNDE SE PUEDEN COMPRAR ESTOS PRODUCTOS?

Aunque desde hace años ya se pueden encontrar algunos materiales fotocatalíticos en almacenes de suministro habituales de grandes superficies, es relativamente complicado encontrarlos, pues nunca aparecen por el apelativo “fotocatalítico”. Esto es debido a que sigue siendo un término desconocido para el usuario final y por tanto un hándicap para las campañas de marketing de las empresas. Es más habitual verlos como “ecológicos”, “sostenibles”, “autolimpiantes” o purificadores de aire”.

En cualquier caso, tanto para pedir asesoramiento, como para solicitar ensayos de control de eficiencia, pedir presupuestos, o para localizar materiales fotocatalíticos, se recomienda que se consulte la siguiente web, www.fotocatalisis.org, donde están reunidos todos los fabricantes, laboratorios, ingenierías, arquitectos, centros tecnológicos y universidades de la asociación.

10. SEGURIDAD Y SALUD

10.1 FICHAS DE SEGURIDAD DE CADA PRODUCTO

Todos los materiales fotocatalíticos deben tener asociada una Hoja de Seguridad (También HDS), que será el documento que describa los riesgos de un material y suministre información sobre cómo se puede manipular, usar y almacenar el material con seguridad.

Dicha hoja debe hacer referencia a los parámetros establecidos en la Normas vigentes tanto nacionales como internacionales, en su caso.

10.2 SEGURIDAD Y SALUD DURANTE LA FABRICACIÓN Y LA APLICACIÓN

El uso de nanopartículas en la producción de materiales con propiedades fotocatalíticas puede provocar una pequeña liberación de las mismas al medio ambiente. Esta se produciría durante la fabricación del catalizador nanoparticulado y es en su aplicación mediante mezclado en seco, en emulsión, lechada, mortero, 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.

Se puede decir que un proceso libera nanopartículas si la concentración de éstas aumenta en relación al mismo proceso sin la presencia de nanopartículas (Brouwer y col. 2009). En caso de que esto ocurra, se pueden tomar medidas para mitigarlo. Por ejemplo, un estudio reciente (Dylla y col. 2012) demuestra que el uso de agua durante la manipulación de un material que contiene nanopartículas reduce la exposición a éstas, debido a la coalescencia en partículas de mayor tamaño.

Los recubrimientos fotocatalíticos limitan en gran medida la liberación de nanopartículas, puesto que éstas están inmovilizadas en un soporte. Tests de envejecimiento demuestran que los recubrimientos de mayor espesor sufren un mayor deterioro por pérdida de adhesión, lo que

ocasiona liberación del principio activo y por tanto disminución en la actividad. Esta liberación es menor con el tiempo de uso, según se ha observado en pinturas fotocatalíticas (Olabarrieta y col. 2012).

La seguridad de los composite y los materiales con base cemento en los que el fotocatalizador se ha añadido másicamente, y no en forma de recubrimiento, en general, es mayor puesto que el fotocatalizador está más fuertemente unido al soporte y tolera mejor las condiciones ambientales (Chen y col. 2011).

10.3 IMPLICACIONES EN REACH

La agenda europea ECHA (European Chemicals Agency) tiene registrado al dióxido de titanio como un compuesto inorgánico que, con el actual estado del conocimiento y por lo que a un uso seguro bajo REACH respecta, ha de usarse evitando emitir polvo que pueda inhalarse, implementando medidas de extracción y ventilación si fuera preciso. Además, ha de almacenarse en envases cerrados, evitando la humedad y manejándolo con atuendo de protección (guantes, gafas, mascarilla y ropa de seguridad).

La información toxicológica conocida indica que no muestra riesgos identificados por inhalación, contacto con piel y ojos o por ingestión.

Para el medioambiente no se han registrado riesgos de corto ni largo plazo para organismos acuáticos, terrestres y para la calidad del aire, para organismos terrestres. En todo caso, ha de evitarse que sea liberado en el sistema hidrológico.

Para su transporte no tiene regulaciones especiales.

11. CONCLUSIONES Y RETOS

La tecnología fotocatalítica aplicada al sector de la construcción lleva más de 40 años al servicio del ciudadano en el país pionero en su desarrollo, Japón.

En Europa, por su parte, se han llevado a cabo decenas de proyectos de investigación en las últimas dos décadas, con el objetivo de aumentar el conocimiento en su comportamiento a futuro, así como desarrollar distintos mecanismos que valoren su eficiencia.

Fruto de estas investigaciones ya hay varias Administraciones Públicas Españolas que han mostrado su interés en las tecnologías fotocatalíticas, incluyéndolas dentro de los Pliegos de Condiciones de Proyectos y Obras, así como de estimular su inclusión dentro de los criterios de sostenibilidad ambiental puntuables en las licitaciones públicas. Tal es el caso de los Ayuntamientos de Madrid, Barcelona y Málaga.

Por otra parte, cada vez más las Ingenierías, los Estudios de Arquitectura y los Departamentos de Responsabilidad Social Corporativa de las grandes compañías multinacionales que demandan materiales que incorporan un alto valor añadido, como los fotocatalíticos, para su aplicación en sus diseños e instalaciones.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las experiencias nacionales e internacionales y las crecientes demandas del mercado, parece claro que la fotocatalisis en construcción podría ser considerada como una medida complementaria para la mejora de la vida de los ciudadanos, por sus múltiples capacidades: descontaminantes, autolimpiantes, anti-moho, anti-algas, bactericidas, virucidas y desodorizantes.

Aunque no todo vale para todo. A través de este documento se ha puesto de manifiesto la importancia de tener en cuenta los criterios de diseño y aplicación, y de establecer los mecanismos de control necesarios para evaluar o predecir el comportamiento de estos materiales. A tal fin, y ante la ausencia de normativa que lo regule, se han elaborado en este documento, propuestas de protocolos para la compra de materiales fotocatalíticos, se han creado Certificados de Eficiencia de Producto y se han desarrollado herramientas de ayuda a selección de materiales fotocatalíticos, con la triple intención de minimizar el fraude de compañías que incluyen materiales fotocatalíticos en su catálogo, cuando en realidad no lo son, dar más información al Cliente Final de lo que está comprando, y de estimar sus capacidades, antes de iniciar el proceso de compra.

Merece la pena destacar la gran mejora que han experimentado los materiales fotocatalíticos en los últimos años y lo prometedores que son sus resultados, aunque no siempre se hayan obtenido las mejoras deseadas. Está en la mano de todos los agentes involucrados la capacidad de sacar el máximo partido de estos nuevos materiales, en beneficio de toda la sociedad.

En cualquier caso, es necesario que los fabricantes sigan trabajando sobre la eficiencia y durabilidad de estos productos (tanto en exterior, como en interior), que la Comunidad Científica siga avanzando en el desarrollo de tecnologías de medición y análisis más precisas y que las Administraciones Públicas estimulen su uso y conocimiento de manera determinante.

En ausencia de normativa al respecto, la Asociación Ibérica de Fotocatálisis, propone la adopción de este Libro como referencia, para que sirva de base a técnicos y prescriptores frente a los retos que demandan las distintas fases de toda infraestructura: Proyecto, Obra y Conservación y Mantenimiento. Qué duda cabe, que el margen de mejora de este documento es amplio, desde muchos puntos de vista, por lo que debe ser entendido, como una primera versión 0.

Las personas y entidades interesadas en contribuir al conocimiento sobre tecnologías fotocatalíticas y sus aplicaciones pueden contactar a través del correo contacto@fotocatalisis.org

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamson, I.Y.R., Frieditis, H., Hedgecock, C., Vincent, R. (2000). Zinc Is the Toxic Factor in the Lung Response to an Atmospheric Particulate Sample. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 166, 111–119.
- Adamson, I.Y.R., Frieditis, H., Vincent, R. (1999). Pulmonary Toxicity of an Atmospheric Particulate Sample Is Due to the Soluble Fraction. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 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, 1067-1072.
- AEMA (2020): Agencia Europea de Medio Ambiente, www.eea.europa.eu/es.
- AIDICO (2012) Instituto de la Construcción, www.aidico.es.
- AIF (2020): Asociación Ibérica de Fotocatálisis, www.fotocatalisis.org.
- Almazán, D., Rovito, G. (2012). Evaluación del Comportamiento de los Pavimentos Descontaminantes. *Jornadas Nacionales de ASEFMA* en Madrid.
- Almazán, D., Rovito, G. (2012). Evaluación del comportamiento de los pavimentos descontaminantes. *VII Jornada Nacional ASEFMA 2012. Comunicación 27*.
- Baena, J.M., Lesueur, D., Rousseau, P. (2009). Carreteras descontaminantes: El firme NOXER de Madrid (*IV Jornadas Nacionales de ASEFMA*).
- Ballari, M.M., Hunger, M., Hüsken, G., Brouwers, H.J.H. (2010). Modelling and experimental study of the NOx photocatalytic degradation employing concrete pavement with titanium dioxide. *Catal. Today* 151, 71–76.
- Blesa, M.A.; Sánchez B. (Eds.) (2004). *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea*, CIEMAT, Madrid.
- 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.*

- 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). Photoinduced reactivity of titanium dioxide. *Progr. Solid State Chem.* 32, 33-177.
- CARTIF (2012). www.cartif.com.
- 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.
- Castellote Armero, M. (2015). Construcciones sanas para un entorno mejor: Calidad del aire interior y fotocátalisis en construcción. 2015. *Libro de Ponencias. Seminario 11*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. IETcc. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- 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. *Build. Environ.* 46, 1827-1833.
- Chen, J., Poon, C. (2009). Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. *Build. Environ.* 44, 1899-1906.
- Chen, J., Poon, C.S. (2009). Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Build. Environ.* 44, 1899-1906.
- Comunidad de Madrid (2016). Evaluación de las emisiones difusas mediante la utilización de captadores pasivos. *Instrucción técnica nº ATM-E-ED-07*. <http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadertype=1=Content-Disposition&blobheadervalue1=filename%3DATM-E-ED-07+IT+Evaluaci%C3%B3n+emisiones+difusas+mediante+captadores+pasivos+2016-09.pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1352943205777&ssbinary=true>
- Cristal Global (2012). www.cristalblogal.com.
- Dalton, J.S., Janes, P.A., Jones, N.G., Nicholson, J.A., Hallam, K.R., Allen, G.C. (2002). Photocatalytic oxidation of NO_x gases using TiO₂: a surface spectroscopic approach. *Environ. Pollut.* 120, 415-422.
- Delgado, G.C. (2010). Economics and governance of nanomaterials: potential and risks. *Technol. Soc.* 32, 137-144.
- DGT (2012). Dirección General de Tráfico. www.dgt.es.
- Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo. Calidad del aire

- 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.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. Risk Perception and risk communication with regard to nanomaterials in the workplace. European Risk Observatory.
- EC (2011). Commission Recommendation 2011. *Official Journal of the European Union*, 20.10.2011. 2011/696/EU, 18 October 2011. https://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/faq/definition_en.htm
- ECHA: European Chemicals Agency. <https://chemicalsinourlife.echa.europa.eu/>
- EU Science Hub, <https://ec.europa.eu/jrc/en/research-topic/nanotechnology>
- Farré, M., Sanchís, J., Barceló, D. (2011). Analysis and assessment of the occurrence, the fate and the behavior of nanomaterials in the environment. *Trends Anal. Chem.* 30, 517-527.
- Fresno, F., Villar-García, I.J., Collado, L., Alfonso-González, E., Reñones, P., Barawi, M., de la Peña O'Shea, V.A. (2018). Mechanistic View of the Main Current Issues in Photocatalytic CO₂ Reduction. *J. Phys. Chem. Lett.* 9, 7192, 7204.
- Ghio, A.J., Devlin, R.B. (2001) Inflammatory Lung Injury after Bronchial Instillation of Air Pollution Particles. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 164. 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. *J. Aerosol Sci.* 35, S1001-S1002.
- Guo, S., Wu, Z., Zhao, W. (2009). TiO₂-based building materials: above and beyond traditional applications. *Chin. Sci. Bull.* 54(7), 1137–1142.
- Hassan, M. M., Dylla, H., Mohammad, L. N., Rupnow, T. (2010). Evaluation of the durability of titanium dioxide photocatalyst coating for concrete pavement. *Constr. Build. Mater.* 24, 1456-1461. Doi: [10.1016/j.conbuildmat.2010.01.009](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.009).
- Hoerr R.A., Gupta A., Matuszewski M.J. (2009) Developing Practices for Safe Handling of Nanoparticles and Nanomaterials in a Development-Stage Enterprise: A Practical Guide for Research and Development Organizations. In: Webster T. (ed.) Safety of Nanoparticles. *Nanostructure Science and Technology*. Springer, New York, NY, pp 1-18.

- 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.
- 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.
- INE (2016) https://www.ine.es/prensa/essa_2016.pdf
- ISO (2012). International Organization for Standardization,. <http://www.iso.org/iso/home.html>.
- 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.
- 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).
- Jiménez-Relinque, E., Rubiano, F., Hingorani, R., Grande, M., Castillo, A., Nevshupa, R., Castellote, M. (2020). A New Holistic Conceptual Framework for Assessment of Photocatalytic Pavements Performance. *Front. Chem.*, en prensa, doi: [10.3389/fchem.2020.00743](https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00743).
- Lawryk, N.J., Wiesel, C.P. (1996). Concentrations of Volatile Organic Compounds in the Passenger Compartments of Automobiles. *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. In: Bittnar, Z., Bartos, P. J. M., Němeček, J., Šmilauer, V., Zeman, J. (eds.) *Nanotechnology in Construction 3*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 1–14.
- Ley 34/2007 Calidad del aire
- Maury, M.A., De Belie, N. (2010). State of the art of TiO₂ 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. *Atmos. Environ.* 38, 4383–4402.
- Mills, A.; Hill, C.; Robertson, P.K.J. (2012) Overview of the current ISO tests for photocatalytic materials. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 237, 7-23.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Magrama. <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/default.aspx>

- Nanocare (2012) <http://www.nanocare-ag.com/>
- Obee, .T.N., Brown, R.T. (1995). TiO₂ Photocatalysis for Indoor Air Applications: Effects of Humidity and Trace Contaminant Levels on the Oxidation Rates of Formaldehyde, Toluene, and 1,3-Butadiene. *Environ. Sci. Technol.* 29, 1223.
- Ohtani, B. (2011). Photocatalysis by inorganic solid materials: revisiting its definition, concepts, and experimental procedures. *Adv. Inorg. Chem.*, 63, 395.
- 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 TiO₂ 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*, 2nd edition. Studies and research projects, report R-58.
- Pichat, P. (2012) Solar energy conversion and photoenergy systems. *Vol I- Solar Irradiation and TiO₂ 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 ECO-SEE. <https://cordis.europa.eu/project/id/609234/es>
- Proyecto LIFE EQUINOX. <https://life-equinox.eu/>
- Proyecto LIGHT2CAT. <https://cordis.europa.eu/project/rcn/102057/factsheet/en>; <https://www.facebook.com/Light2cat>
- Proyecto LIFE MINOX STREET <http://www.lifeminoxstreet.com/life/inicio/>, <https://life-equinox.eu/documentos/>, <http://www.lifeminoxstreet.com/life/documents/>
- Proyecto LIFE PHOTOCITYTEX. <http://photocitytex.eu/>
- Proyecto LIFE Photopaq. http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE08_ENV_F_000487_LAYMAN.pdf
- Proyecto LIFE+ PHOTOSCALING. <https://www.life-photoscaling.eu/>
- Proyecto PICADA (2012). www.picada-project.com.
- Querol, X., Alatuéy, 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 relativo a la mejora de la calidad del aire.

- Reijnders, (2009). The release of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles from nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability* 94, 873-876.
- Rey Martínez, F. J., Ceña Callejo, R. (2006). *Edificios saludables para trabajadores sanos: calidad de ambientes interiores*. Junta de Castilla y León, Consejería de Economía y Empleo. <https://www.fessegovia.es/wp-content/uploads/2018/09/Edificios-saludables.pdf>
- Richardson, J. T. (1989). *Principles of Catalysts Development*, Ed. Plenum Press.
- Sakai, N., Fujishima, A., Watanabe, T., Hashimoto, K. (2003). Quantitative Evaluation of the Photoinduced Hydrophilic Conversion Properties of TiO₂ Thin Film Surfaces by the Reciprocal of Contact Angle. *J. Phys. Chem. B* 107, 1028-1035.
- 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. *Constr. Build. Mater.* 35, 874-883.
- Som, C., Wick, P., Krug, H., Nowack, B. (2011). Environmental and health effects of nanomaterials in nanotextiles and façade coatings. *Environ. Int.* 37, 1131-1142.
- Sun, R., Nakajima, A., Fujishima, A. A., Watanabe, T., Hashimoto, K. (2001). Photoinduced Surface Wettability Conversion of ZnO and TiO₂ Thin Films. *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) (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. *Toxicol. Sci.* 89, 42-50.
- U.S. EPA (1998). Principles of Environmental Impact Assessment Review: Appendix D: Contents of Specific Environmental Impact Assessment Tools. <https://elaw.org/es/system/files/10%20APPENDIX%20D.pdf>
- 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
- Weir, A., Westerhoff, P., Fabricius, L., Hristovski, K., von Goetz, N. (2012). Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products. *Environ. Sci. Technol.* 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, 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, R., Bai, Y., Zhang, B., Chen, L., Yan, B. (2012). The potential health risks of titania nanoparticles. *J. Hazard. Mater.* 211-212, 404-413.

APÉNDICE

LA FOTOCATÁLISIS FRENTE A HONGOS, BACTERIAS Y VIRUS

A la luz de la actual pandemia COVID-19, la pregunta de cómo limitar los brotes del virus en el futuro parece ser más relevante que nunca. La fotocatálisis con dióxido de titanio (TiO_2 , en adelante) tiene el potencial de descomponer las moléculas orgánicas, que normalmente se ha venido utilizando para propósitos de autolimpieza y purificación del aire y del agua. De hecho, el TiO_2 también exhibe propiedades desinfectantes y muestra buenos resultados en la degradación de bacterias, hongos y también virus (1). Watts et al. muestran que una desactivación efectiva del poliovirus con una suspensión de dióxido de titanio se logra después de 30 minutos de radiación de luz solar (2). Otros estudios han demostrado la degradación del Norovirus (3) y los virus de la gripe (4), entre otros.

La mayoría de los estudios sobre la degradación de virus se han efectuado en el contexto de tratamiento de depuración de aguas (5). Las investigaciones acerca de la posibilidad de auto desinfección de superficies con TiO_2 para desactivar bacterias y virus son por regla general escasas, pero la investigación publicada muestra resultados prometedores. Zan et al. estudiaron la degradación del virus de la hepatitis B con placas de cerámica con revestimientos de TiO_2 . Encontraron que después de un periodo de 4 horas, alrededor del 90% de ellas se destruyeron con una intensidad baja de luz UV e incluso con la luz diurna de una habitación (6). Nakano et al, mostraron que una película de TiO_2 sobre cristal era eficaz en la eliminación del virus de la gripe (7). Placas de hormigón cargadas con TiO_2 modificado presentan propiedades antibacterianas bajo irradiación con luz visible, según se ha publicado también en la literatura científica (8).

Mientras que la fotocatálisis es una técnica de desinfección de baja energía que no produce subproductos problemáticos, el principal problema de la desinfección mediante fotocatálisis es la degradación relativamente lenta. Estudios recientes se han centrado en superar este inconveniente mediante el uso de TiO_2 dopado con iones metálicos. El TiO_2 dopado con plata (Ag) demuestra tener una degradación más efectiva sobre bacterias y virus en agua (9). Existen diferentes explicaciones sobre el aumento de la eficacia del TiO_2 dopado con plata, incluyendo la mayor producción del radical OH, lo que generaría el aumento de adsorción del virus, y la degradación microbiana con iones de plata Ag^+ lixiviados del catalizador.

Además, el dopaje metálico es un método eficaz para extender la respuesta espectral del TiO_2 hacia la luz visible, y poder utilizar una mayor parte del espectro solar (10). Zheng et al. mostraron que las nano fibras Cu- TiO_2 exhibían una alta eficacia de eliminación tanto del virus bacteriófago f2 como de la bacteria E.coli 285 bajo luz visible en agua (11). Además, el TiO_2 dopado con determinados materiales con actividad desinfectante tiene la ventaja de permitir la actividad en la oscuridad, lo que le hace ser muy útil para interiores, donde las condiciones de luz son desfavorables. Los equipos de hospital autoesterilizantes son una perspectiva interesante de esta tecnología. Los estudios han mostrado resultados prometedores en términos de inhibición para

el crecimiento de bacterias al revestir los equipos con TiO_2 dopado con plata, como catéteres, (12), lancetas (13) y mascarillas quirúrgicas (14) por mencionar algunos.

Las enfermedades virales transmitidas por el aire comportan la necesidad de desinfección del aire interior. Kim et al. presentaron un purificador fotocatalítico de flujo para aire interior utilizando un catalizador de paladio depositado en TiO_2 , que mostró una inactivación eficiente de los virus MS2 en el aire (15), mientras que Daikadu demostró una degradación eficiente de los aerosoles de la gripe en el aire con placas de cerámica porosas recubiertas con TiO_2 (16). En un futuro cercano, probablemente se verán muchas más soluciones de investigación y comerciales en materiales autodesinfectantes fotocatalíticos con fines clínicos, tratamiento de aguas residuales y materiales de construcción para inhibir el crecimiento de virus y bacterias en espacios públicos como hospitales, colegios, residencias de ancianos, estaciones de tren, etc. La desinfección fotocatalítica podría implementarse en nuestro día a día, en soluciones como teléfonos autoesterilizantes, los picaportes de las puertas, superficies de baños, etc.

El COVID-19 y otros virus respiratorios son una amenaza para aquellos que ya tienen un sistema inmune débil. Esto incluye ancianos, pero las estadísticas del brote del COVID-19 en China muestran que la tasa de letalidad se incrementa significativamente en personas que sufren enfermedades cardiovasculares, diabetes, enfermedades respiratorias crónicas, hipertensión y cáncer (17). Es digno de mención que exista una fuerte evidencia en la concordancia entre los altos niveles de contaminación atmosférica y el desarrollo de todas las enfermedades mencionadas (18, 19). Por lo tanto, vivir en una zona con niveles elevados de contaminación atmosférica debe indirectamente considerarse un factor de aumento de riesgo de infección viral. Después del brote del SARS¹ en 2002 se analizaron 5 regiones chinas diferentes con diferentes niveles de contaminación y se observaron tasas de mortalidad diferentes, oscilando entre el 3,84% en la región menos contaminada y el 8% en la región más contaminada. Los expertos subrayan que la tendencia está asociada a un alto nivel de incertidumbre; ya que variables como el estatus socioeconómico, el tabaquismo, la edad y el sexo no se consideran en el estudio (20). Sin embargo, las observaciones están de acuerdo con otros estudios que muestran una fuerte correlación entre los niveles de contaminación del aire y las admisiones hospitalarias debidas a virus (21). Hoy la OMS estima que 9 de cada 10 personas respiran aire contaminado, mientras que la contaminación del aire causa anualmente 4,2 millones de muertes, pero de eso no se habla mucho. ¿Quizás ahora sea el momento de crear más conciencia sobre este asesino silencioso?

Aclaración sobre la desinfección versus esterilización.

Hay varias maneras de “limpiar” una superficie o soporte, dependiendo del nivel requerido de “limpieza”. La tabla 1 explica la diferencia entre higienización, desinfección y esterilización. Para propósitos cotidianos, la higienización elimina la suciedad y los microorganismos, sin embargo, en muchos casos la limpieza es imposible o insuficiente, como es el caso para fines clínicos y tratamientos de agua. La desinfección y la esterilización son técnicas diferentes para matar los microorganismos diferenciándose solo por el número de microorganismos que sobreviven, por lo que a menudo el límite entre desinfección y esterilización no está totalmente claro. El límite de la esterilización farmacopea es un posible microorganismo, según se establece en varios artículos sobre esterilizados (22). La esterilización completa es difícil de lograr y, por lo general, requiere

¹La degradación del SARS-coronavirus fue revelada en un estudio chino por Han et al[25], y hace referencia al estudio de Foster et al. [1].

Tabla 1
Los diferentes niveles de limpieza

Método	Acción	Agentes utilizados	Ejemplos de aplicación
Higienización	Elimina microorganismos y suciedad	Agua, jabón y detergente	Limpieza "habitual"
Desinfección	Destruye microorganismos	Alcohol, peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio, fenólicos, lodóforos	Para propósitos no clínicos (contacto con piel intacta etc) (23) tratamientos de agua potable (24)
Esterilización	Destruye todos los microorganismos y esporas	Vapor, peróxido de hidrógeno, ozono, óxido de etileno (ETO)	Para propósitos clínicos (penetra tejido estéril) (23) tratamiento para inyección de agua (24)

procedimientos altamente tecnológicos. La fotocatálisis se considera una técnica de autodesinfección en lugar de una técnica de autoesterilización. Foster et al. indican *"La habilidad de matar a todos los grupos de microorganismos sugiere que las superficies tienen el potencial de ser autoesterilizantes, particularmente cuando se combina el TiO_2 con cobre o plata. Sin embargo, por ahora, sería correcto referirse a las superficies o dispersiones fotocatalíticas como autodesinfectantes más que autoesterilizantes"*, de ahí que adaptemos esta recomendación aquí (1).

[1] H. A. Foster, I. B. Ditta, S. Varghese, and A. Steele, "Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: Spectrum and mechanism of antimicrobial activity," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 90, no. 6, pp. 1847–1868, 2011, doi: [10.1007/s00253-011-3213-7](https://doi.org/10.1007/s00253-011-3213-7).

[2] R. J. Watts, S. Kong, M. P. Orr, G. C. Miller, and B. E. Henry, "Photocatalytic inactivation of coliform bacteria and viruses in secondary wastewater effluent," *Water Res.*, vol. 29, no. 1, pp. 95–100, 1995, doi: [10.1016/0043-1354\(94\)E0122-M](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)E0122-M).

[3] T. Kato, H. Tohma, O. Miki, T. Shibata, and M. Tamura, "Degradation of norovirus in sewage treatment water by photocatalytic ultraviolet disinfection," *Nippon Steel Tech. Rep.*, no. 92, pp. 41–44, 2005.

[4] H. Cui et al., "Photocatalytic inactivation efficiency of anatase nano- TiO_2 sol on the H9N2 avian influenza virus," *Photochem. Photobiol.*, vol. 86, no. 5, pp. 1135–1139, 2010, doi: [10.1111/j.1751-1097.2010.00763.x](https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2010.00763.x).

[5] T. An, H. J. Zhao, and P. K. Wong, *Advances in Photocatalytic Disinfection*. 2017.

[6] L. Zan, W. Fa, T. Peng, and Z. kui Gong, "Photocatalysis effect of nanometer TiO_2 and TiO_2 -coated ceramic plate on Hepatitis B virus," *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 86, no. 2, pp. 165–169, 2007, doi: [10.1016/j.jphotobiol.2006.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2006.09.002).

[7] R. Nakano et al., "Photocatalytic inactivation of influenza virus by titanium dioxide thin film," *Photochem. Photobiol. Sci.*, vol. 11, no. 8, pp. 1293–1298, 2012, doi: [10.1039/c2pp05414k](https://doi.org/10.1039/c2pp05414k).

- [8] M. Janus, E. Kusiak-Nejman, P. Rokicka-Konieczna, A. Markowska-Szczupak, K. Zając, and A. W. Morawski, "Bacterial inactivation on concrete plates loaded with modified TiO₂ photocatalysts under visible light irradiation," *Molecules*, vol. 24, no. 17, 2019, doi: [10.3390/molecules24173026](https://doi.org/10.3390/molecules24173026).
- [9] M. V. Liga, E. L. Bryant, V. L. Colvin, and Q. Li, "Virus inactivation by silver doped titanium dioxide nanoparticles for drinking water treatment," *Water Res.*, vol. 45, no. 2, pp. 535–544, 2011, doi: [10.1016/j.watres.2010.09.012](https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.012).
- [10] J. Li, B. Xie, K. Xia, Y. Li, J. Han, and C. Zhao, "Enhanced antibacterial activity of silver doped titanium dioxide-chitosan composites under visible light," *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 8, 2018, doi: [10.3390/ma11081403](https://doi.org/10.3390/ma11081403).
- [11] X. Zheng, Z. peng Shen, C. Cheng, L. Shi, R. Cheng, and D. hai Yuan, "Photocatalytic disinfection performance in virus and virus/bacteria system by Cu-TiO₂ nanofibers under visible light," *Environ. Pollut.*, vol. 237, pp. 452–459, 2018, doi: [10.1016/j.envpol.2018.02.074](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.074).
- [12] Y. Yao, Y. Ohko, Y. Sekiguchi, A. Fujishima, and Y. Kubota, "Self-sterilization using silicone catheters coated with Ag and TiO₂ nanocomposite thin film," *J. Biomed. Mater. Res. - Part B Appl. Biomater.*, vol. 85, no. 2, pp. 453–460, 2008, doi: [10.1002/jbm.b.30965](https://doi.org/10.1002/jbm.b.30965).
- [13] H. Nakamura, M. Tanaka, S. Shinohara, M. Gotoh, and I. Karube, "Development of a self-sterilizing lancet coated with a titanium dioxide photocatalytic nano-layer for self-monitoring of blood glucose," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 22, no. 9–10, pp. 1920–1925, 2007, doi: [10.1016/j.bios.2006.08.018](https://doi.org/10.1016/j.bios.2006.08.018).
- [14] Y. Li, P. Leung, L. Yao, Q. W. Song, and E. Newton, "Antimicrobial effect of surgical masks coated with nanoparticles," *J. Hosp. Infect.*, vol. 62, no. 1, pp. 58–63, 2006, doi: [10.1016/j.jhin.2005.04.015](https://doi.org/10.1016/j.jhin.2005.04.015).
- [15] J. Kim and J. Jang, "Inactivation of airborne viruses using vacuum ultraviolet photocatalysis for a flowthrough indoor air purifier with short irradiation time," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 52, no. 5, pp. 557–566, 2018, doi: [10.1080/02786826.2018.1431386](https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1431386).
- [16] T. Daikoku et al., "Decomposition of organic chemicals in the air and inactivation of aerosol-associated influenza infectivity by photocatalysis," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 1469–1484, 2015, doi: [10.4209/aaqr.2014.10.0256](https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.10.0256).
- [17] M. Roser, H. Ritchie, and E. Ortiz-Ospina, "Coronavirus Disease (COVID-19) – Statistics and Research," 2020. .
- [18] B. Bowe, Y. Xie, T. Li, Y. Yan, H. Xian, and Z. Al-Aly, "The 2016 global and national burden of diabetes mellitus attributable to PM_{2.5} air pollution," *Lancet Planet. Heal.*, vol. 2, no. 7, pp. e301–e312, 2018, doi: [10.1016/S2542-5196\(18\)30140-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30140-2).
- [19] WHO, "Ambient (outdoor) air pollution." [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Accessed: 02-Dec-2020].
- [20] Y. Cui et al., "Air pollution and case fatality of SARS in the People's Republic of China: an ecologic study," *Environ. Heal.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, 2003, doi: [10.1186/1476-069x-2-15](https://doi.org/10.1186/1476-069x-2-15).
- [21] J. Cieniewicz and I. Jaspers, "Air pollution and respiratory viral infection," *Inhal. Toxicol.*, vol. 19, no. 14, pp. 1135–1146, 2007, doi: [10.1080/08958370701665434](https://doi.org/10.1080/08958370701665434).

- [22] T. von Woedtke and A. Kramer, "The Limits of Sterility Assurance," *GMS Krankenhhyg. Interdiszip.*, vol. 3, no. 3, 2008.
- [23] W. A. Rutala and D. J. Weber, "Disinfection, sterilization, and antisepsis: An overview," *Am. J. Infect. Control*, vol. 44, no. 5, pp. e1–e6, 2016, doi: 10.1016/j.ajic.2015.10.038.
- [24] S. Moran, "Engineering science of water treatment unit operations," in *An Applied Guide to Water and Effluent Treatment Plant Design*, 2018, pp. 39–51.
- [25] H. Wei et al., "The inactivation effect of photocatalytic titanium apatite filter on SARS virus," Sheng

NOTAS

NOTAS

NOTAS

NOTAS

LIBRO BLANCO DE LA FOTOCATÁLISIS



ASOCIACIÓN IBÉRICA DE LA FOTOCATÁLISIS

Este Libro Blanco combina el carácter divulgativo de distintos conceptos de interés general -como la panorámica de la contaminación ambiental en espacios exteriores e interiores y sus efectos sobre la salud- con textos redactados por expertos en los que se proponen criterios de diseño y aplicación de materiales fotocatalíticos, descontaminantes y autolimpiantes, adaptados al contexto en el que se utilicen y a su objetivo final.

En sus páginas se encontrarán las numerosas aplicaciones que permiten estos materiales de última generación en distintos sectores: Urbanismo, Edificación, Obra Civil, Industria, Energía, Sanidad, Hogar... También se exponen los sistemas para medir adecuadamente la eficacia de productos fotocatalíticos.

Se repasan los resultados de los numerosos proyectos de investigación que se han llevado a cabo en los últimos años en el campo de la fotocatálisis, y se intenta acercar al lector a esta tecnología definiendo sus conceptos básicos, sintetizando los grandes avances conseguidos en los últimos tiempos y dando respuesta a todas las Preguntas Frecuentes (FAQ) que de manera recurrente se han ido formulando en los últimos tiempos.

Por último, se introduce a la fotocatálisis como una prometedora herramienta de colaboración en el abatimiento de virus, bacterias y microorganismos.

En definitiva, se trata de un volumen muy práctico, indicado para técnicos y gestores de Administraciones Públicas, Estudios de Arquitectura, Empresas Constructoras, Concesionarias, Urbanistas, Profesionales de Medio Ambiente... así como para todas aquellas personas interesadas en la calidad del aire que respiramos y en la optimización de costes de conservación en nuestras ciudades y hogares.

