

[Escriba el título del documento]



## **MÁSTER EN EDIFICACIÓN**

### **TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

# **MATERIALES FOTOCATALÍTICOS Y SUS APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN**

**Autora: Lucía Espiga Lisbona García**

**Directora: Laia Haurie**

**Convocatoria: Febrero del 2016**



## **RESUMEN**

En el documento a continuación expuesto se presentan algunos conceptos básicos relativos a la contaminación atmosférica. Aunque, posteriormente se enfocará desde un punto de vista de la reducción de la contaminación a través de los materiales de construcción.

Para adentrarnos en dicho tema, es interesante conocer de antemano cuáles son los principales contaminantes, sus fuentes emisoras, sus características fisicoquímicas, los métodos analíticos que utilizan las estaciones de control de la contaminación atmosférica, los límites establecidos por la legislación vigente y las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud respecto a los niveles de emisión.

Veremos que el interés de reducir los contaminantes mediante materiales de construcción con efectos descontaminantes se debe centrar sobre todo en ambientes urbanos donde las altas concentraciones de los compuestos contaminantes se hacen más latentes (debido a las emisiones de los vehículos y las industrias) y donde el efecto de estos materiales será mucho más útil.

Veremos cuáles son los compuestos contaminantes más perjudiciales según el Estudio Multicéntrico Español de Contaminación Atmosférica y Mortalidad (*EMECAM*). Así como lo que dicta el nuevo conjunto de directivas de la Unión Europea y las recomendaciones últimas de la Organización Mundial de la Salud acerca de la contaminación.

Así pues, se hace necesario un ambiente más limpio y una mayor calidad de vida. Aquí es donde entra en juego la fotoquímica como proceso ecológico que utiliza la luz solar para crear reacciones que destruyen los compuestos contaminantes. Esto lleva a pensar concretamente en la fotocatalisis aplicada a los materiales de construcción como una solución interesante para reducir la contaminación en las ciudades.

Por ello en la última parte se recopilan los materiales de construcción y los elementos constructivos que contienen nano-compuestos con características fotocatalíticas más usuales en el mercado. En todos estos casos, los materiales tendrán la capacidad de reducir el nivel de sustancias contaminantes orgánicas e inorgánicas presentes en el aire que los rodea además de contar con propiedades autolimpiantes, lo que conlleva un menor coste en mantenimiento.

El documento también recoge grandes obras de interés donde se han aplicado este tipo de materiales y en algunos casos los resultados de descontaminación ambiental que dichos materiales han producido.

Y finalmente se ha elaborado un caso práctico de estudio que pretende orientar sobre los sobrecostes de la utilización de estos materiales fotocatalíticos en vez de los tradicionales en la parte de la envolvente del edificio y además ver los rangos de descomposición de los gases  $\text{NO}_x$  (los compuestos más dañinos para nuestra salud) que producen dichos materiales.



**ÍNDICE**

	Página
<b>1. GLOSARIO.....</b>	<b>7</b>
<b>2. PREFACIO.....</b>	<b>9</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>4. LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....</b>	<b>13</b>
4.1. Fuentes de contaminación.....	14
4.2. España el país europeo más contaminante.....	16
4.3. Análisis de los diversos contaminantes.....	17
4.4. Control de la calidad del aire.....	20
4.5. Medidas para prevenir y corregir la contaminación.....	24
<b>5. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA.....</b>	<b>27</b>
<b>6. LA FOTOCATÁLISIS HETEROGENEA.....</b>	<b>28</b>
6.1. Componentes necesarios para el proceso de fotocatalisis.....	30
6.2. Fotocatalisis heterogénea con TiO <sub>2</sub> .....	32
<b>7. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN FOTOCATALÍTICOS.....</b>	<b>38</b>
7.1. Tipos de materiales de construcción fotocatalíticos.....	45
7.2. AIF y la Isla Fotocatalítica.....	55
7.3. Proyectos con materiales fotocatalíticos.....	56
<b>8. CASO PRÁCTICO.....</b>	<b>61</b>
8.1. Comparativa de presupuestos.....	61
8.1.1. Propuestas alternativas.....	63
8.1.2. Discusión del resultado.....	65
8.2. Estudio de fachadas.....	66
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>77</b>
<b>11. AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>81</b>
<b>12. CONTENIDO DEL CD.....</b>	<b>83</b>



## **1. GLOSARIO**

Abreviaciones:

TiO<sub>2</sub>: Dióxido de Titanio

OMS: Organización Mundial de la Salud

COVNM: Compuestos Orgánicos Volátiles No Metano

NH<sub>3</sub>: Amoniac

POA's: Procesos de oxidación avanzada

BC: Banda de conducción

BV: Banda de Valencia

UV: Ultra violeta

Palabras clave:

Catalizador: sustancia que interfiere en la velocidad de una reacción química acelerándola o ralentizándola.

Semiconductor: material que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.

POA's: Procesos de oxidación en condiciones suaves de presión y temperatura que implican la generación de radicales hidróxido (poseen una elevadísima capacidad oxidante y tiempos de reacción muy cortos) en cantidad suficiente para interactuar con los compuestos contaminantes hasta su mineralización.

Fotón: partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible (espectro electromagnético), la luz infrarroja, las microondas y las ondas de radio.

Contaminante: sustancia que está presente en un medio al cual no pertenece o que lo hace a niveles que pueden causar efectos adversos para la salud o el medio ambiente.

Smog: término inglés que describe el fenómeno de descomposición en la atmósfera de gases contaminantes en presencia de niebla.

Fotocatálisis: aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador.

Banda de conducción (BC): en un aislante o semiconductor, intervalo de energías electrónicas que permite a los electrones libres, es decir, aquellos que se han desligado de sus átomos, sufrir aceleraciones por la presencia de un campo eléctrico externo y, por tanto, permite la presencia de corrientes eléctricas.

Banda de valencia (BV): está ocupada por los electrones de valencia de los átomos, es decir, los que se encuentran en la última capa o nivel energético de los átomos. Los

electrones de valencia son los que forman los enlaces entre los átomos, pero no intervienen en la conducción eléctrica.

Fotocatálisis heterogénea: proceso basado en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido, el fotocatalizador heterogéneo, que normalmente es un semiconductor de banda ancha.

## **2. PREFACIO**

En 1967, Fujishima y Honda descubrieron el fenómeno de la descomposición fotocatalítica del agua (fotólisis del agua) cuando se expone un electrodo de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) a una luz intensa, más tarde fue llamado el efecto Honda-Fujishima. El descubrimiento de las propiedades de auto-limpieza de dióxido de titanio inició entonces una revolución en la cerámica, el vidrio, y otras industrias.

En los 80s, la contaminación orgánica en el agua se empieza a descomponer utilizando  $\text{TiO}_2$  en presencia de luz ultravioleta.

Desde sus inicios, la investigación de este tema ha producido numerosos resultados, en ocasiones contradictorios o no concluyentes, en base a los cuales se fueron apuntando algunas ideas sobre la viabilidad del método.

No fue hasta la década de los 90s, cuando Hoffman y Fujishima mediante sus experimentaciones realizadas utilizando el  $\text{TiO}_2$  como catalizador para la limpieza del agua y aire, concluyeron que la fotocatalisis era efectiva y se abrió entonces una amplia gama de líneas de investigación.

Por lo tanto, la fotocatalisis en fase gas, una técnica de oxidación avanzada, viene siendo investigada en los últimos 25 años para el tratamiento de aire contaminado de diverso origen.

La fotocatalisis heterogénea para la eliminación de gases contaminantes se basa en la oxidación de estos compuestos presentes en el aire mediante un catalizador semiconductor activado por una luz de una determinada longitud de onda.

Actualmente, los estudios se han centrado en buscar el catalizador idóneo para el proceso, en estudiar la susceptibilidad que tienen de los diversos contaminantes a ser oxidados por este método, y en las aplicaciones potenciales de esta tecnología.

Existe claramente una dificultad para poder comparar los resultados obtenidos de los múltiples estudios que se llevan a cabo en universidades y centros de investigación por las diferentes configuraciones del material catalizador y diversas características del compuesto que se desea tratar añadiendo también el factor de las diferentes configuraciones de las fuentes de luz, que puede ser natural y artificial, con los diversos componentes a utilizar para cada caso.

Hasta ahora, la mayor parte de los estudios de los procesos fotocatalíticos se han realizado en reactores experimentales de laboratorio. Las atmósferas o ambientes donde se podría dar una potencial aplicación de esta tecnología pueden ser tanto espacios cerrados como zonas residenciales abiertas, donde se detectan concentraciones significativas de contaminantes en el aire en fase vapor ya que ha quedado sobradamente comprobada la efectividad de este proceso para la destrucción de dichos contaminantes.



### **3. INTRODUCCIÓN**

El sector de la construcción es un componente significativo en la economía de cualquier país y cada día presenta nuevos retos que provocan una nueva reformulación en cuanto a sus materiales, técnicas constructivas y/o impacto ambiental.

Con el crecimiento de la población, surgen nuevos problemas como las altas emisiones de contaminantes provenientes de la combustión de residuos fósiles, especialmente derivados de compuestos de nitrógeno, carbono y azufre.

Estos agentes nocivos no sólo provocan daños a la salud o al medio ambiente, atacando la capa de ozono y provocando el calentamiento global o la lluvia ácida, sino que también disminuyen la durabilidad de las estructuras de hormigón mediante la acidificación y degradación, aumentando los costes de mantenimiento y rehabilitación.

Actualmente se buscan métodos para aprovechar la energía solar que llega a la superficie terrestre para aspectos útiles de cualquier sector. Por ello se replantea el uso de la luz con fines medioambientales y se estudian tecnologías fotoquímicas que permitan disminuir el impacto de estos contaminantes.

En vista de esto, la fotocatalisis se presenta como un proceso que permite degradar los gases nocivos mediante la incorporación de un agente oxidante, logrando así mantener el medio más limpio. A pesar de ello, la descontaminación medioambiental se considera aún un campo nuevo y prometedor, poco establecida en la práctica.

En el sector de la construcción, los resultados de los ensayos y pruebas que se han llevado a cabo tanto en laboratorios como en campo abierto permiten llegar a la conclusión de que los materiales fotocatalíticos, irradiados con la luz adecuada, aumentan la eficacia de degradación de las sustancias orgánicas e inorgánicas con las que entran en contacto.

Se considera entonces necesaria la divulgación de la utilización de los fotocatalizadores aplicados en los materiales de construcción de la envolvente de cualquier tipo de edificación, ya que puede ser un nuevo método para contribuir a la reducción de los contaminantes atmosféricos de las ciudades.

Además, las pruebas experimentales de dichos materiales permiten afirmar que una construcción fabricada o revestida con material fotocatalítico, además de reducir una gran cantidad de sustancias nocivas, con el ahorro en costes de salud pública que eso conlleva, puede mantener inalterado su aspecto estético durante un largo periodo de tiempo, lo que nos lleva también a una reducción de costes de mantenimiento.

Por todo ello, se propone la realización de este documento donde además de recopilarse gran cantidad de información sobre materiales fotocatalíticos en construcción se fijan los objetivos de analizar los sobrecostes de la utilización de estos materiales, así como su potencial de descontaminación medioambiental para ver cuán realista y ventajosa es su puesta en obra en la realidad.



## 4. LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Actualmente la contaminación que ejercemos sobre el aire supone uno de los problemas ambientales más graves a los que se enfrenta nuestra sociedad.

Los efectos negativos que causa la contaminación atmosférica están demostrados y son motivo suficiente para actuar y disminuir los niveles de contaminantes en nuestras ciudades. Es un tema que hay que abordar urgentemente y de forma eficaz tanto por parte de los gobiernos e instituciones internacionales como por todos los ciudadanos.

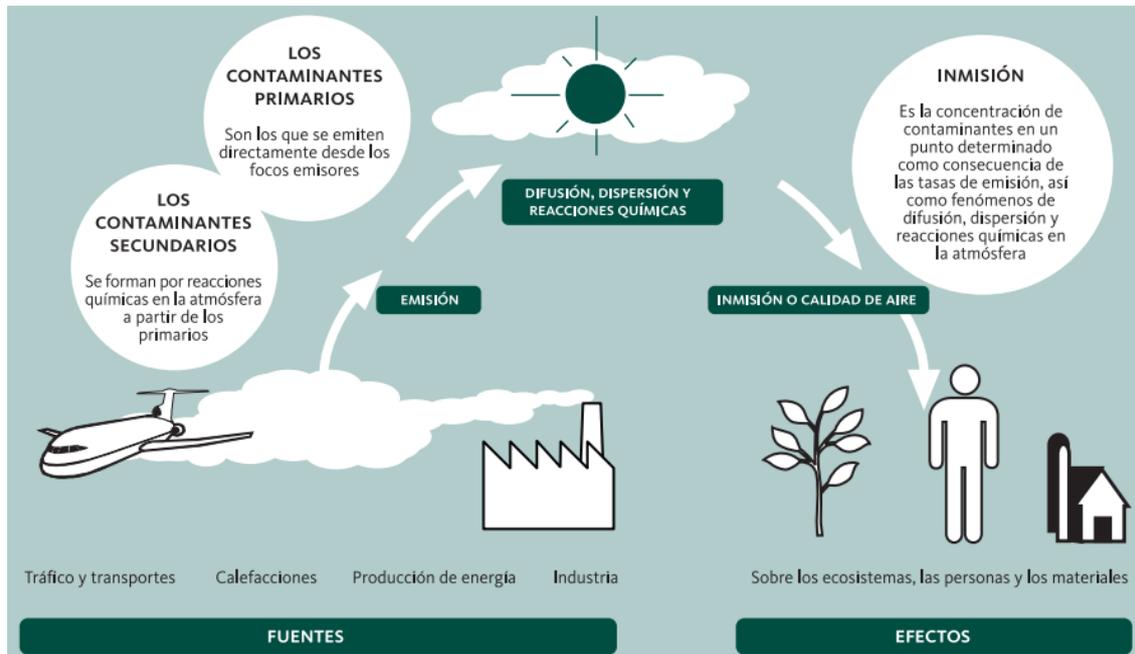


Figura 1. Fuentes, tipos de contaminantes, procesos y efectos generales en contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica se define como la presencia en la atmósfera de materias, sustancias o formas de energía que causan molestias graves o daños en la salud de las personas, el medio ambiente u otros bienes.

La Directiva 2008/50/CE del 11 de junio de 2008, define “contaminante” como toda sustancia presente en el aire ambiente que pueda tener efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente en su conjunto.

La cantidad de contaminantes presentes en un medio lo dará la diferencia entre los contaminantes que se encuentren en la atmósfera (emitidos o producidos en ella) y los que se eliminan a través de los procesos de autodepuración por deposición, precipitación y absorción por el suelo, el agua y la vegetación.

Numerosos estudios destacan las graves consecuencias que producen los altos niveles de contaminación atmosférica en la salud de los ciudadanos y en el medio ambiente.

Lo que determina la calidad del aire que nos rodea es principalmente la distribución geográfica de las fuentes emisoras de contaminantes y las cantidades de contaminantes

que emiten. La contaminación del aire urbano es un problema de gran magnitud en muchas ciudades del planeta.

Dicha contaminación atmosférica no solo tiene efecto de índole local, sino que también puede desplazarse a través de los vientos largas distancias y afectar así a otras comunidades, sin ser éstas directamente las causantes de la contaminación.

La dispersión y el transporte de los contaminantes por el aire están condicionados principalmente por procesos fisicoquímicos que se producen en la atmósfera, la meteorología y la orografía del terreno. Por ello las concentraciones de cualquier contaminante en un momento determinado corresponderán a un balance entre diferentes procesos de aporte y eliminación de los contaminantes implicados. Estos aportes de contaminantes son producidos por emisiones primarias que pueden darse desde fuentes naturales o desde fuentes antropogénicas (derivadas de las actividades humanas).

Por otro lado también existen formaciones in situ de compuestos secundarios como resultado de las reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera (muchas de ellas activadas por la energía de la radiación solar).

#### **4.1. Fuentes de contaminación**

El hombre no es el causante de toda la contaminación que llega a la atmósfera aunque, en la mayoría de los casos, las fuentes de contaminación más importantes y perjudiciales para el medio ambiente se derivan de sus acciones y actividades económicas.

Los contaminantes presentes en la atmósfera se pueden clasificar según varios criterios y en función de su procedencia se distinguen dos tipos:

- Fuentes biogénicas o naturales: son los factores que contaminan independientemente de las actividades humanas como la polvareda producida por el viento, la vegetación, los incendios forestales, la descomposición de la materia orgánica, los volcanes, etc.
- Fuentes antropogénicas: son las que contaminan a causa de actividades humanas. Dentro de éstas podemos distinguir entre:
  1. Fuentes fijas o estacionarias: son las instalaciones ubicadas en un solo lugar cuyo propósito es desarrollar procesos industriales (combustión y otros procesos industriales), económicos, de servicios o cualquier actividad que genere emisiones contaminantes.
  2. Fuentes móviles: se consideran los medios de transporte como automóviles, aviones, barcos, etc. y la maquinaria móvil.

Las fuentes que emiten contaminación al aire ambiente variará según el lugar y la contaminación que soporta la atmósfera vendrá establecida según las características de cada zona.

Pero a nivel internacional, los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) son la principal causa de contaminación del aire. Principalmente, es en el sector industrial y del transporte por carretera donde se produce la combustión de estas materias primas.

Dentro del sector industrial habría que diferenciar entre las fábricas y las centrales de producción de electricidad (que producen la mitad de la electricidad consumida en España).

Cabe señalar que el transporte tiene claramente más peso en cuanto a la responsabilidad de la contaminación del aire con aproximadamente el 80% del total de emisiones.

En los países desarrollados, la raíz de la contaminación se halla, principalmente, en las emisiones causadas por el tráfico rodado, y en menor proporción, las causadas por las calefacciones, así como las ocasionadas por el tráfico marítimo y aéreo en aquellas ciudades que disponen de puerto y/o aeropuerto cercanos. También se debe tener en cuenta el problema causado por determinadas industrias, centrales energéticas, refinerías e incineradoras; sin olvidar el aporte causado por algunas fuentes naturales de cierta importancia.

Las sociedades modernas se han organizado en base al transporte, eludiendo la responsabilidad hacia la conservación de la Naturaleza. Con el desarrollo de la tecnología, los medios de transporte han tendido a satisfacer dos directrices básicas, al margen de los inconvenientes que pudieran acarrear: por un lado aumentar las velocidades y por otro aumentar la autonomía que nos proporciona su uso. Por lo que el avance en estas dos líneas ha supuesto una mayor comodidad y eficiencia en el servicio pero, en contraposición, ha producido un crecimiento de los impactos ambientales y sociales, entre ellos la contaminación del aire.

Además de las relativas ventajas de velocidad y comodidad, también se haya el triunfo del modelo productivista que desplaza a los usuarios y mercancías hacia el transporte privado y hacia los medios de transporte menos eficientes energéticamente.

El problema es que el transporte se considera como una actividad económica más, cuyo estado óptimo es el del crecimiento indefinido sin reparar en el coste ambiental.

Existe una falta de conciencia en los políticos debida a que la mayoría están inmersos en una cultura automovilística que ellos mismos promueven. Por ello intentan solucionar la congestión de tráfico a través de una iniciativa arraigada en políticas obsoletas, aumentar la capacidad de las vías, lo que provoca mayor afluencia de vehículos y, a corto plazo, mayor congestión con más vehículos circulando.

En general, a nivel mundial, el intenso y continuo tráfico, unido a las fábricas que no controlan sus emisiones, convierten el aire de ciudades en nubes de contaminación. Por lo que los niveles de partículas y gases contaminantes sobrepasan en muchos casos el límite de seguridad para la salud humana marcado por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Existen numerosas medidas para que una ciudad disminuya el nivel de contaminantes en el aire. Principalmente, para reducir dicho nivel, se deben adoptar actuaciones que promuevan una disminución del tráfico motorizado, una reducción de la necesidad de movilidad y la potenciación del transporte público (en especial el eléctrico). Es muy importante potenciar también los medios no motorizados en las ciudades.

En cuanto a las zonas industriales, habría que seguir dos directrices claras para mejorar la calidad de su aire, por un lado adoptar las mejores tecnologías industriales disponibles y por otro reducir en un alto porcentaje la generación eléctrica a través de centrales térmicas, sobre todo las que utilizan carbón.

## 4.2. España el país Europeo más contaminante



Imagen 1. Vista de la contaminación sobre Barcelona desde la carretera de las Aigües (Dic. 2013)

Es un hecho más que constatado que la contaminación del aire en las ciudades es un problema grave para las principales áreas metropolitanas españolas.

En el último estudio anual (2013), España volvió a superar los límites legales de concentración de gases contaminantes impuestos por la Unión Europea (UE), y las recomendaciones de la OMS.

En nuestro país, el dióxido de azufre, el óxido de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles y el amoníaco son los principales gases contaminantes de la atmósfera y su reducción es urgente, sobretodo en España, el único país de la UE que suspende por sus altos niveles de emisión según la Agencia Europea del Medio Ambiente.

El tráfico es la principal fuente de contaminación atmosférica en nuestras ciudades, ya que aproximadamente el 80% de la contaminación atmosférica en España está causada por el tráfico rodado. Por lo que son necesarias medidas drásticas para disminuir el uso del automóvil.

En España, cerca del 40% del total de la energía consumida está destinada al transporte (la media comunitaria es del 30%), lo que aumenta hasta un 50% incluyendo su ciclo productivo (energía consumida en la fabricación del vehículo, en la construcción de las infraestructuras, en su mantenimiento, etc.).

El escenario actual de predominio del vehículo rodado se ha dado porque este medio sale beneficiado en detrimento de otros a través de medidas fiscales, subvenciones y de construcción de infraestructuras (año tras año la carretera se lleva entre el 60 y el 70% de las cuantiosas inversiones en transporte), a pesar de ser el menos eficiente y el que conlleva mayores problemas ambientales.

El aire contaminado afectó en 2013 a 44,8 millones de personas en el Estado español, el 95% de su población. La población que respira aire contaminado por encima de los valores legales (valores límite establecidos por la UE) es de 16,8 millones de personas, un 36% del total. Es decir, más de uno de cada tres españoles respira aire que infringe los límites que marca la ley.

La contaminación del aire es un problema de primer orden y se debe abordar como tal, y es que cada año se registran 19.940 muertes prematuras en el Estado español por afecciones derivadas de la contaminación del aire, de acuerdo a estudios de la Comisión Europea.

No solo a nivel estatal, sino también a nivel mundial, la contaminación del aire es el gran problema de salud medioambiental y según la OMS, se encuentra en el grupo 1 de sustancias que provocan cáncer (el de mayor riesgo) y causa millones de muertes al año.

En concreto, en Europa, la comisión europea calcula que la contaminación provoca alrededor de 400.000 muertes al año, diez veces más que las que se producen por accidentes de tráfico.

De hecho, en el año 2012, la contaminación fue la causa de unas 7 millones de muertes a nivel mundial, o lo que es lo mismo, una de cada ocho muertes producidas ese año está vinculada al aire contaminado.

Por otro lado, tenemos que la Agencia Europea de Medio Ambiente estima que los gases nocivos del aire pueden reducir hasta tres años la esperanza de vida de los ciudadanos.

### **4.3. Análisis de los diversos contaminantes**

En el aire existen cinco grupos de sustancias que ocasionan más del 90% de la contaminación atmosférica según el Estudio Multicéntrico Español de Contaminación Atmosférica y Mortalidad (*EMECAM*).

Estos cinco grupos de mayor importancia como contaminantes del aire son: los óxidos de carbono, los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre, los hidrocarburos y las partículas y aerosoles. Se pueden destacar también otros contaminantes como las dioxinas, los CFCs (clorofluorocarbonos) y el ozono troposférico (O<sub>3</sub>).

## Óxidos de Carbono

Dada la presencia natural del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera y su falta de toxicidad, no debería considerarse una sustancia contaminante, sin embargo sí se considera ya que es el principal responsable del efecto invernadero. Además su concentración está aumentando en las últimas décadas por la quema de los combustibles fósiles y de grandes extensiones de bosques y por ende es uno de los gases que más influye el calentamiento global de la tierra.

La mayoría del monóxido de carbono (CO) presente en la atmósfera es de tipo secundario, es causado por la misma naturaleza cuando se oxida el metano que se origina por la putrefacción de la materia orgánica. Pero hay que destacar que después del  $\text{CO}_2$ , el CO es el contaminante que más se emite a la atmósfera por causas no naturales, es decir por la actividad humana.

El CO que emitimos es un contaminante primario que procede, principalmente, de la combustión incompleta de la gasolina y el gasoil en los motores de los vehículos. Es tóxico para los humanos aunque lo toleramos en pequeñas cantidades. Para reducir su emisión se han desarrollado sistemas de reactores que completan el proceso de combustión convirtiendo el CO en  $\text{CO}_2$  y los hidrocarburos en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

## Óxidos de Nitrógeno

Los Óxidos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) son unos de los agentes contaminantes del aire que se encuentran en mayor abundancia y están relacionados con la formación de smog, además de tener un papel titular en la formación de contaminantes secundarios perjudiciales para el ser humano, tales como ozono ( $\text{O}_3$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ).

Los compuestos que se suelen considerar dentro de la denominación de  $\text{NO}_x$  son el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). Son contaminantes primarios que inciden mucho en los problemas de contaminación.

El que más se emite es el NO, que rápidamente se oxida pasando a ser  $\text{NO}_2$ , por lo que es éste último el que predomina en la atmósfera. Influyen muy significativamente en las reacciones que destruyen el ozono (el troposférico y el estratosférico) y en el fenómeno de la lluvia ácida, al transformarse  $\text{HNO}_3$ .

Son muy peligrosos ya que en altas concentraciones producen daños en la salud y en la vegetación además de corroer materiales diversos. Se generan al oxidarse el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) atmosférico en las combustiones a altas temperaturas. Se originan de forma natural en los procesos de desnitrificación del suelo y los océanos.

Por otro lado está el monóxido de dinitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ) que también interviene en la estratosfera en reacciones fotoquímicas que pueden tener influencia en la destrucción de la capa de ozono influyendo así en el efecto invernadero. Éste compuesto está emitido fundamentalmente por procesos microbilológicos naturales y en menor cantidad por actividades agrícolas y ganaderas (un 10% del total).

## Compuestos de azufre

El Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) es un contaminante primario de olor fuerte e irritante que se convierte, en su gran mayoría, en iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Esto puede desencadenar fenómenos como el smog sulfuroso o smog clásico y la lluvia ácida. Sus emisiones de origen antrópico, vienen sobre todo por la combustión de carbón y petróleo y la metalurgia, que generan más de la mitad del emitido a la atmósfera. Aunque cabe destacar que se están tomando medidas para disminuir estas emisiones, como la sustitución en algunas centrales térmicas de los carbones españoles (de baja calidad) por combustibles de importación, más limpios.

Los efectos de este compuesto sobre las personas afectan mayoritariamente al sistema respiratorio y a la irritación de las mucosas.

## Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Destacan como contaminantes los que tienen entre 1 y 4 átomos de carbono por ser gases a temperatura ambiente.

El Metano ( $\text{CH}_4$ ) es un contaminante primario y el hidrocarburo más abundante en la atmósfera. Su formación natural la desencadena la descomposición anaerobia bacteriana en zonas húmedas y las fermentaciones en el intestino de seres vivos.

Por otro lado, su origen antropogénico es causado por los combustibles fósiles, la agricultura del arroz y la descomposición de materia orgánica en vertederos. No causa daños en humanos ni seres vivos pero sí que influye en el efecto invernadero.

Existen otros hidrocarburos que intervienen significativamente en las reacciones que originan el smog fotoquímico.

## Partículas y aerosoles

Las partículas en suspensión, conocidas por sus siglas en inglés PM (particulated matter), son sustancias sólidas o líquidas y pueden ser una mezcla muy variada. Se clasifican según su medida y según cómo se comportan al respirarlas, más que según su contenido. Hay partículas de diámetro igual o inferior a  $10\ \mu\text{m}$  (PM10) que suelen llegar más allá de la garganta. Las que tienen un diámetro igual o inferior a  $2,5\ \mu\text{m}$  (PM2,5) que pueden llegar hasta los pulmones. Y por último las partículas ultrafinas, con un diámetro igual o inferior a  $0,1\ \mu\text{m}$ , que pueden pasar de los alveolos a la sangre.

El tráfico es la fuente principal de las partículas. Éstas se generan sobre todo a partir de la combustión en los motores, y también del roce de las ruedas con el pavimento. Los motores diésel originan humos formados mayoritariamente por partículas finas y ultrafinas de hidrocarburos, debidas a una combustión incompleta. Por esto, el uso creciente del diésel preocupa desde el punto de vista ambiental.

También hay partículas de origen natural (aerosoles marinos, erosión de rocas y piedras, polvo de los desiertos) o por otras actividades humanas (obras públicas y construcción,

minería, fabricación de cerámicas o cemento...). La suspensión de las partículas en el aire que respiramos se hace latente sobretodo en épocas de sequía. Por eso, en los meses que menos llueve los niveles de partículas son más elevados.

Por un lado pueden producir calentamiento al absorber radiación y por el otro pueden provocar enfriamiento (sobre todo si se encuentran en la alta atmósfera) al reflejar parte de la radiación que incide en la atmósfera disminuyendo la que llega a la superficie.

#### **4.4. Control de la calidad del aire**

Mejorar la calidad del aire en las ciudades es un desafío que urge que cumplamos, porque además la población está aumentando exponencialmente con los años.

Las políticas de protección de medio ambiente deben basarse en el principio fundamental de prevención. Un principio que marca la directriz de la actuación medioambiental respecto a la protección de la calidad del aire y está basado en minimizar las emisiones a la atmósfera de sustancias contaminantes. También se conoce como la estrategia de reducción en origen.

Con lo cual, se trata de desertar la actitud tradicional de reaccionar ante los problemas de la contaminación después de que hayan salido y sustituirla por la de prevenir estos problemas y evitar que se produzcan.

Las ventajas de este enfoque son bastante evidentes y comportan además de un ahorro de recursos, evitar los daños que, en algunos supuestos, pueden tener incluso carácter irreversible. La adopción de medidas preventivas y la racionalización del uso de los recursos pueden hacer compatibles estas dos aspiraciones de la sociedad humana. Las medidas de prevención de la contaminación atmosférica se basan fundamentalmente en:

La normativa española establece unos niveles máximos admisibles para las emisiones originadas a raíz de actividades industriales y vehículos. La ley fija unos criterios para asegurar la calidad del aire en cuanto a  $\text{NO}_x$ , CO, plomo, cloro molecular, ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y partículas sedimentables.

Por ejemplo, más adelante veremos, que la normativa establece que no se debe rebasar el valor de  $40\mu\text{g}$  de  $\text{NO}_2$  por  $\text{m}^3$  de aire como valor medio anual. Y sin embargo, el informe de la calidad del aire 2013 elaborado por ecologistas en acción muestra ciertos puntos de medición como el Eixample de Barcelona o la Plaza de España de Madrid en los que se supera con creces el límite propuesto.

La administración se ha basado en estudios de la OMS para fijar los niveles aceptables. Estudios que informan sobre los efectos de diversas concentraciones de contaminantes en la salud, la vegetación, el medio natural y los monumentos de interés histórico.

Para controlar la calidad del aire, las autoridades han dispuesto por el país redes de estaciones, concretamente más de 500 en diversas zonas urbanas. Éstas toman muestras, las analizan, y envían los resultados de dichos análisis a unos centros de control. Así se

pueden establecer los valores medios anuales de concentración de los diversos gases medidos y los días en los que se sobrepasa el valor fijado por la UE.

Las grandes urbes cuentan con sistemas de vigilancia propios, que dependen de su ayuntamiento, y a la vez, estos sistemas pueden interactuar de forma local, comunitaria o incluso a nivel mundial.

Además, las industrias más contaminantes están obligadas a tener sistemas de vigilancia propios y específicos para poder controlar sus emisiones.

Las redes internacionales o mundiales controlan la contaminación que cruza las fronteras y analizan también los datos sobre gases de efecto invernadero o sobre el agujero en la capa de ozono.

Las estaciones de vigilancia utilizan equipos automáticos para analizar las muestras recogidas. Estos equipos realizan diferentes pruebas físicas y químicas para detectar la presencia de los contaminantes que se desean controlar.



Imagen 2. Estación de medición de NO<sub>x</sub>

En la imagen 2 podemos ver un ejemplo de una estación colocada en un entorno real para llevar a cabo las mediciones de los contaminantes.

Otra forma indirecta de conocer la calidad del aire es usando indicadores biológicos, ya que existen organismos que son especialmente sensibles a la presencia de determinados contaminantes. Tenemos el ejemplo de los líquenes, una de las especies más empleadas como bioindicadores de la calidad del aire ya que son muy sensibles al SO<sub>2</sub>, HF (ácido fluorhídrico) y HCl (ácido clorhídrico).

En Europa, los países han evolucionado de manera similar en cuanto a los problemas de contaminación por lo que se encuentran actualmente en una situación nueva y parecida. Por ello, en 2005 se aprobó la “Estrategia europea sobre la contaminación atmosférica”. Uno de sus principales objetivos era revisar la legislación en materia de calidad del aire, lo cual supuso la aprobación en 2008 de la Directiva 2008/50 relativa a la calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia en Europa.

La OMS marca los límites seguros de emisiones (de contaminantes “clásicos” como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas, etc.) en los 20 µg/m<sup>3</sup> en las mediciones habituales.

En España, son las comunidades Autónomas las responsables de la vigilancia general de la calidad del aire, aunque apoyadas en su labor por el Ministerio de Medio Ambiente.

El marco normativo en el cual se regula la calidad del aire y como se lleva a cabo la evaluación de la calidad del aire en España es el siguiente:

- Ley 34/2007, de calidad del aire y protección de la atmósfera
  - RD 102/2011, relativo a la mejora de la calidad del aire que transpone:
    - Directiva 2004/107/CE relativa al As, Cd, Hg, Ni y HAP
    - Directiva 2008/50/CE relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM, Pb, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, CO y O<sub>3</sub>)

El objetivo de la normativa de calidad del aire es evitar, prevenir y reducir los efectos nocivos de las sustancias legisladas contaminantes del medio ambiente y nocivas para la salud. Los principios de dicha normativa son:

- Establecer objetivos de calidad del aire.
- Definir zonas de calidad del aire para la gestión de la evaluación.
- Establecer métodos y criterios comunes de evaluación.
- Informar a la población y organizaciones interesadas.

Las directivas europeas establecen los objetivos a cumplir respecto a calidad del aire, y es con estos parámetros con los que se deben comparar los datos adquiridos a través de las estaciones de medida colocadas por toda España para evaluar cuál es nuestra situación. A continuación se pueden ver los valores límite de concentración de gases para la protección de la salud:

Contaminante	Periodo promedio	Valor Límite	Fecha de cumplimiento	Umbral de alerta
SO <sub>2</sub>	Horario	350 µg/m <sup>3</sup> (24 Superaciones como máximo anuales)	01/01/2005	500 µg/m <sup>3</sup>
	Diario	125 µg/m <sup>3</sup> (3 superaciones como máximo anuales)	01/01/2005	-
NO <sub>2</sub>	Horario	200 µg/m <sup>3</sup> (18 superaciones como máximo anuales)	01/01/2010	400 µg/m <sup>3</sup> (en 3 horas)
	Anual	40 µg/m <sup>3</sup>	01/01/2010	-
PM10	Diario	50 µg/m <sup>3</sup>	01/01/2005	-
	Anual	40 µg/m <sup>3</sup>	01/01/2005	-
Pb	Anual	0.5 µg/m <sup>3</sup>	01/01/2005	-
Benceno	Anual	5 µg/m <sup>3</sup>	01/01/2010	-
CO	Máximo diario de las medias móviles octohorarias	10 µg/m <sup>3</sup>	01/01/2005	-
PM 2.5	Anual	25 µg/m <sup>3</sup> (con un margen de +2 µg/m <sup>3</sup> )	01/01/2015	-

En el siguiente gráfico se puede ver la evolución de las emisiones de diferentes gases contaminantes realizada por la Agencia Europea de Medio Ambiente:

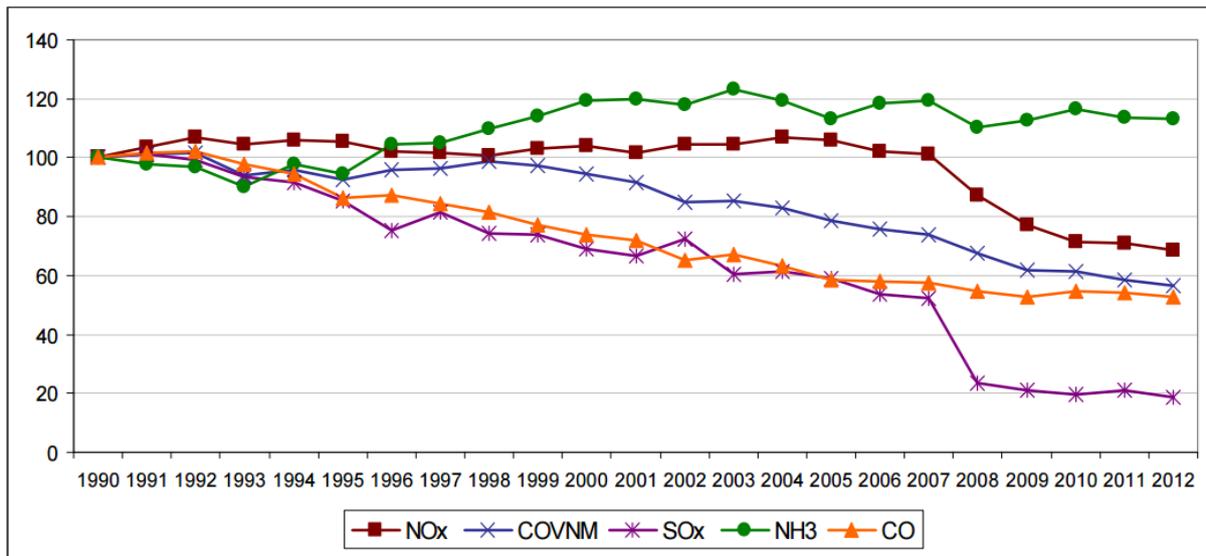


Gráfico 1. Índice de evolución de las emisiones de los gases contaminantes principales

En el gráfico 1 se observa un único gas con comportamiento diferenciado creciente, el  $\text{NH}_3$ , que muestra en el año 2012 un incremento del 13,3% respecto al año 1990.

Por otro lado vemos que el  $\text{NO}_x$  tiene una evolución estable con ligero crecimiento hasta el año 2007, seguido de una caída bastante drástica a partir del año 2008 que deja el 2012 con un 31,4% menos de emisiones de dicho gas que en el año 1990.

Los COVNM se caracterizan por una evolución bastante estable hasta 1998 y posteriormente le sigue una tendencia decreciente, finalizando con una caída de un 43,3% en el 2012 respecto a 1990.

Por su parte, el CO y el  $\text{SO}_x$  tienen una evolución decreciente muy similar con caídas entre 1990 y 2012 de un 47,4% para el primero y del 81,2% para el segundo. Para el  $\text{SO}_x$  el descenso es especialmente relevante entre los años 2008-2012.

A continuación podemos ver una tabla que nos muestra si la concentración de gases sobrepasa el límite de la normativa. Estos son datos que nos revela el estudio realizado sobre la calidad del aire en España en 2012:

Contaminante	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
SO2								
NO2								
PM10								
O3								
Ni								
Cd								
As								

-  Superación de los valores
-  Sin obligación de evaluación hasta 2008
-  Valores no superados

El descenso, desde el año 2007, de las emisiones de NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y de partículas M10 se debe principalmente a la crisis, que ha provocado un descenso en la circulación de vehículos (en 2013 el consumo de combustibles automovilísticos fue un 24% inferior al del 2007) y la disminución de la actividad industrial.

Otros aspectos que contribuyen a esta tendencia son el progreso de los automóviles hacia vehículos más pequeños y eficientes, así como la sustitución de la generación eléctrica en centrales térmicas (que se ha reducido en un 27% desde 2008) por la energía eólica y solar. La reducción de estos contaminantes, por tanto, no se debe a las medidas adoptadas por las administraciones públicas, sino a las circunstancias mencionadas.

El contaminante que presenta mayor extensión y afección es el ozono troposférico, con unos niveles que se mantienen o incluso crecen. Esto es debido al incremento de las situaciones meteorológicas extremas en los últimos años que dejan latentes temperaturas medias más altas y olas de calor durante el verano como resultado del cambio climático. Casi la totalidad de la población española, en el 2013, respiró aire con concentraciones de ozono peligrosas para la salud.

Además, en el ozono, la crisis ha hecho el efecto contrario que en el resto de contaminantes ya que el Ozono reacciona con el NO y al haber menos coches circulando el Ozono no desaparece.

Según un estudio publicado en 2014 en la revista científica *Science of the Total Environment* existe una bajada de alrededor del 30% de las partículas en suspensión PM10 en las zonas urbanas e industriales, entre el año 2001 y el 2013. Las PM10, generadas por la industria, la construcción y el transporte, están compuestas por hollín y metales pesados, entre otras sustancias.

También se cifra una disminución de un 36% de las partículas PM2,5, las más finas y por lo tanto más nocivas, al adentrarse más en los pulmones. Estas disminuciones son debidas, además de a la menor actividad industrial y al menor tráfico por la crisis, a la entrada en vigor de diferentes directivas europeas de control de emisiones de las grandes industrias y de los tubos de escape de los vehículos.

#### **4.5. Medidas para Prevenir y corregir la contaminación**

La legislación y las actuaciones medioambientales parece que intentan poner cada vez más énfasis en la eliminación de contaminantes, reflejo de la preocupación de la sociedad por este aspecto. Por ello, como se ha visto, se van creando más regulaciones referentes a la contaminación atmosférica y cada vez más estrictas.

Si al fenómeno de la contaminación le añadimos la suciedad en las fachadas e infraestructuras de nuestros núcleos urbanos nos encontramos ante un paisaje deteriorado que afecta ya no solo al aspecto estético sino también a la salud de las personas.

Pero a pesar de todo esto, por los datos y cifras observadas hasta el momento, vemos que se trata de un problema de salud pública que no está recibiendo la atención que debería por parte de las distintas Administraciones. Éstas, que parece que intentan regular la situación mediante normativas, luego no ponen medios para que se cumplan como deberían. Además, las administraciones tampoco suelen informar adecuadamente a los ciudadanos ni su información refleja la gravedad del problema. Por todo ello, cabe resaltar que las administraciones públicas se exponen al pago de una multa millonaria por infringir de la ley y poner en riesgo la salud de los ciudadanos españoles.

Ecologistas en Acción señala que La Comisión Europea inició, en enero de 2009, un procedimiento de infracción contra España por el incumplimiento de la normativa sobre calidad del aire que está a punto de llegar al Tribunal de Justicia Europeo.

Según la ley, los Planes de Mejora de la Calidad del Aire son obligatorios, aunque en muchos casos o no existen o no se llevan a cabo. En concreto, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente aprobó en abril del 2013 el Plan Aire, una iniciativa que incluye 78 medidas para reducir la contaminación realistas y eficaces según el órgano de gobierno, pero apenas ha tenido desarrollo, por falta de voluntad política.

Si se quiere reducir la contaminación del aire existen ciertas directrices muy claras que las administraciones deben tener en cuenta como la disminución del tráfico motorizado y la potenciación del transporte público (en especial el eléctrico). Además, también es necesario dar facilidades a los medios no motorizados.

Para mejorar el aire de las zonas industriales la mejor estrategia es la adopción de las tecnologías industriales más avanzadas y la reducción de la generación eléctrica por centrales térmicas, en particular de las que utilizan carbón.

A continuación se listan una serie de medidas para controlar y minimizar la contaminación del aire:

- **Medidas preventivas:** dirigidas a evitar la aparición del problema como pueden ser:
  - Planificaciones de uso del suelo, donde se contemplan las zonas adecuadas para la implantación de industrias.
  - Evaluaciones de los impactos ambientales, estudios sobre las alteraciones que provocan ciertas acciones sobre el medio ambiente.
  - Uso de tecnologías de baja o nula emisión de contaminantes.
  - I+D sobre fuentes de energía alternativas menos contaminantes.
  - Mejora de los combustibles y carburantes para su emisión nula o reducida de contaminantes.
  - Medidas sociales de educación ambiental.
  - Medidas legislativas que establezcan normativas para mejorar y controlar la calidad del aire.

- **Medidas correctoras:** son las que evitan la descarga masiva de contaminantes a la atmosfera como la depuración del aire ya contaminado o las estrategias de dispersión. Estas se listan en el cuadro siguiente:

Método de dispersión	Expulsión de contaminantes a través de chimeneas muy altas para diluirlos y evitar que se concentren a nivel de suelo. Este método conlleva el problema de que puede provocar altas concentraciones de contaminantes en lugares alejados de la fuente de emisión debido a condiciones meteorológicas. Por lo tanto esta técnica aleja o dispersa los contaminantes pero no los depura.
Tecnologías de depuración del aire contaminado	Concentración y retención de partículas con maquinaria y utensilios adecuados como los sedimentadores gravitacionales, los separadores centrífugos, los filtros, etc.
	Los cuales se basan mayoritariamente en la circulación de líquidos capaces de absorber y disolver los gases contaminantes y sólidos capaces de adsorber y retener de forma selectiva los contaminantes.

Dentro de los sistemas de depuración de gases para la eliminación de sus contaminantes se pueden distinguir varias técnicas de tratamiento. La mayoría se usan sobre fuentes fijas de emisión antes de que el aire contaminado salga a la atmósfera. Algunas se llevan aplicando durante muchos años por lo que se tiene una amplia documentación a cerca de ellas.

Las tecnologías de depuración del aire contaminado, en general, pueden clasificarse en dos grupos dependiendo de las características de los contaminantes. Por un lado, las de control de contaminantes (sólidos o líquidos) en forma de partículas micrométricas o incluso menores (polvo, smog, humo, aerosoles) y por otro lado, las usadas para contaminantes gaseosos.

Los sistemas para la limpieza de vapores y gases se basan en diferentes principios fisicoquímicos, y se resumen a continuación:

- **Adsorción:** Las moléculas son retenidas en la superficie del adsorbente por fuerzas electroestáticas y se usa principalmente carbón activado.
- **Absorción:** Una de las técnicas más utilizadas. Los gases contaminantes suelen ser mezclas de varios componentes gaseosos, de los cuales, una minoría es soluble en una fase líquida y la mayor parte es un gas portador prácticamente insoluble. El contacto directo del gas con el líquido hace que la transferencia de materia ocurra entre las dos fases (líquido y sólido) debido a los gradientes de concentración de los componentes individuales en cada fase.
- **Lavadores químicos:** Proceso de absorción con una reacción química. Los contaminantes se oxidan con hipoclorito u otros oxidantes que se van consumiendo al reaccionar por lo que hay que ir agregando más continuamente.

- Incineración: se oxidan los contaminantes a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  en quemadores entre 700 y 1000 °C. Normalmente se necesita combustible adicional. Además pueden emitirse compuestos peligrosos como  $\text{NO}_x$ , CO, HCl o COVs.
- Oxidación catalítica: en este caso la oxidación la favorece un catalizador que normalmente incluye óxidos metálicos. Las temperaturas del proceso son entre 300 y 450°C.
- Condensación: se eliminan los contaminantes gaseosos debido al cambio de fase a líquido y su posterior separación en dicha fase de los componentes contaminantes. Este proceso se lleva a cabo generalmente enfriando la corriente de gas.
- Membranas selectivas: el aire contaminado transcurre a través de membranas que seleccionan los compuestos y los absorben o concentran.
- Oxidaciones avanzadas: Estas técnicas usan oxidantes muy efectivos o catalizadores, como el  $\text{TiO}_2$ , que generan que se produzca dicha oxidación de los contaminantes.
- Sistemas biológicos: microorganismos inmovilizados y en suspensión mineralizan los contaminantes ( $\text{CO}_2$ , S,  $\text{NO}_x$ , HCl, etc.).

Como se puede ver, la fotocatalisis se encuentra dentro de los diversos sistemas de depuración de gases, concretamente, es un tipo de proceso de oxidación avanzada. Es decir, una técnica altamente eficaz para eliminar del aire los contaminantes más abundantes o tóxicos.

## **5. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA**

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) son procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios fundamentales en la estructura química de los contaminantes. Estos procesos involucran la generación y uso de especies muy energéticas, principalmente el radical hidroxilo ( $\text{HO}\cdot$ ). Éste puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, y es muy efectivo para la oxidación de contaminantes.

Entre los diferentes POAs encontramos la fotocatalisis heterogénea que hace referencia a una reacción catalítica que involucra la absorción directa o indirecta de energía radiante UV por parte de un fotocatalizador o sustrato. La fotocatalisis es uno de los sistemas con mayor interés, ya que no necesita de la adición de reactivos químicos y puede emplear la radiación ultravioleta del sol.

A continuación se listan las ventajas que tienen estas nuevas tecnologías o procesos de oxidación avanzada sobre los métodos convencionales:

- Transforman químicamente el contaminante
- Se consigue normalmente la mineralización completa del contaminante, o lo que es lo mismo, su destrucción. En cambio, las tecnologías convencionales, al no emplear especies tan fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente el contaminante.
- No suelen generar barros que posteriormente requieren de un tratamiento y/o disposición.
- Muy útiles para tratar contaminantes refractarios que no responden a otros métodos de tratamiento.

- Tratan contaminantes a muy baja concentración (por ejemplo, ppb).
- Disminuyen la concentración de compuestos formados por otros tratamientos alternativos, como puede ser la desinfección.
- A menudo consumen menos energía que otros métodos (que por ejemplo, la incineración).
- Permiten transformar contaminantes refractarios para que no lo sean y que posteriormente puedan ser tratados por métodos más económicos como el tratamiento biológico.

Además de todas estas ventajas, hay que destacar que la eficiencia de estas técnicas viene dada porque los procesos involucrados poseen una velocidad de oxidación muy incrementada por la participación de radicales, principalmente el radical hidroxilo, HO•.

Las propiedades de esta especie hacen que su velocidad de reacción con los contaminantes sea del orden de  $10^6$  -  $10^{12}$  veces más rápido que oxidantes alternativos como el O<sub>3</sub>. Y es que el radical HO• es el oxidante más energético después del flúor.

En muchos de los procesos de Oxidación avanzada, su elevado coste es su principal inconveniente. Y es que el precio de los reactivos utilizados y el elevado consumo eléctrico para la generación del proceso y/o para la utilización de lámparas UV hacen que sean procesos muy poco comercializados.

Sin embargo, las técnicas de fotocatalisis solar, son muy económicas en cuanto a lo que a recursos energéticos se refiere, ya que utilizan la energía solar para iniciar el proceso de degradación de los contaminantes. Por lo que son procesos muy interesantes para su comercialización en climas tan soleados como el que se da en nuestro país, que cuenta con altos índices de radiación solar durante todo el año.

## **6. FOTOCATALISIS HETEROGENEA**

La catálisis es el proceso por el cual se aumenta o disminuye la velocidad de una reacción química y el catalizador es el material que acelera o retarda la reacción química sin participar en ella.

El principio de la fotocatalisis solar se fundamenta en la descontaminación natural que se lleva a cabo en la naturaleza. En este fenómeno, una sustancia llamada fotocatalizador activa una reacción fotoquímica basada en la oxidación que transforma las sustancias orgánicas e inorgánicas nocivas en compuestos inocuos mediante energía solar o artificial, aunque durante el proceso tienen lugar reacciones tanto de oxidación como de reducción.

A través de la fotocatalisis homogénea y heterogénea se hace posible la aplicación de la radiación solar para la realización de los procesos fotoquímicos, y esto se suele llevar a cabo mediante cationes hierro o dióxido de titanio respectivamente.

La fotocatalisis fue descubierta en Japón donde su estudio tiene rango universitario. En Europa, es en Italia donde más se ha desarrollado su aplicación. Por ejemplo las pistas del aeropuerto milanés de Malpensa son tratadas regularmente con baños fotocatalíticos.

En los últimos 30 años (aunque ya se conoce desde los años 50), el llamado proceso de fotocatalisis ha sido muy estudiado debido a su versatilidad en la utilización como proceso de degradación de la mayor parte de los contaminantes que se pueden. Por ello, concretamente la fotocatalisis en fase gas, es una de las técnicas de oxidación avanzada más utilizadas para el tratamiento de aire contaminado de diverso origen.

Nuestro país es uno de los territorios del planeta que mayor partido puede sacar a la fotocatalisis, ya que se necesitan rayos UV, y en España hay mucha radiación solar, para activar el fotocatalizador, por lo que es un proceso atractivo desde punto de vista económico-ambiental.

Se puede decir también, que el fotocatalizador o sustrato convierte la energía solar de una cierta amplitud de onda  $\lambda$  en energía química. El fotocatalizador no se consume en la reacción química por lo que su acción se mantiene de forma permanente en el tiempo.

Por lo tanto, son necesarios tanto la luz como un catalizador para alcanzar o acelerar la reacción química de la fotocatalisis. Por un lado la luz puede reducir la energía de activación de dicha reacción y por el otro el catalizador también acelera la fotorreacción.

Como hemos dicho, la fotocatalisis se puede presentar bajo la influencia de la luz solar y de la luz artificial. Pero ésta última tiene la ventaja de que puede utilizarse con una sola longitud de onda, escogiendo la que excite al fotocatalizador para que comience su trabajo.

Como se ha visto, existen una serie de tecnologías emergentes, las POAs, basadas en degradar eficientemente los compuestos contaminantes. Una de las técnicas de degradación de estos compuestos que ha obtenido gran atención en el ámbito científico debido a su potencial para ser desarrollada en un futuro es la Fotocatalisis Heterogénea.

La fotocatalisis heterogénea se genera a partir de la iluminación con un fotón de un catalizador semiconductor (óxidos o sulfuros). El fotón debe tener una energía  $h\nu$ , igual o superior al valor de la energía de banda prohibida o "bandgap",  $E_g$  (que es la energía mínima necesaria para convertir el material en un conductor) del fotocatalizador para que un electrón de su banda de valencia se promueva hacia la banda de conducción. La energía de banda prohibida es la diferencia energética entre la banda de valencia y la banda de conducción del fotocatalizador.

Este hecho conlleva a la formación de dos portadores de carga: electrones en la banda de conducción, y un electrón vacío positivo en la banda de valencia conocido como "hueco". Es decir, cuando un electrón deja la capa de valencia y se convierte en un electrón libre se crea un "hueco". Este fenómeno se conoce como par electrón-hueco.

Los electrones en estado excitado dentro de la banda de conducción y los huecos dentro de la banda de valencia pueden recombinarse al estado inicial y disipar la energía obtenida en forma de calor. Pero también pueden ser atrapados en los estados superficiales metaestables o reaccionar con las moléculas adsorbidas en la superficie del semiconductor, aceptando y donando electrones.

## 6.1. Componentes necesarios para el proceso de Fotocatálisis

Los componentes necesarios para que la reacción de fotocatálisis se lleve a cabo son un compuesto a degradar, un compuesto oxidante como es el oxígeno que contiene el aire, un medio donde se desarrolla la reacción, en el caso de estudio el propio aire, un fotocatalizador, habitualmente un compuesto semiconductor de banda ancha, y una fuente de luz visible o ultravioleta ya sea natural (procedente del sol) o artificial (procedente de lámparas).

### El fotocatalizador

El fotocatalizador es un material semiconductor en el cual aumenta la conductividad debido a la temperatura y acelera la velocidad de las reacciones de oxidación que se llevan a cabo en su superficie.

Los compuestos fotocatalizadores normalmente son semiconductores de banda ancha, como por ejemplo el  $\text{TiO}_2$ , los cuales producen pares “hueco-electrón” con un extraordinario potencial oxidante, y por lo tanto son capaces de mineralizar y neutralizar contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el aire como pueden ser colorantes y metales como cadmio, níquel, mercurio, cobre, cromo, entre otros.

El material semiconductor debe cumplir una serie de requisitos para que sea un fotocatalizador eficaz:

- Inercia química y estabilidad molecular en contacto con el agua, es decir resistencia a la fotocorrosión e insolubilidad.
- Potencial redox de la banda de conducción lo suficientemente positivo como para oxidar los hidroxilos y en el caso de la banda de valencia, lo suficientemente negativo como para reducir el oxígeno o la especie que se desee reducir. Ver figura X.
- Ancho de banda que permita que sea activado mediante luz solar (UV o radiación visible).
- Baja toxicidad puesto que lo que se pretende es reducir los compuestos contaminantes.
- Disponibilidad a coste reducido.

Para comprobar la actividad fotocatalítica de algunos compuestos se han realizado diversos ensayos y la mayoría son poco eficientes o poco estables. Se ha concluido que los que mejores resultados dan son óxidos metálicos o calcogenuros metálicos semiconductores de banda ancha y en concreto el  $\text{TiO}_2$  según los criterios mencionados anteriormente. Por ello, es con diferencia el fotocatalizador más utilizado, y aunque cuenta con limitaciones, todavía no se ha hallado ninguna alternativa mejor.

A continuación se puede ver un diagrama del potencial redox de distintos semiconductores ensayados para comprobar su actividad fotocatalítica y se indica también el ancho de banda de cada uno.

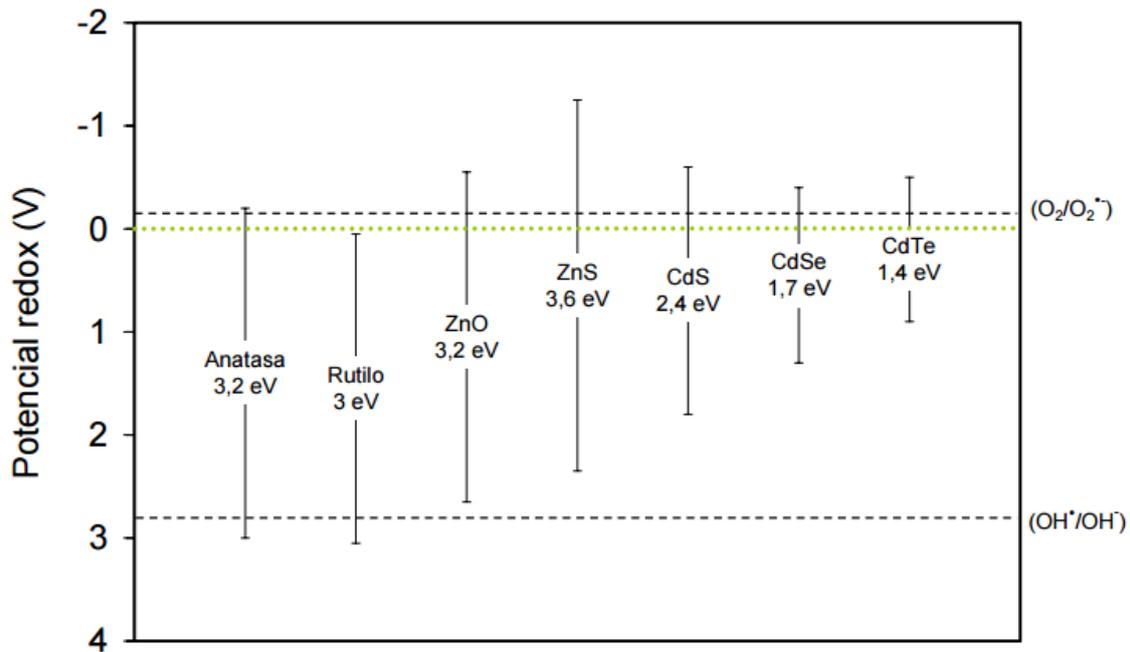


Figura 2. (Raquel Portela, 2008) Potencial redox de algunos semiconductores y su ancho de banda.

En la Figura 2 podemos ver que los semiconductores más usuales para la fotocatalisis heterogénea presentan bandas de valencia con potencial oxidante (+1 a +3,5 V) y bandas de conducción moderadamente reductoras (+0,5 a -1,5 V).

También se observa que los dos compuestos que tienen un mejor potencial redox y que se ajustan mejor a los pares redox ( $O_2/O_2^{\bullet-}$ ) y ( $OH^{\bullet}/OH^-$ ) tanto en la banda de conducción como de valencia son la Anatasa y el Rutilo, las dos formas alotrópicas naturales de  $TiO_2$ .

Se puede observar que sobre todo, en lo que respecta a la Anatasa, su banda de conducción es lo suficientemente positiva como para oxidar los hidroxilos y su banda de valencia, lo suficientemente negativa como para reducir el oxígeno o la especie que se desee reducir.

### Oxidante

Lo más común es que el oxígeno sea el elemento que oxide al fotocatalizador y reciba sus electrones, aunque también existen cationes metálicos que pueden ejercer ese papel.

En fase gaseosa sobre todo, es muy sencillo aportar oxígeno, ya que se encuentra en abundancia en el aire.

En ocasiones se realiza la adición de oxidantes más fuertes como el  $O_3$  ya que favorecen la captura de electrones y aumentan la eficacia del proceso, a costa de aumentar también su complejidad y coste.

El requisito indispensable para un buen aceptor de electrones en el proceso de fotocatalisis heterogénea es que contribuya a la formación de radical hidroxilo u otros compuestos oxidantes y no cree subproductos que obstaculicen las reacciones.

### Suministrador de electrones

Los compuestos que proveen electrones al proceso suelen ser del grupo OH y reaccionan para formar el radical hidroxilo que posteriormente favorece la oxidación de especies adsorbidas. Aunque cabe mencionar que se ha comprobado que, en fase gaseosa donde no existe saturación de agua, existen otras moléculas adsorbidas que actúan como dadores de electrones oxidándose directamente.

### Luz ultravioleta

La fotocatalisis se puede presentar bajo la influencia de la luz solar y también con luz artificial. Ésta última tiene la ventaja de que puede utilizarse con una sola longitud de onda UV, escogiendo la que excite al semiconductor para que comience su trabajo.

Hemos visto anteriormente que existen muchos materiales que pueden actuar como fotocatalizadores:  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdS}$ , óxidos de hierro,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{ZnS}$ , etc. Éstos son excitados al absorber parte de la radiación del espectro solar que incide sobre la superficie terrestre con longitud de onda mayor a 310 (nm) o luz artificial con análoga longitud de onda.

Por lo tanto, son necesarios tanto la luz como un catalizador para alcanzar o acelerar la reacción química de la fotocatalisis. Por un lado la luz puede reducir la energía de activación de dicha reacción y por el otro el catalizador también acelera la fotorreacción.

## 6.2. Fotocatalisis heterogénea con $\text{TiO}_2$

El Dióxido de titanio es un mineral natural también conocido como titania o  $\text{TiO}_2$ . Este elemento es de gran importancia y muy utilizado en muchos sectores por sus propiedades de dispersión, su estabilidad biológica y química, su no toxicidad, su coste reducido y por ser apto para trabajar en un amplio rango de PH. De hecho, es el pigmento inorgánico más importante en términos de producción mundial. Además también es utilizado como bloqueador solar, en cosmética, como relleno en comprimidos vitamínicos, etc.

El  $\text{TiO}_2$  Se presenta en tres formas cristalinas: anatasa (estructura octaédrica), rutilo (estructura tetragonal) y broquita (estructura ortorrómbica), siendo las dos primeras las más comunes y la anatasa la más abierta y más efectiva en el proceso de fotocatalisis para el tratamiento de aire contaminado.

Por otro lado, el rutilo es la estructura más común y densa, la cual refleja muy bien la luz y se utiliza como pigmento; y la broquita es extremadamente rara e inestable, por lo que no se utiliza comercialmente.

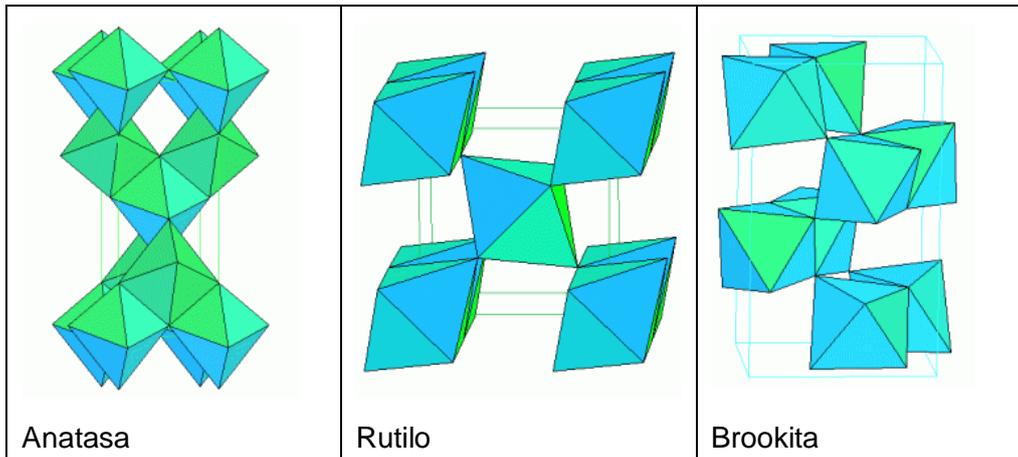


Figura 3. Representación de las tres formas de estructuras cristalinas del  $\text{TiO}_2$

La distancia energética entre bandas es de aproximadamente 3.2 eV para la Anatasa y de 3.0 eV para el rutilo. La Anatasa es termodinámicamente menos estable que el rutilo, pero su formación se ve cinéticamente favorecida a temperaturas más bajas.

Para describir el proceso químico a grandes rasgos, se puede decir que El  $\text{TiO}_2$  es excitado por la luz ultravioleta provocando la generación de radicales libres, hidroxilo y superóxido, los cuales provienen de la hidrólisis del agua y del oxígeno del aire. Éstos generan los procesos avanzados de oxidación y reducción de los contaminantes.

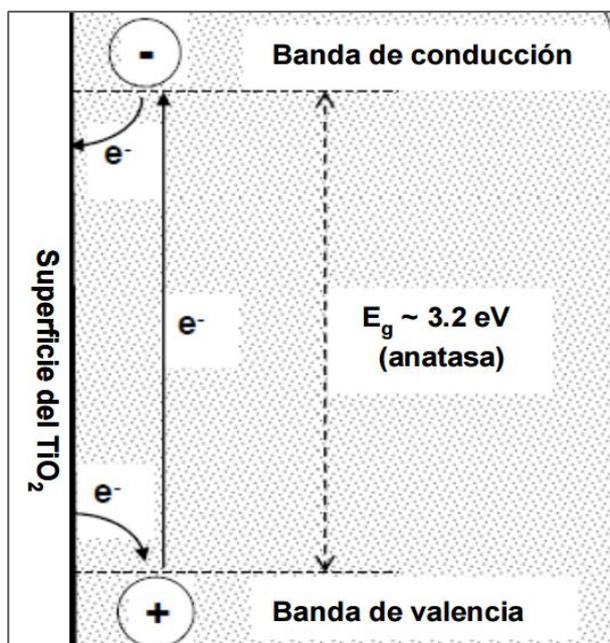


Figura 4. Diferencia energética entre bandas del  $\text{TiO}_2$

La diferencia energética entre la banda de conducción y la banda de valencia (banda prohibida) en el caso del  $\text{TiO}_2$  (concretamente de su forma de Anatasa) es de 3,2 eV. Si un fotón con una energía superior a ésta, lo que equivale a longitudes de onda menores a 388nm, entra en contacto directo con el  $\text{TiO}_2$ , un electrón ( $e^-$ ) de la banda de valencia se mueve hacia la banda de conducción, dejando así un hueco electrónico ( $h^+$ ).

El par foto-excitado hueco-electrón se propaga hacia la superficie del  $\text{TiO}_2$ , donde participa en reacciones químicas con moléculas de oxígeno y agua presentes en el medio ambiente.

Los huecos electrónicos ( $h^+$ ) pueden reaccionar con moléculas donantes adsorbidas como las de agua para producir los radicales hidroxilos (altamente reactivos).

Por otro lado, el oxígeno presente en el aire puede actuar como receptor de electrones reaccionando con estos para formar los aniones radicales superoxidantes ( $\text{O}_2^-$ ).

Los aniones radicales superoxidantes (reductores) y los radicales hidroxilos (oxidantes) generados sobre la superficie del  $\text{TiO}_2$  poseen una gran capacidad para degradar diversos tipos de microorganismos, casi todos los tipos de contaminantes orgánicos y otros compuestos inorgánicos tales como  $\text{NO}_x$  y el  $\text{SO}_2$ .

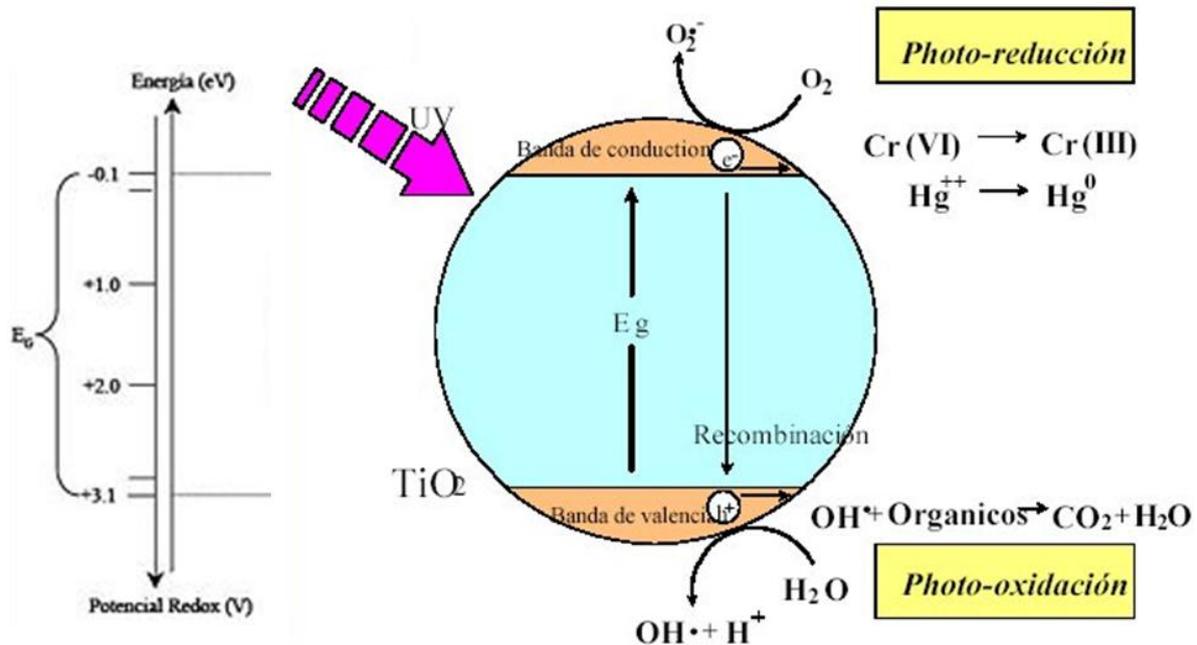


Figura 5. Proceso de destoxificación solar por vía fotocatalítica. Representación de una partícula del catalizador

Existen una serie de ventajas de la aplicación de la tecnología de la fotocatalisis heterogénea con el compuesto fotocatalizador  $\text{TiO}_2$  en concreto y se listan a continuación:

- El proceso se lleva a cabo a temperatura ambiental y presión atmosférica por lo que lo hace más simple y reduce sus costes energéticos.
- Al tener un alto poder oxidativo y una escasa o nula selectividad el proceso es capaz de destruir multitud de sustancias e incluso mezclas muy complejas. En este sentido, el proceso es capaz de tratar compuestos difícil o peligrosamente tratables mediante otros métodos como pueden ser dioxinas, disolventes, pesticidas, colorantes, entre otros.
- Las sustancias contaminantes se eliminan directamente del medio en el que se encuentran disueltas sin necesidad de ser extraídas previamente.
- La reacción fotocatalítica funciona también cuando se desean tratar metales pesados, siendo posible reducir metales como el cromo, el mercurio, etc, a un estado en el cual su toxicidad se ve reducida sustancialmente.
- El contaminante no es que cambie de fase, sino que se destruye hasta compuestos totalmente inocuos, generalmente mineralizándolo por completo sin dejar otros subproductos o residuos. Por ejemplo, en el caso de sustancias orgánicas, los subproductos obtenidos son agua,  $\text{CO}_2$ , y ácidos simples inorgánicos.
- Puede ejercer simultáneamente la descontaminación, desinfección y autolimpieza.
- La activación, al ser fotónica puede llevarse a cabo mediante radiación solar o lámparas de baja potencia lo que hace mínimo el consumo energético. En el caso de que se utilice tan solo radiación solar en el proceso, el impacto ambiental de esta tecnología se reduce un 90% según el análisis del ciclo de vida.

- Es una técnica que se adapta fácilmente a condiciones externas variables, siempre y cuando estén dentro de un determinado rango aceptable.
- Los únicos compuestos químicos que se requieren para el proceso son el  $\text{TiO}_2$  y un oxidante como puede ser el  $\text{O}_2$  del aire por lo que los costes de operación y de seguridad se ven reducidos en comparación a otros métodos más complejos.
- El  $\text{TiO}_2$  tiene una gran estabilidad química y es económico ( $\approx 2 \text{ €/Kg}$ ) y abundante.
- Es una técnica que se puede combinar con otros tratamientos.

Cabe destacar por el contrario, que también presenta algunos inconvenientes:

- Lentitud del proceso de degradación global.
- Posibilidad de formación de productos parcialmente oxidados.
- Posibilidad de desactivación del fotocatalizador
- Ciclos diurnos y anuales si existe dependencia con la radiación solar.
- Por la multitud de factores que intervienen se dificulta el análisis del proceso y la comparación de resultados obtenidos en los diversos estudios. Se debe estudiar particularmente cada caso.

La eficiencia global de la fotocatalisis en aplicaciones constructivas depende tanto de factores medioambientales, como de factores intrínsecos del propio material, en el caso de asociarse el fotocatalizador a un soporte de base cementicia. Por lo tanto, existe una cantidad significativa de parámetros que influyen tanto cualitativa como cuantitativamente en el proceso de oxidación-reducción del proceso. A continuación se mencionan algunos de los factores clave externos más importantes que influyen en el proceso de óxido-reducción fotocatalítica:

**a) La longitud de onda de la radiación ( $\lambda$ ):** El rango de fotoactivación del  $\text{TiO}_2$  se encuentra dentro del intervalo de longitud de onda correspondiente a la radiación ultravioleta ( $\lambda \leq 400 \text{ nm}$ ). Concretamente, para que el  $\text{TiO}_2$  (en su fase Anatasa) pueda absorber la radiación,  $\lambda$  debe ser menor a 388 nm. Por lo tanto el  $\text{TiO}_2$  es capaz de generar pares electrón-hueco al incidirle radiación que cumpla con dicho requisito. Para ello son útiles tanto las lámparas con luz artificial ultravioleta como la luz proveniente de la radiación solar, cuya longitud de onda menor es de 300 nm como se aprecia en el gráfico 2.

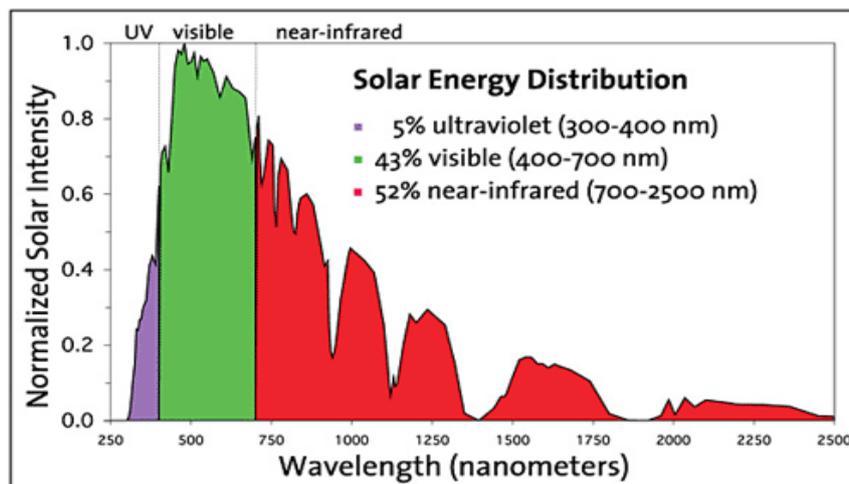


Gráfico 2. Distribución espectral de la radiación solar

Los fotones son absorbidos por las moléculas del semiconductor  $\text{TiO}_2$  con más fuerza cuanto menor es la longitud de onda. Si se emplean longitudes de onda más cortas (UVC), disminuyen las posibilidades para que ocurra la recombinación de los pares electrón-hueco antes de que se produzca en la superficie de la partícula de  $\text{TiO}_2$  las reacciones con las especies químicas presentes en el aire.

Resumiendo, la energía absorbida por las partículas de  $\text{TiO}_2$  se aprovecha más en el proceso fotocatalítico cuanto menor es la longitud de onda de la radiación.

El aprovechamiento de la luz UV procedente de la luz solar supone un considerable ahorro energético (Prieto-Rodríguez, Miralles-Cuevas et al. 2012). Por lo que, con el fin de aprovechar la radiación solar para un sistema más ecoeficiente se han realizado múltiples estudios intentando aumentar la eficacia de los catalizadores bajo la radiación visible, donde la intensidad de la luz es mayor, y por tanto mejora la cinética de la fotoreacción. En algunos casos se han usado óxidos semiconductores alternativos (óxidos de estaño, de zinc, de tungsteno etc.), dopaje del óxido de titanio con metales (tungsteno, hierro, etc.), dopaje con no metales (carbón, nitrógeno, azufre...) o mezclas de estas soluciones. Pero a pesar de ello, hasta ahora la mayoría de estos esfuerzos no han culminado en materiales que mejoren los resultados ya conseguidos por el  $\text{TiO}_2$ .

**b) El área disponible del catalizador:** Aumentar la cantidad de material catalizador no hace que haya una mayor eficiencia en la reacción. Lo que realmente es determinante es el área de la superficie de material catalizador que se encuentra directamente en contacto con los gases reactivos (área superficial de catalizador por unidad de volumen del reactor).

**c) La presencia suficiente de oxidante:** como hemos dicho, el oxígeno es el oxidante más común porque se encuentra en el aire y no encarece el coste del proceso. Así pues, la presencia en abundancia de oxígeno es un factor determinante para que los procesos de oxidación se lleven a cabo eficazmente.

Como es conocido, durante la fotocatálisis, el oxígeno es adsorbido y reducido sobre la superficie del  $\text{TiO}_2$ . El oxígeno se reduce por la fotoactivación del electrón cuando éste se encuentra en la banda de conducción. Por lo que al convertirse en una especie reducida y evitar la recombinación de los pares  $e^-/h^+$ , pasa a formar parte importante en la fotomineralización.

Estudios demuestran que si aumenta el nivel de  $\text{O}_2$  disuelto en la superficie también lo hace la velocidad de formación del radical hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ). Por lo tanto se puede decir que el papel que tiene el oxígeno no se basa simplemente en atrapar electrones. En el caso del uso del  $\text{TiO}_2$  como fotocatalizador, se espera una dependencia directa de la velocidad de mineralización de los compuestos contaminantes con respecto a la presencia de oxígeno (respecto a esto, el autor Wang et al. establece una dependencia del oxígeno y la formación de los hidroxilos).

**d) La intensidad de la radiación incidente:** La velocidad de la reacción fotocatalítica ( $r$ ) es directamente proporcional a la intensidad de irradiación incidente de luz en el fotocatalizador. Es decir, si aumenta, esta última, lo hace la primera. Lo que era de esperar, debido a que la activación del proceso catalítico es de naturaleza foto inducida.

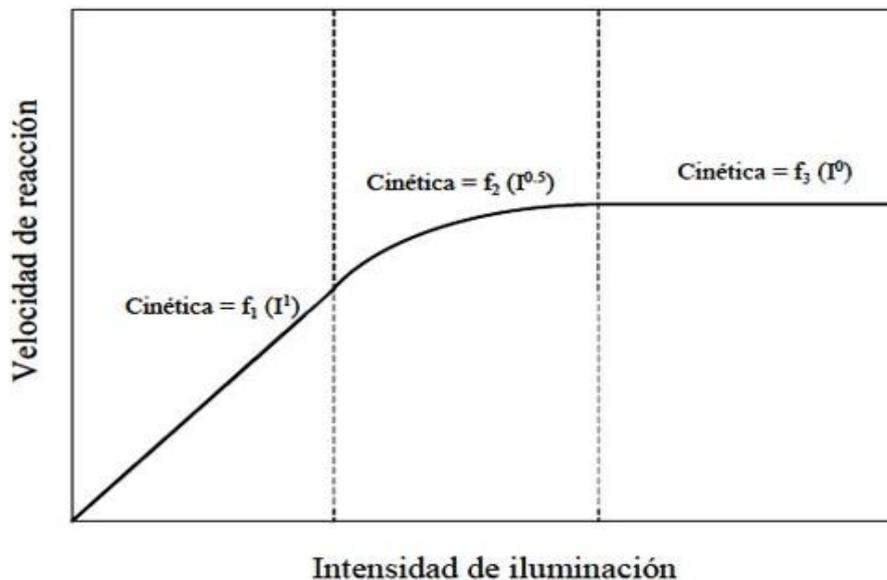


Gráfico 3. Dependencia de la velocidad de reacción con la intensidad de iluminación

En el gráfico 3 se puede ver como la intensidad de la radiación influye directamente en la velocidad de la reacción fotocatalítica. Las investigaciones apuntan a que inicialmente, la velocidad de reacción depende de la intensidad de forma lineal, como se ve en el tramo de pendiente constante.

Posteriormente se vuelve parabólica ya que la velocidad pasa a ser función de la raíz cuadrada de la Intensidad. Este cambio se debe a la limitación de moléculas captadoras de electrones lo que lleva a una recombinación de éstos limitando el aprovechamiento de los fotones.

Finalmente, en el último tramo, la velocidad deja de aumentar por mucho que aumente la intensidad ya que el sustrato a degradar o moléculas de productos intermedios, ya no pueden generar más pares e-h porque la superficie del catalizador ya está saturada.

Las diferentes transiciones no se llevan a cabo a una intensidad determinada ya que las condiciones externas influyen significativamente. Aunque la forma que obtienen los gráficos es siempre parecida al gráfico 3.

**e) La calidad del aire:** La presencia de partículas en suspensión, cenizas y materia orgánica e inorgánica en el aire pueden disminuir la eficiencia de la oxidación fotocatalítica con  $\text{TiO}_2$ .

La abundancia de partículas interfiere en la interacción de la luz ultravioleta y el catalizador, reduciendo la eficacia del proceso de fotorreacción y por tanto la descontaminación del aire.

**f) La concentración inicial del sustrato o contaminante:** En el proceso de fotocatalisis de un contaminante, la cantidad de moléculas adsorbidas de este en la superficie del catalizador tiende a disminuir con el paso del tiempo. La velocidad de reacción viene dada por la ley de Langmuir-Hinshelwood (L-H) representada en gráfico 4.

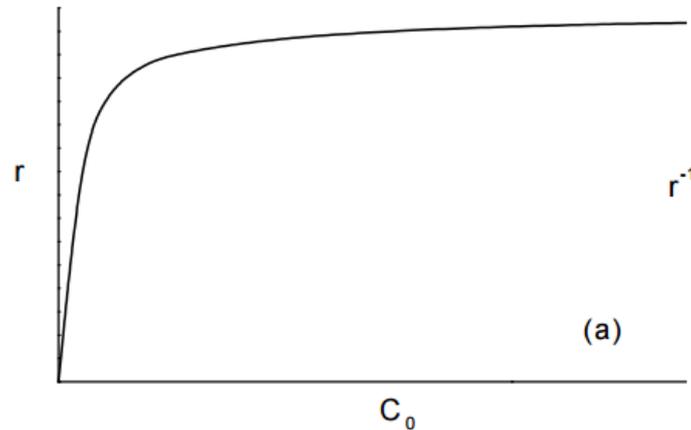


Gráfico 4. Cinética de Langmuir-Hinshelwood. Velocidad de reacción en función de la concentración inicial.

**g) Humedad relativa:** El efecto que ocasiona la presencia de agua en el aire durante la degradación fotocatalítica es un tema que ha sido debatido por numerosos investigadores.

Tal y como ocurre con el oxígeno, la presencia en la superficie del catalizador de grupos OH es esencial para que se puedan llevar a cabo las reacciones fotocatalíticas. Una cantidad abundante de agua en el aire a tratar aumenta la formación de los radicales OH·, lo que reduce la recombinación del par electrón - hueco y, favorece las reacciones de oxidación y la mineralización de contaminantes.

**h) La temperatura:** la activación del fotocatalizador depende de los fotones y no de la temperatura, ya que la energía térmica no es la que excita a los electrones del catalizador. A pesar de esto, a temperaturas muy bajas (<0°C) y muy altas (>70°C) la actividad del proceso fotocatalítico disminuye en diversas reacciones fotocatalíticas.

Dentro de este rango de temperaturas la adsorción de los productos finales de reacción. Por lo contrario, a temperaturas superiores a 80°C, la adsorción de los reactivos disminuye, siendo este un factor limitante en la actividad del fotocatalizador.

## **7. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN FOTOCATALÍTICOS**

La aplicación de nanopartículas fotocatalíticas de TiO<sub>2</sub> en materiales de construcción comenzó a finales de la década de los 80. Desde entonces, se han investigado principalmente dos efectos derivados de la actividad fotocatalítica de recubrimientos basados en TiO<sub>2</sub>, por una parte el efecto de descontaminación del aire que producen los gases efecto invernadero, y por otra el efecto de auto-limpieza.

Aunque además de estos, también se han demostrado paralelamente otras propiedades como pueden ser antivirica y antibacteriana, anti hongos, desodorizante o anti polvo las cuales se describen a continuación:

### a) Descontaminación

La fotocatalisis como proceso de purificación del aire actualmente se encuentra en plena expansión, ya que las velocidades son bastante más rápidas y el proceso químico mucho más eficaz que en el tratamiento de aguas.

Aun así, se pueden encontrar algunas limitaciones propias del proceso llevado a cabo en fase gaseosa, como por ejemplo la dificultad de almacenaje del aire a tratar y una mayor probabilidad de desactivación del sistema por acumulación de subproductos e impurezas en la superficie del fotocatalizador.

La oxidación de contaminantes presentes en el aire mediante fotocatalisis comenzó a estudiarse con el fin de descontaminar, purificar y desodorizar ambientes cerrados (aviones, naves espaciales, oficinas, etc.) y para descontaminar corrientes de aire con COV que procedían de aguas contaminadas con las que habían estado en contacto.

Actualmente, una de las aplicaciones más interesantes que existen sobre la fotocatalisis para el tratamiento de gases es la posibilidad de eliminación de la mayor parte de los contaminantes presentes en las zonas urbanas como pueden ser: NO<sub>x</sub> (Óxidos de Nitrógeno), SO<sub>x</sub> (Óxidos de Azufre), COVs (compuestos orgánicos volátiles), CO (Monóxido de Carbono), metil mercaptano, formaldehído, compuestos orgánicos clorados y compuestos poli aromáticos.

### b) Autolimpieza

Actualmente existen materiales autolimpiantes basados en TiO<sub>2</sub> aplicado a diversos materiales de construcción como puede ser el cemento, la cerámica, el asfalto, etc. Estos materiales se pueden aplicar tanto en interiores (paredes, mobiliario, equipos electrónicos, etc.) como en exteriores (infraestructuras, fachadas, invernaderos, mobiliario urbano, etc.)



Figura 6. Autolimpieza de fachada tras aplicar un producto a base de nanopartículas de TiO<sub>2</sub>

En la figura 6 se puede ver el resultado de autolimpieza de una zona determinada de una fachada formada por bloques de mortero tras recubrir únicamente esta zona de su superficie con un producto a base de nanopartículas de TiO<sub>2</sub>.

También se da la aplicación en materiales transparentes como vidrio y plásticos a los que también les confiere la propiedad antiniebla (espejos, escaparates, ventanas, etc.). Esto tiene lugar gracias a dos tipos de mecanismos fotoinducidos que la película de  $\text{TiO}_2$  le otorga al material donde se dispone, la hidrofiliidad fotoinducida y la oxidación fotocatalítica, ambas consecuencia de la fotogeneración de pares electrón-hueco.

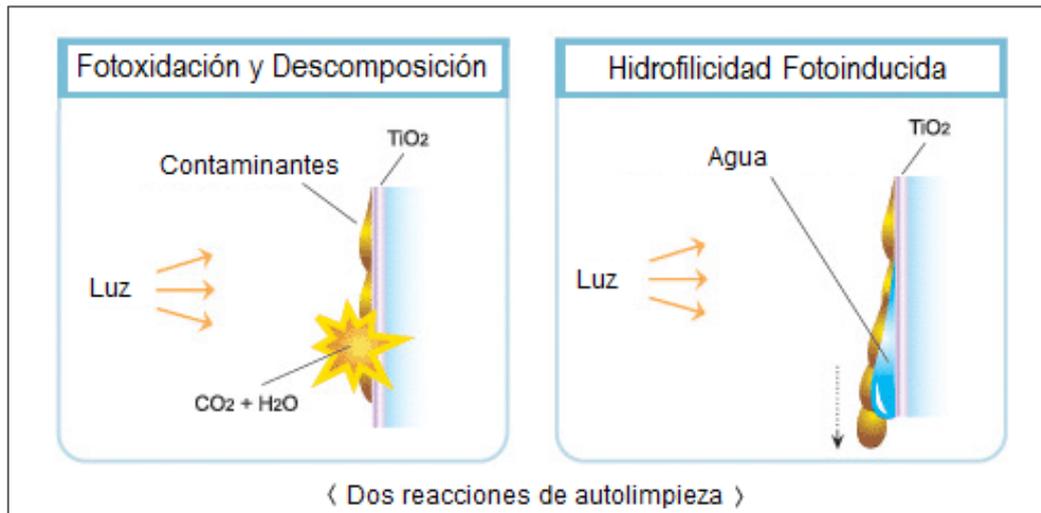


Figura 7. Mecanismos fotoinducidos que otorgan la propiedad de autolimpieza al  $\text{TiO}_2$

El proceso de fotocatalisis que se lleva a cabo en una superficie donde se aplica  $\text{TiO}_2$  influye en su propia limpieza, ya que reduce la capacidad de adherencia de partículas extrañas, polvo o impurezas y descompone también las grasas que actúan como adhesivo de las impurezas. Por lo tanto la estética de una superficie revestida con dicho material es mucho más duradera que la de un producto convencional.

La hidrofiliidad es la afinidad que tiene la superficie de  $\text{TiO}_2$  con el agua, que tiende a acercarse y a mantener el contacto con ella. Cuando la superficie de la película fotocatalítica de  $\text{TiO}_2$  se expone a la luz UV, el ángulo de contacto del agua con la superficie se reduce, con lo cual, la superficie se convierte en hidrófila.

Bajo una irradiación mínima, el  $\text{TiO}_2$  muestra una excelente capacidad hidrófila. El ángulo de contacto de la superficie con el agua se reduce a  $10^\circ$  lo cual ofrece las siguientes ventajas:

- La superficie no repele el agua, por lo que forma una lámina fina en la superficie imposibilitando la formación de gotas. Esto evita las manchas por las marcas de cal o suciedad.
- Su naturaleza hidrófila junto a la presión atmosférica impiden la adherencia de polvo y partículas a la superficie por lo que se eliminan simplemente con agua. Esto ofrece dos beneficios, fácil limpieza y auto limpieza con la lluvia.

Por otro lado, en 1995, se descubrió accidentalmente que los recubrimientos de  $\text{TiO}_2$  con un cierto porcentaje de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) desarrollaban un comportamiento con mayor hidrofiliidad que sin la adición.

Habitualmente, cuando no hay exposición del elemento a la luz UV y además el  $\text{TiO}_2$  es utilizado sin sílice, el comportamiento hidrófilico cesa. Sin embargo, cuando se combina el  $\text{TiO}_2$  con sílice, el efecto hidrófilico se mantiene por un largo periodo, incluso en la oscuridad.

### c) Tratamiento del agua

Actualmente el tratamiento y/o purificación de agua mediante fotocátalisis heterogénea es un tema de mucho interés que está siendo desarrollado y ampliado científicamente a nivel internacional. Esto es debido a varias razones, por un lado, este tratamiento fotoquímico no es selectivo ya que se emplea para tratar un amplio rango de contaminantes, y por otro lado, al poder utilizarse radiación solar como fuente de energía primaria posee un alto valor ambiental, por lo que supone un proceso tecnológico sostenible.

La fotocátalisis en el medio acuoso es un proceso natural que se lleva a cabo de manera análoga al que se da en el aire. Por lo que intervienen también los dos elementos esenciales: luz y un fotocatalizador, nanopartículas de dióxido de titanio por lo general. Mediante este método se eliminan los contaminantes emergentes, pesticidas, además de toda clase de microorganismos propios del medio acuático, como el moho o las algas, manteniendo el agua pura y cristalina durante un largo periodo de tiempo.

### d) Efecto antibacteriano y antivírico

El  $\text{TiO}_2$  es uno de los nuevos materiales para la esterilización. La fotocátalisis con este compuesto puede eliminar casi todas las clases de bacterias bajo irradiación de la luz. De hecho, elimina el 99% de las diferentes clases de bacterias y virus conocidos, incluyendo algunas variantes como la gripe aviar o la gripe A.

La desinfección fotocatalítica con  $\text{TiO}_2$  es 3 veces más fuerte y efectiva que el cloro y 1,5 veces más que el Ozono 14. Por lo que, gracias a esta propiedad, las superficies de  $\text{TiO}_2$  han sido ampliamente utilizadas en lugares de alta exigencia de esterilización como hospitales, instituciones, escuelas etc.

Debido a la complejidad de los microorganismos, se desconoce aún el mecanismo completo de inactivación que ejerce la fotocátalisis sobre ellos. Lo que sí está aceptado es que el ataque prolongado de las especies reactivas del oxígeno ocasiona el daño de la pared celular, posteriormente de la membrana citoplasmática y finaliza con el ataque directo de los componentes intracelulares (Figura 8).

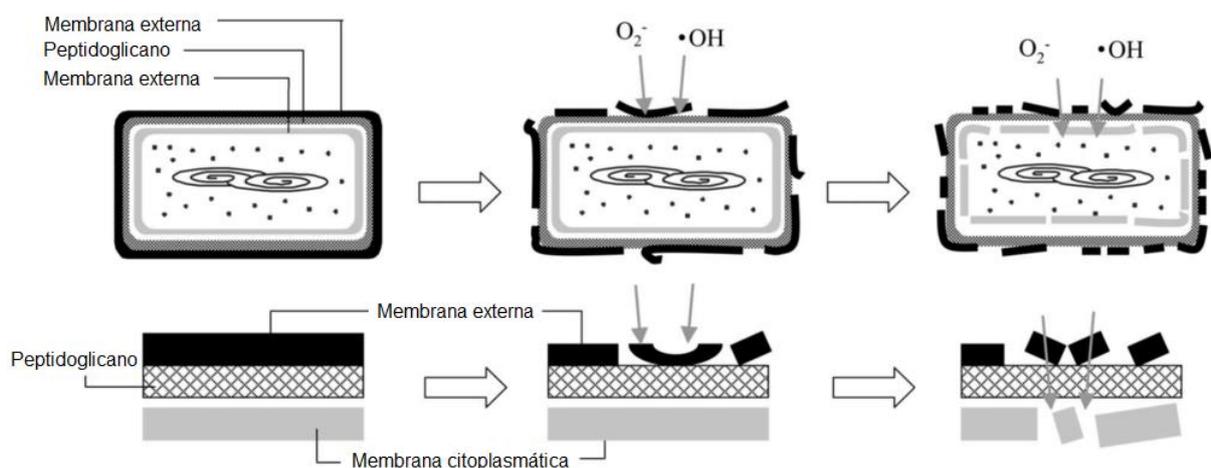


Figura 8. Esquema del proceso de inactivación del E.coli por la fotoactivación de  $\text{TiO}_2$   
(Reproducido de Sunada, K.; Watanabe, T.; Hashimoto, K. Studies on photokilling of bacteria on  $\text{TiO}_2$  thin film.)

Con lo cual, la "fuerza" de las capas externas del organismo dicta la capacidad del organismo para sobrevivir. En este caso, el espesor y la estructura que rodean los protozoos y las esporas bacterianas los hacen un objetivo más difícil de erradicar que los virus, hongos y bacterias (en ese orden).

Por lo tanto, el  $\text{TiO}_2$  en sí no tiene ninguna toxicidad sobre el microbio o las células. La función de la esterilización es activada únicamente tras la irradiación de la luz UV y es entonces cuando la energía oxidante del  $\text{TiO}_2$  reacciona con la célula bacteriana de tal manera que inicialmente inhibe su actividad y da lugar en última instancia a su muerte y descomposición.

Al inicio, el  $\text{TiO}_2$ , por sus propiedades antibacterianas, fue utilizado en sistemas de purificación de aire y agua. Posteriormente, se desarrollaron baldosas cerámicas con recubrimientos de  $\text{TiO}_2$  con el fin de otorgarles propiedades antisépticas para su uso en hospitales, escuelas, cocinas y duchas. Actualmente, al  $\text{TiO}_2$  se le añaden metales como Cu y Ag al  $\text{TiO}_2$ , ya que se incrementan sus propiedades antibacterianas.

#### e) Otros efectos mediante fotocatálisis con $\text{TiO}_2$

- **Efecto anti-hongos:** El  $\text{TiO}_2$  previene la aparición de hongos, moho y frena el crecimiento de algas, manteniendo la superficie limpia, incluso estando cubierta de agua. Por ejemplo, es un preventivo óptimo de las algas en piscinas o spa's.

- **Efecto desodorizante:** Los recubrimientos con  $\text{TiO}_2$  descomponen con eficacia los materiales y los gases que producen olor y además ofrecen resistencia a la adherencia de partículas o sustancias orgánicas sobre las su superficie.

El proceso de fotocatálisis con  $\text{TiO}_2$  es muy efectivo para la desodorización de cualquier ambiente ya que es eficaz frente la mayoría de olores, por ello el sistema puede ser ampliamente utilizado en la vivienda y en la industria para eliminar diferentes clases de olor. Los Nano recubrimientos de  $\text{TiO}_2$  se pueden aplicar en diversos ambientes, superficies y hasta en materiales textiles.

- **Efecto anti-polvo. Capacidad antiestática:** Las superficies recubiertas con una capa fotocatalítica de  $\text{TiO}_2$ , al reaccionar con la luz, se cargan negativamente. El polvo fino tiene también carga negativa, lo que hace que se repelan mutuamente y se mantengan las superficies de  $\text{TiO}_2$  limpias y sin acumulación de polvo.

El efecto antiestático evita la absorción de partículas en suspensión de polvo, ceniza, polvo de carbón, etc. Esta característica es óptima para su utilización en superficies de espacios altamente cargados a nivel electromagnético.

- **Reductor del "Efecto Albedo":** Los materiales fotocatalizadores disminuyen el llamado "Efecto Albedo", sobre todo cuando se trata de pavimentos bituminosos, ya que cuando se aplica el producto fotocatalizador sobre dicho soporte, se aclara su tonalidad, disminuyendo así la capacidad de su calentamiento y por ende de los núcleos urbanos.

Por lo tanto, como ya hemos visto anteriormente, para reducir la contaminación del aire urbano, las ciudades pueden optar tanto por medidas pasivas, orientadas a no incrementar los niveles de contaminación existentes y monitorizados, como por medidas activas, dirigidas a reducir la contaminación una vez ya producida. Y la utilización de productos

fotocatalíticos es una de las pocas medidas activas que consigue paliar los daños originados por estos contaminantes reduciendo su concentración ambiental.

Se pueden encontrar múltiples contribuciones en las cuales se analiza el efecto que tienen sobre el rendimiento fotocatalítico en laboratorio variables como: caudal de aire contaminado, concentración inicial de contaminante, humedad relativa, intensidad de radiación, longitud de onda de la radiación, concentración de catalizador en el material de construcción, tamaño de partícula, fase cristalina,... (Ballari y col. 2010).

Efectivamente, se ha visto que existen múltiples parámetros que tienen efecto sobre el rendimiento fotocatalítico, aunque estos parámetros han sido estudiados en laboratorio. El rendimiento de esta técnica en aplicaciones urbanas, sin embargo, puede verse afectado por factores medioambientales como la intensidad de la radiación solar, la humedad relativa, la temperatura, el viento y como no, también por factores intrínsecos del material fotocatalizador. Por ejemplo, en el caso de estar añadido en un soporte de base cementicia, la actividad fotocatalítica será dependiente de la porosidad, tipo y tamaño de los agregados, método de aplicación, cantidad aplicada y envejecimiento (Shen y col. 2012).

Los procesos fotocatalíticos llevados a cabo con  $\text{TiO}_2$  fueron descubiertos en 1972 y desde entonces este tema ha suscitado gran interés. Sin embargo, no ha sido hasta esta última década cuando se ha producido la comercialización de materiales de construcción con propiedades de oxidación fotocatalítica.

El desarrollo de productos basados en fotocatalizadores ha sido constante en una amplia variedad de campos. La comercialización de dichos productos se inició alrededor de 1997 en Japón, y en la última década el mercado también se ha expandido en el resto del mundo. Hoy en día, se observa como los materiales fotocatalíticos son aplicados con bastante frecuencia para tratamientos de autolimpieza, anti-vaho y anti-reflejos sobre cristal.

Pero cabe destacar que las tecnologías fotocatalíticas pueden resultar también muy útiles para la degradación de contaminantes en ambientes de interior, ya que las personas del mundo industrializado pasan prolongados tiempos en ambientes cerrados (oficinas, industrias, comercios, viviendas, etc.).

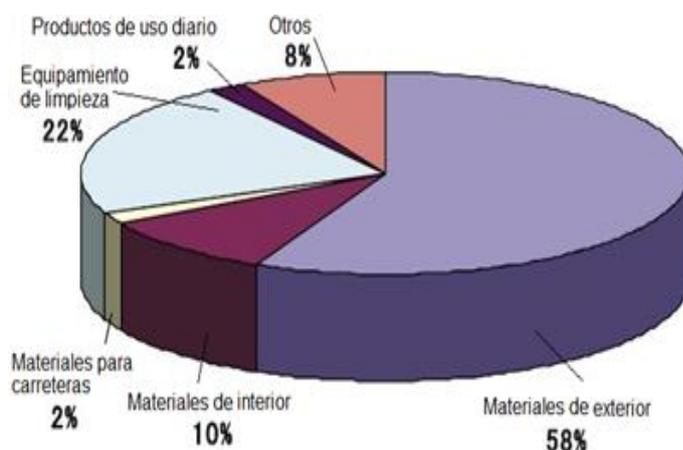


Gráfico 5. Mercado de productos fotocatalíticos.  
(Photocatalysis Industry Association of Japan 2008)

El gráfico 5 muestra el mercado de productos o materiales fotocatalíticos del año 2008 según su aplicación. Como puede verse, los materiales de construcción exteriores constituyen más de la mitad del mercado de materiales fotocatalizadores. Estos incluyen productos de auto-limpieza, tales como azulejos, vidrios de ventana, tejidos de exterior, pinturas, materiales de construcción diversos y vallas publicitarias.

Hasta ahora, el  $\text{TiO}_2$  en forma de anatasa polimorfo ha sido el fotocatalizador semiconductor más estudiado para aplicaciones en construcción por la cantidad de ventajas ya mencionadas anteriormente. Los estudios realizados hasta el momento muestran, como cabe esperar, que los materiales de construcción que contienen  $\text{TiO}_2$ , al ser expuestos a la radiación solar, pueden oxidar eficazmente los contaminantes adsorbidos sobre su superficie (óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, COVs, formaldehído, emisiones industriales, etc).

Con concentraciones muy bajas de  $\text{TiO}_2$  las reacciones de oxidación ya consiguen ser eficientes, de hecho, basta con un recubrimiento del orden de 600 nm - 1  $\mu\text{m}$  para que la actividad fotocatalítica ya sea elevada.

Pues bien, las ventajas de la fotocatálisis y el beneficio común de extrapolarlas a materiales de construcción son evidentes. Y esto lleva a preguntarnos ¿Por qué no se aplican este tipo de materiales en todos los nuevos revestimientos realizados en las ciudades?

Actualmente, en el mercado existen varias compañías que comercializan una amplia oferta de productos de fotocatalíticos para la construcción, teniendo en cuenta que la crisis actual ha hecho que en España se reduzca el catálogo de muchas empresas (tanto de este tipo de productos como del resto). Este tipo de materiales pueden ser cementos u otros materiales para su aplicación en elementos externos como fachadas, calles, aceras, cubiertas, etc., y los cuales ya se han utilizado en diversos proyectos sobre todo en Europa y Japón.

Además, con el objetivo de desarrollar materiales fotocatalizadores y estudiar su efecto a gran escala en las ciudades, se han llevado a cabo iniciativas europeas dentro del programa europeo "Competitividad y Desarrollo Sostenible", con el programa de investigación PICADA "Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assesment".

Por otro lado, el coste del  $\text{TiO}_2$  es económico, alrededor de 2 €/Kg, pero obviamente la introducción de este compuesto en los materiales de construcción para conseguir superficies fotocatalíticas supone un cierto incremento de precio respecto al uso de materiales ordinarios. Este coste añadido es significativo para las empresas y particulares, lo que conlleva a que la aplicación de este tipo de materiales con fines descontaminantes se haya limitado mucho. Básicamente los podemos encontrar en proyectos de particulares de viviendas aisladas y obras públicas.

Pero no nos podemos quedar con la idea de que los materiales fotocatalíticos son un gasto porque son una inversión. Y es que el retorno en ahorro a nivel de coste sanitario, a largo plazo, es mucho mayor que la inversión inicial que las administraciones públicas puedan hacer en materiales fotocatalíticos.

Referente a esto, cabe destacar que, en un estudio que realizó el observatorio nacional de sostenibilidad de España en 2007 se establecía que el coste sanitario de nuestro país por efecto de la contaminación alcanzaba un porcentaje del PIB entre el 1,7% y el 4,7%. Y por otro lado, un estudio realizado por la comisión Europa en 2010 cifraba el gasto sanitario y laboral entre 427.000M€ y 790.00M€

Por todo ello, no se entiende que las Administraciones no lleven a cabo la implantación de una política clara que exija la utilización de productos de construcción con propiedades descontaminantes en los proyectos de obras públicas, ni a nivel nacional ni internacional, o que lleven a cabo una política de subvenciones de dichos productos.

## 7.1. Tipos de materiales de construcción fotocatalíticos

Este capítulo se ha llevado a cabo con el fin de hacer una recopilación de todos los materiales con base de  $\text{TiO}_2$  y elementos constructivos ya diseñados a partir de este material con propiedades fotocatalíticas y que se comercializan en la actualidad.

### a) Materiales fotocatalizadores de base cementicea

Hoy en día el recubrimiento externo por excelencia de las edificaciones, sobre todo las destinadas a viviendas, es el de acabados de cemento, hormigón o mortero.

En los últimos años se está avanzando mucho en lo que se refiere a materiales multifuncionales por lo que se han propuesto nuevas funcionalidades para estos materiales, aparte de las ya requeridas con objetivos estructurales y de aislamiento.

Es por ello que el grupo italiano Italcementi, basándose en los trabajos de L. Cassar y colaboradores, patentó hace unos años el uso de aditivos fotocatalizadores en productos cementiceos para extrapolarles así todas las ventajas y propiedades de dichos aditivos.

Se comercializan dos tipos de productos según el componente fotocatalizador que contienen:

- Cemento fotocatalizador: Cemento que contiene aditivo fotocatalizador ya incorporado.
- Aditivo fotocatalizador: aditivo suelto que se puede incluir directamente en la elaboración del hormigón o mortero.

Al utilizar aditivos fotocatalizadores en las mezclas se corre el riesgo de no incorporar la cantidad mínima exigida para que se lleve a cabo el efecto fotocatalítico.

Hay que destacar que actualmente, la función que se le otorga más relevante a estos materiales es la de descontaminar el aire de los principales gases tóxicos emitidos por los motores de combustión de los núcleos urbanos. Estos son los  $\text{NO}_x$  y la fracción de BTEX (Benceno, Tolueno, Etanol y Xileno) de los COV.

El  $\text{TiO}_2$ , por sus características ya conocidas tales como elevada estabilidad, baja toxicidad y compatibilidad con los materiales de construcción tradicionales además de su elevada actividad fotocatalítica en comparación con otros óxidos metálicos, resulta el fotocatalizador más adecuado y el elegido como aditivo para añadirlo a los materiales de construcción fotocatalíticos.

En el caso de los cementos fotocatalíticos los fabricantes nos señalan cual es la dosificación recomendable para obtener las reacciones catalíticas suficientes, y hay ejemplos de hormigones blancos con resultados espectaculares en cuanto a su brillo y su capacidad de mantenerse inalterados desde el punto de vista estético gracias a su capacidad de autolimpieza.

Aun así, actualmente estas aplicaciones presentan varios problemas todavía sin solucionar; los más significantes son el descenso en la eficiencia por acumulación de contaminantes en la superficie, la necesidad de utilizar tratamientos agresivos para eliminar los compuestos de la superficie y la durabilidad reducida que presentan las aplicaciones superficiales.

Por los resultados observados en diversos ensayos de laboratorio se puede decir que los morteros de cemento u hormigones que presentan una mayor actividad fotocatalítica son los que contienen adiciones de cenizas volantes de sílice. Y en lo que respecta a la rugosidad de la superficie también se ha llegado a la conclusión de que las superficies rugosas al inicio tienen mayor actividad que las lisas, pero a largo plazo son las lisas las que se recomiendan ya que mantienen su actividad constante y en cambio las rugosas disminuyen su actividad en cuanto disminuye a concentración de contaminantes.

También se ha visto que la eficacia fotocatalítica decrece en un corto periodo de tiempo en las probetas de ensayo por la acumulación de contaminantes en su superficie aun estando en un ambiente muy limpio en comparación con el exterior. De hecho, en un estudio realizado en Brasil (Staub de Melo et al. 2012), se concluye que incluso en las aplicaciones expuestas a ambientes abrasivos debido al tránsito de personas o vehículos la actividad fotocatalítica se reduce en un 95% tras un año de su puesta en uso.

Además, la recuperación de la eficiencia tras la limpieza de la superficie con métodos agresivos, ya que con agua es totalmente insuficiente, es tan solo de un 20-25% de la inicial. Por esta razón se desaconsejan las aplicaciones de mortero únicamente superficiales ya que se debería ir realizando un pulido constante como método de mantenimiento.

El estudio realizado para el artículo “Materiales de construcción para frenar la contaminación” (Seguridad y medioambiente nº 126) a partir de los resultados brindados por ensayos con 6 morteros de cemento de distinta composición, concluye con que hay que tener en cuenta que según los parámetros de la composición y la microestructura de los morteros de cemento se pueden obtener variaciones de hasta un 52% de rendimiento en la degradación de gases NO/NO<sub>x</sub> y hasta un 38% en los valores de resistencia mecánica.

En dicho estudio también se obtiene que el mejor rendimiento en la descontaminación de gases NO<sub>x</sub> lo tienen los morteros con baja porosidad y elevada superficie específica.

La optimización de la formulación de morteros de cemento secos con efecto fotocatalítico hará posible que descienda considerablemente la necesidad de cemento y aditivo fotocatalizador a emplear, y siendo estas las materias primas más caras, se reducirá así notablemente su precio. Por tanto, la conclusión final en cuanto a morteros con efecto fotocatalizador, es que se debe conseguir una formulación optimizada en seco y de última generación para conseguir implantarlos a nivel generalizado en el sector de la construcción.

El cemento fotocatalítico se puede emplear para realizar una gran cantidad de elementos constructivos tanto en aplicaciones horizontales como en verticales:

- Aplicaciones horizontales:
  - Suelos: pavimentos, carreteras, rotondas, aparcamientos, plazas, etc.
  - Cubiertas: tejas de hormigón
  
- Aplicaciones verticales:
  - Revestimientos
  - Recubrimientos: ladrillos, bloques, paneles prefabricados, etc.
  - Barreras de hormigón para el ruido
  - Muros
  - Equipamiento urbano
  - Estructuras arquitectónicas

### b) Cerámica fotocatalítica

En el mercado encontramos Active, la única marca que produce cerámica fotocatalítica a escala industrial, ya que es quien ha desarrollado la patente tanto del material como del proceso de fabricación. Ésta consiste en la aplicación y fijación de partículas micrométricas de  $\text{TiO}_2$  fijadas a  $700^\circ\text{C}$  sobre baldosas de gres porcelánico.

La capa de  $\text{TiO}_2$  que se le impregna a la cerámica también otorga a las baldosas alta resistencia al posible rayado que se puede producir por el tráfico de personas, incluso a un nivel intenso, garantizando un efecto fotocatalítico de larga duración.



Imagen 3. Pavimento de gres de 120x60cm fotocatalítico



Imagen 4. Fachada de gres fotocatalítico

El fenómeno fotocatalítico que se da en la superficie del  $\text{TiO}_2$  dota a la cerámica de propiedades de descontaminación, antibacterianas y de autolimpieza:

- Descontaminante: elimina hasta un 70% de agentes contaminantes orgánicos e inorgánicos como los  $\text{NO}_x$  y los  $\text{SO}_x$ , y el  $\text{CO}$ .

- **Antibacteriano:** elimina los cepos bacterianos que causan enfermedades como la *Escherichia coli*, la *Klebsiella pneumoniae* y el *Staphylococcus aureus*.
- **Autolimpiante:** las baldosas cerámicas adquieren una propiedad hidrofílica, es decir, crean una capa invisible de agua evitando que la suciedad entre en contacto o se adhiera a ellas.

Estos efectos de la cerámica fotocatalítica han sido probados por la universidad del departamento de Química Física y Eléctrica de Milán. En el estudio se comparó la potencia fotocatalítica de 100 m<sup>2</sup> de baldosas blancas fotocatalíticas, puestas como pavimento exterior, con el poder de absorción natural de los árboles en la eliminación de los óxidos de nitrógeno. Se comprobó que 100 m<sup>2</sup> de estas baldosas blancas degradaban tanto NO<sub>x</sub> como unos 30 árboles, lo que corresponde también a 22 m<sup>2</sup> de superficie de hojas, en un día.

Como se ha dicho, el producto fotocatalítico se aplica sobre gres porcelánico esmaltado. Éste es un material muy poco poroso (fácil de mantener y limpiar), y puede utilizarse tanto en pavimentos como en revestimientos interiores y exteriores.

Las piezas pueden tener dimensiones entre 30 x 30 cm hasta 120 x 60 cm, y desde el inicio de su comercialización han sido instaladas en numerosos espacios interiores de casas, en ambientes sanitarios y públicos como restaurantes, cocinas y escuelas; así como también como revestimientos y pavimentos exteriores.

### **c) Pavimentos fotocatalíticos**

Numerosas empresas han llevado a cabo la adición de TiO<sub>2</sub> en el proceso de producción de los pavimentos manteniendo las propiedades mecánicas de éstos.

Los pavimentos fotocatalíticos pueden ser continuos o discontinuos, según si son creados a partir de una capa de unos milímetros de espesor sobre una base firme o están hechos a partir de bloques o baldosas respectivamente.

Los pavimentos continuos más utilizados son:

- **Pavimento de mortero o lechada de cemento fotocatalítico:** la pasta consta de polvo de mortero de cemento con elementos fotocatalíticos y una resina. Se mezcla el producto hasta que queda debidamente homogéneo y se aplica una capa sobre la superficie limpia.

Existe una gama de distintos colores para el acabado de pavimentos como calles, aceras, zonas deportivas, áreas peatonales o carriles bici entre otros. Este tipo de materiales reduce la contaminación en un 60% mínimo.



Imagen 5. Aplicación de capa de mortero y lechada para restauración. Fabricante: Ecobeton Italy

- Recubrimiento Fotocatalítico cementicio: para carreteras y pavimentos asfálticos de todo tipo como Carreteras de alta densidad de tráfico, plazas, aparcamientos, túneles, etc. Presenta una alta adherencia a los pavimentos asfálticos y aguanta ciclos de hielo-deshielo. Se aplica una película de la mezcla por aspersión o cepillado intentando que se introduzca en todos los huecos del aglomerado de la base. En la imagen 6 vemos como el recubrimiento fotocatalítico le otorga un color más claro a la calzada.



Imagen 6. Recubrimiento fotocatalítico cementiceo sobre calzada.  
(Construcción y Materiales de Construcción, 25 (2011), 588)

- Mezcla Fotocatalítica con base de cemento, cuarzo, sílice, pigmentos y aditivos. Su dosificación proporciona excelentes propiedades mecánicas y una muy elevada actividad en la eliminación de la contaminación. Muy utilizada para el acabado de suelos industriales y civiles. Este compuesto se utiliza como acabado en pavimentos de hormigón. Es resistente a la abrasión y a los cambios de temperatura e impermeabilizante.



Imagen 7. Aplicación de mezcla fotocatalítica con base cemento

- Tratamiento fotocatalítico para pavimentos asfálticos. Se trata de un producto transparente basado en una dispersión fotocatalítica de una emulsión a base de agua y resinas. Éste se aplica por aspersión formando una película superficial. Si la superficie asfáltica es nueva se debe aplicar pasados unos días. La superficie debe estar limpia y seca en el momento de la aplicación. Este tipo de productos no modifican las propiedades de la calzada asfáltica, como la de agarre y sujeción a los neumáticos, o las de drenaje o absorción de ruidos. Al ser transparente, no requiere proteger las marcas viales durante su aplicación



Imagen 8. Tratamiento fotocatalítico sobre calzada. Fabricante: Italcementi

Por otro lado, los pavimentos discontinuos fotocatalíticos son un concepto de pavimento urbano hecho a partir de baldosas prefabricadas de hormigón junto a otros materiales con una capa superficial que contiene  $\text{TiO}_2$ .

Estas baldosas cumplen funciones arquitectónicas estéticas y además contribuyen a la eliminación de emisiones contaminantes de la atmósfera. Para hacernos una idea de su capacidad descontaminante, si pavimentásemos una superficie de un campo de fútbol con este tipo de baldosas, se eliminaría la contaminación que generan más de 4.000 vehículos a lo largo de un año.

En algunos casos también se utilizan para su fabricación materias primas procedentes del reciclaje.



Imagen 9. Pavimentos discontinuos de baldosas fotocatalíticas. Fabricante: Ecogranic

#### d) Mobiliario interior



Imagen 10. Cocina a medida realizada con cemento fotocatalítico. Fabricante: Italcementi Group

Los materiales fotocatalíticos también están presentes en el desarrollo de mobiliario de interior. En el caso de la imagen 10 vemos un proyecto arquitectónico interior de una cocina y el mobiliario que se aprecia está compuesto por mortero fabricado a base de cemento con arena, fibras y aditivos. Esto hace que combine la resistencia característica de un material cementoso y la trabajabilidad de un material plástico lo cual permite unos acabados lisos y suaves.

### e) Mobiliario urbano



Imagen 11. Mobiliario urbano realizado con materiales fotocatalíticos. Fabricante: Italcementi

En la imagen de la izquierda vemos un paraguas público para un parque de una ciudad de Japón realizada con fibra de vidrio recubierta de Partículas fotocatalíticas. En el caso de la imagen de la derecha, el mobiliario que se aprecia está compuesto como en el caso del mobiliario de interior por morteros fabricados a base de cemento con arena, fibras y aditivos.

Como se ve, la trabajabilidad de este tipo de material posibilita la creación de formas muy complejas y poco convencionales en el mobiliario urbano. Además también tiene la ventaja de poder fabricar los elementos con espesores mínimos.

### f) Láminas asfálticas fotocatalíticas

Las cubiertas fotocatalíticas, en su gran mayoría, están hechas con un sistema de impermeabilización con láminas bituminosas descontaminantes. Este tipo de láminas son productos bituminosos de betún elastómero, con una autoprotección mineral tratada con un fotocatalizador. Es el ejemplo de las láminas asfálticas patentadas de la marca NO<sub>x</sub>-Activ fabricada por Icopal.

Cada vez son más las empresas que optan por soluciones a favor del medioambiente en los proyectos de nueva construcción o reforma apostando por una reputación a favor de la sostenibilidad.

En la imagen 12 se puede apreciar la nueva cubierta de Leroy Merlin cuya superficie suma 12.500m<sup>2</sup> de láminas asfálticas que mejoran el aire del entorno. Y en la imagen 13 vemos otro ejemplo de uso de láminas fotocatalíticas utilizadas para la rehabilitación de la cubierta de un centro comercial IKEA, cuya superficie consta de 22.000m<sup>2</sup>. La empresa también utilizó este tipo de material para la rehabilitación completa de las cubiertas de una de sus fábricas de Portugal con más de 200 000 m<sup>2</sup> de impermeabilización.



Imagen 12. Cubierta Leroy Merlin



Imagen 13. Cubierta Ikea

### g) Pinturas fotocatalíticas

Las pinturas fotocatalíticas son útiles por sus 3 propiedades fundamentales que son la reducción de la contaminación del aire, la reducción de los olores y la inhibición de bacterias y hongos. Estas pinturas son productos destinados tanto al cliente particular como a las administraciones públicas.

En el ámbito privado, con este tipo de pinturas se pueden tratar las superficies interiores de viviendas o negocios reduciendo así hasta en un 90% los contaminantes de ese aire interior puesto que es un aire estanco que apenas circula.



Imagen 14. Tratamiento de fachadas, cubiertas y de superficies interiores con pinturas fotocatalíticas

También se utiliza pintura acrílica fotocatalítica para tratar superficies exteriores de edificios como fachadas o cubiertas.

La actividad de las pinturas fotocatalíticas que contienen  $\text{TiO}_2$  aumenta con el tiempo a la intemperie, debido a la creciente destrucción de la resina de polímero y la consiguiente exposición del pigmento fotocatalizador.

Por otro lado, en el ámbito público, el papel de estas pinturas es clave en edificios en los que hay que tener especial consideración por la salud de sus ocupantes como hospitales, escuelas, residencias de ancianos, etc.

Estos productos, al disminuir notablemente los olores, se utilizan mucho en espacios donde éstos son más intensos para mejorar el confort de sus usuarios. Es el caso de las residencias de ancianos, cuartos de basura, granjas de animales.

También son muy útiles para tratar las superficies de viviendas de particulares que tengan ultrasensibilidad a los productos químicos ya que a través de la fotocatalisis se ha comprobado que se mejora significativamente su calidad de vida.

#### **h) Textil fotocatalítico**

La adhesión de una nanocapa fotocatalítica a una superficie textil es otra de las aplicaciones posibles de materiales con este efecto. Su propiedad se mantiene durante largo tiempo sin necesidad de otra aplicación.

Así pues, también se pueden aplicar en la industria textil las propiedades anti bacterianas y de desodorización características del proceso fotocatalítico. El recubrimiento descompone suciedades, olores y gases peligrosos purificando el ambiente. Por ello tiene mucha aplicación en lonas exteriores como toldos o parasoles así como en todo el textil del hogar.

El recubrimiento de la nanocapa fotocatalítica sobre el textil se suele realizar mediante su inmersión en el producto o simplemente aplicándolo con un difusor sobre la superficie a proteger.



Imagen. 15. Toldos y membrana fabricados en textil fotocatalítico

A la izquierda vemos una estructura fabricada con tela de PVC fotocatalítica para el recinto del hotel Hyatt Regency en Osaka. En la imagen de la derecha podemos ver el nuevo estadio de fútbol de Brasil el cual utiliza un tejido impregnado de  $\text{TiO}_2$  para la estructura del techo.

## 7.2. AIF y la Isla fotocatalítica

Como se ha podido ver, existe una gran variedad de materiales de construcción fotocatalíticos y por ende, empresas que los distribuyen, y además el número está creciendo.

La AIF (Asociación Ibérica de Fotocatálisis) se creó con el fin de agrupar a todas las empresas que fabrican o distribuyen materiales de construcción fotocatalíticos. Una de sus misiones es fomentar la implantación del concepto de Isla fotocatalítica en las grandes ciudades. La AIF colabora tanto con las Administraciones Públicas como con otras asociaciones que aporten soluciones fotocatalíticas.

La isla fotocatalítica es un concepto de manzana y zona colindante urbanizada ideal cuya superficie está cubierta con materiales fotocatalíticos. Es decir, todos los materiales hasta ahora vistos podrían tener su lugar para crear una solución de construcción sostenible: paneles cerámicos para fachada, adoquines y pavimento, impermeabilización de cubiertas, revestimiento para carreteras y calles, cemento, pinturas, etc.

Con el objetivo de ver el efecto positivo de este concepto de isla en las grandes urbes contaminadas AIF realizó una estimación de la implantación de diversos materiales fotocatalíticos en una manzana del Eixample.

Este estudio fue muy interesante ya que especificaba los kg al año de  $\text{No}_x$  destruido por cada tipo de material por  $\text{m}^2$  para un valor de exposición de luz solar característico de Barcelona o luz artificial de una determinada potencia estimada. Para hacernos una idea de la reducción de dicha utilización se calcula la reducción total del  $\text{No}_x$  en un año en la tabla siguiente:

Producto	Empresa	Zona	$\text{m}^2$	$\text{No}_x/\text{año}$ destruido (kg)
Adoquines	Breincó	 Patio interior	3.600	70
Láminas asfálticas de impermeabilización	Icopal	 Cubierta	5.400	39

Producto	Empresa	Zona	m <sup>2</sup>	NO <sub>x</sub> /año destruido (kg)
Fachada con piezas cerámicas	Ceracasa	 Fachada	10.675	13
Pintrura	Adaptacolor	 Techos párquines	9.000	182
<b>NO<sub>x</sub> total destruido</b>				<b>304kg</b>

Como hemos visto, la manzana tipo del Eixample destruiría, según los ensayos realizados para la caracterización de cada material, 304 kilos de óxidos de nitrógeno al año aproximadamente.

En el Eixample al analizar un m<sup>3</sup> de aire encontramos 0,000065g/m<sup>3</sup> de NO<sub>x</sub> de valor medio (según datos del 2011). Lo cual nos da:

$$304.000(\text{g})/0,000065(\text{g}/\text{m}^3) = 4.676.923.076 \text{ m}^3$$

Es decir, una sola manzana del Eixample con los materiales anteriormente propuestos eliminaría el NO<sub>x</sub> de 4.676 millones de metros cúbicos de aire.

### 7.3. Proyectos con materiales fotocatalíticos

A pesar del sobrecoste a corto plazo de utilizar productos fotocatalíticos en las infraestructuras, algunos ayuntamientos apuestan en proyectos puntuales por esta tecnología y se han construido algunos edificios civiles con materiales con base de cemento que contienen TiO<sub>2</sub> y a los que se les está dando un uso actualmente.

#### a) Iglesia Dives in Misericordia

Uno de los primeros usos del cemento fotocatalítico fue en la iglesia romana "Dives in Misericordia", diseñada por Richard Meier para el Jubileo del año 2.000 en Roma (acontecimiento de la iglesia católica).

La obra tiene su origen como parte de un proyecto del Vaticano para promover nuevas iglesias en los barrios periféricos de Roma, convocando por ello un concurso internacional en el que resultó vencedor Richard Meier, (premio Pritzker 1984).

El proyecto, como vemos en la imagen 16, se caracteriza por el uso de geometrías y volúmenes nítidos, por la claridad de sus espacios, la utilización simbólica de la luz junto y el uso del color blanco.

La estructura de la iglesia, compuesta por tres velas blancas, enfatiza la capacidad del cemento fotocatalítico de mantenerse limpio y de descomponer la suciedad y los contaminantes. Esta propiedad ayuda a mantener la estética original y alarga la vida útil de la construcción.

Italcementi desarrollo un hormigón blanco fotocatalizador, Millennium TX, con un alto brillo y especialmente diseñado para la construcción de los bloques de la iglesia "Dives in Misericordia" de Roma diseñada por el arquitecto Richard Meier. Italcementi buscó un hormigón que combinara la pureza y el brillo de un blanco casi total (98% del blanco absoluto) y tuviera la capacidad de mantener sin cambios este fondo.

Los ensayos experimentales han mostrado que, después de aproximadamente 60 horas de exposición a lámparas de luz ultravioleta, las muestras de Millennium TX, que habían sido ensuciadas previamente con compuestos aromáticos policondensados de extracto de ceniza de cigarrillo, recuperaban el grado de blancura de la muestra inicial de referencia.



Imagen 16. Fachada frontal y trasera de la iglesia Dives in Misericordia hecha con hormigón fotocatalítico

Este cemento no requiere de precauciones especiales en el uso, pero si una correcta aplicación de las disposiciones estipuladas en normativa buenas prácticas. El mortero y/o el hormigón requieren: adecuada relación agua/cemento, lo que mejora la resistencia mecánica y evita la retracción; una justa dosificación de aglutinante correctamente mezclado para asegurar un color uniforme; una curva granulométrica correcta; El uso de agregados limpios libres de impurezas, ya que la mezcla se adhiere a ellos y el polvo causa desapego de la pasta de cemento; tiempos de mezcla de la pasta adecuados y un curado cuidadoso.

Este tipo de cemento está indicado para una amplia gama de aplicaciones, en particular, en proyectos de restauración, obras que requieren de una alta resistencia inicial y final, diseños constructivos con especificaciones complejas ya sea a nivel mecánico o estético, suelos de alta calidad, elementos que pueden llevarse a cabo con o sin curado al vapor, yesos, hormigón, estucos y juntas o sellados.

La compañía también ha desarrollado un diseño de la mezcla específica de hormigón y se ha asegurado el control constante en construcción.



Imagen 17. Interior de la nave principal de la iglesia Dives in Misericordia hecha con hormigón fotocatalítico

## b) Muhammad Ali Center MAC

El centro Cultural Internacional MAC diseñado por “Beyer Blinder Belle Architects & Planners” para el exboxeador Mohamed Ali se terminó de construir en 2005. Es un edificio llamativo debido a su fachada, que está formada por baldosas cerámicas esmaltadas de diversos colores y dispuestas en una parrilla de 30 por 60cm siguiendo un patrón muy particular (imágenes de boxeo) como se puede apreciar en la imagen 18.



Imagen 18. Fachadas de baldosas fotocatalíticas del Muhammad Ali Center MAC en Louisville, USA

Para mantener todo lo posible la buena apariencia y disminuir los costes de limpieza las baldosas de la fachada tienen su superficie tratada con un revestimiento fotocatalítico. El producto fotocatalítico se cuece junto al esmalte de las baldosas por lo que tiene una duración indefinida. Como ya se sabe, al ser una superficie fotocatalítica, además de contar con una autolimpieza también elimina ciertos gases contaminantes. Investigaciones

muestran que 1000 m<sup>2</sup> de fachada fotocatalítica equivale a la limpieza del aire por parte de 70 árboles medianos de hoja caduca.

### c) Estadio AT&T



Imagen 19. Estadio AT & T con techo retráctil de membrana fotocatalítica en Texas, USA

El estadio AT & T (de los "Dallas Cowboys"), posee un diseño contemporáneo y racional, además de una función eficiente y una ingeniería excepcional que hacen que sea un edificio único y ganador de algunos premios.

El estadio se completó en 2009, con un presupuesto de \$1150 millones, ocupa más de 278.000 m<sup>2</sup>. La obra es un ejemplo extraordinario de ingeniería ya que al finalizarla se establecieron al menos tres récords mundiales, entre ellos: "la estructura de techo más larga de un solo tramo", "paneles de techo móviles más grandes," y " tener las puertas automáticas de cristal más extensas".

Parte de los paneles que cubren el techo del estadio forman la estructura de paneles móviles más grandes del mundo. Éstos son totalmente retráctiles y se pueden abrir y cerrar en tan solo 12 minutos.

El estadio fue el primero de USA en construirse con un techo autolimpiable con una superficie de unos 63.000m<sup>2</sup>. Los paneles translúcidos de la cubierta están revestidos con una membrana de fibra de vidrio. Éstos también cuentan con una de las primeras aplicaciones del mundo de una capa de dióxido de titanio fotocatalítico que descompone la suciedad y siendo limpiada por el agua de lluvia, por lo que el techo es esencialmente autolimpiable. Además, al estar formados por una tela translúcida se disminuye significativamente el consumo de energía.

### d) Pavimento de Hormigón en una calle de Amberes (Bélgica)

Una de las primeras aplicaciones de Hormigón fotocatalítico la llevó a cabo el Centro de Estudios de Carreteras belga (BRRC) mediante la instalación de 10.000 m<sup>2</sup> de adoquines de dicho hormigón en las calles secundarias de un eje principal de entrada a Amberes.

En este proyecto, el fotocatalizador, dióxido de titanio en forma de Anatasa, se introdujo en la capa superior del pavimento de hormigón, concretamente en la capa de desgaste de los adoquines que es aproximadamente 8 mm de espesor, para obtener mejores resultados. Dicha capa se puede apreciar en la imagen 21.



Imagen 20. Carretera de bloques con  $\text{TiO}_2$



Imagen 21. Bloques de hormigón fotocatalítico

El  $\text{TiO}_2$  está presente en todo el espesor de esta capa para que cuando se vaya produciendo el desgaste de la superficie, ya sea por tráfico o por estar a la intemperie, vaya apareciendo  $\text{TiO}_2$  nuevo que mantenga activado el efecto fotocatalítico.

El uso de  $\text{TiO}_2$  en combinación con cemento conduce a una transformación del  $\text{NO}_x$  en  $\text{NO}_3$ , que se adsorbe en la superficie debido a la alcalinidad del hormigón. Por lo tanto, se crea un efecto sinérgico, ya que la matriz de cemento ayuda a atrapar eficazmente los gases y compuestos que proceden del  $\text{NO}$  y el  $\text{NO}_2$ .

Para evaluar la eficiencia del material en laboratorio se midió la concentración de  $\text{NO}_3$  depositado sobre la superficie para determinar la cantidad mínima de  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  que había sido oxidada, aunque los autores no han informado de las tasas de reducción de  $\text{NO}_x$  iniciales o a 1 año. De lo que si informan es de que las capacidades de descontaminación del aire de los bloques se habían reducido en un 20% al cabo de un año.

Las conclusiones sacadas de este estudio de laboratorio se reducen a que:

- La durabilidad de la acción fotocatalítica permanece casi intacta, aunque para ello se debe dar una limpieza regular (por la lluvia) de la superficie.
- La humedad relativa (HR) es un parámetro importante, que puede reducir la eficiencia de la actividad. Si la HR es demasiado alta, el agua se adsorbe en la superficie y evita la reacción con los contaminantes.

Por otro lado, la traslación de la eficacia de los resultados de las pruebas de laboratorio a aplicaciones a gran escala in situ sigue siendo crítica de demostrar debido al gran número de parámetros involucrados en el proceso. Además, la durabilidad en el tiempo en lo que respecta al efecto de descontaminación del aire sigue siendo un reto para la aplicación en carreteras de hormigón.

Desde esta perspectiva, en los últimos años en Bélgica se han desarrollado varios proyectos de aplicaciones en condiciones reales para evaluar la durabilidad y la eficiencia in situ del material. Éstos son una zona de estudio de campo instalada en el túnel Leopoldo II de Bruselas y la construcción de nuevas aceras fotocatalíticas en zonas industriales de la ciudad es de Wijnegem y Lier (provincia de Amberes).

## **8. CASO PRÁCTICO**

En el apartado redactado a continuación está dividido en dos líneas de estudio:

- Por un lado, la comparativa de presupuestos de una reforma realizada a un pabellón multiusos con los materiales tradicionales propuestos en el proyecto por los autores de este y materiales fotocatalíticos propuestos por la autora de este trabajo;
- Y por otro, se ha hecho un estudio de la diferencia de precio de diversos tipos de fachada realizados con materiales tradicionales y materiales fotocatalíticos y paralelamente se ha investigado también cuál es su capacidad de destrucción de los gases NO<sub>x</sub>, puesto que dichos gases son los más perjudiciales para la salud y además son los estudiados en los ensayos de los fabricantes para catalogar sus productos de fotocatalíticos.

### **8.1. Comparativa de presupuestos**

En el capítulo que veremos a continuación se ha querido ver la diferencia entre el presupuesto de utilizar todo materiales convencionales para una reforma y la de utilizar materiales fotocatalíticos en las partidas donde se pueda y ver así el incremento total que supondría esta última alternativa.

Para ello se ha buscado un proyecto concreto de una reforma y se han escogido las partidas donde se podrían utilizar materiales fotocatalíticos. Una vez detectadas se han buscado materiales fotocatalizadores alternativos a los que constan en el presupuesto con sus respectivos precios para terminar calculando su sobrecoste.

Características generales del proyecto

Nombre del proyecto: REHABILITACION DE PABELLÓN MULTIUSOS SANTA LUCIA.

Las obras de rehabilitación del pabellón, cuyo presupuesto será objeto de análisis, se llevaron a cabo en el 2014. Éste está situado en la C/ Prolongación de Sastago nº7 de Escatron (Zaragoza) y tiene una superficie de 775,26 m<sup>2</sup>.

Descripción del pabellón en estado inicial:

La constitución del pabellón viene dada por una nave de crujía única, con estructura de pórticos de hormigón prefabricado, tanto pilares como vigas. Las fachadas están ejecutadas con ladrillo hueco doble, enfoscado de mortero y pintado.

La cubierta, rehabilitada hace unos años, está realizada con estructura metálica y cubierta de chapa de acero en la zona correspondiente a la nave y cubierta plana en la zona de las oficinas. La nave tiene una crujía de 14,16 metros de ancho por 54,75 metros de longitud.

Estructuralmente está constituida por 12 pórticos prefabricados de hormigón armado, con una distancia entre ejes de 5m como se puede apreciar en la imagen 22.



Imagen 22. Interior del Pabellón de Santa Lucía

Obras de rehabilitación a llevar a cabo:

Al estar la fachada realizada con una única hoja de fábrica de ladrillo sin cámara ni aislamiento, se busca la eficiencia energética planteando la realización de un aislamiento por el exterior del edificio.

También se pretende garantizar la estanqueidad de la fachada ya que con el sistema constructivo existente existen humedades. La solución adoptada consiste en la ejecución por el exterior de una fachada realizada con panel sándwich liso arquitectónico colocado en horizontal. El panel estará formado por dos láminas de acero galvanizado y prelacado, con núcleo de espuma de poliuretano de  $55 \text{ kg/m}^3$  con un espesor total de 50mm colocado sobre estructura metálica auxiliar. Con esta solución se garantiza el aislamiento térmico del pabellón, la estanqueidad frente a la humedad exterior y se renueva la imagen exterior del pabellón.

Por otro lado, se realizará la obra civil necesaria para poner en un futuro una instalación de climatización. Esto se lleva a cabo ejecutando un altillo con estructura metálica y forjado de chapa colaborante sobre el falso techo de la zona ocupada por los aseos para ubicar las máquinas climatizadoras. Para ello será necesario desmontar previamente el falso techo, con posterior instalación del mismo.

Con objeto de no afectar a los aseos, recientemente acondicionados, la nueva estructura se plantea sobre pilares externos que irán por fuera del núcleo de los aseos. Los pilares del altillo situados junto a la fachada quedarán ocultos por la nueva fachada de paneles.

Y por último, también se detectaron problemas de filtraciones en la cubierta plana de la zona de oficinas. La impermeabilización consistía en una única lámina con pendientes hacia un

canalón oculto situado junto a la fachada. Se plantea levantar la actual impermeabilización y el sistema de pendientes para ejecutar una cubierta invertida con pendientes hacia dos sumideros centrales y doble lámina impermeabilizante. Se instalará aislamiento de poliestireno extruido. Se aprovecha la ejecución de esta nueva cubierta para la realización de una bancada de hormigón aligerado en la que apoye la unidad exterior de climatización.

### 8.1.1. Propuestas alternativas

Una vez hemos visto las obras de mejora que se desean realizar en el pabellón Santa Lucía, se puede ver que tanto en la fachada como en la cubierta se pueden añadir materiales fotocatalíticos.

Los precios de las partidas alternativas propuestos a continuación están sacados del banco de precios de CYPE ingenieros ya que el Bedec del ITEC no cuenta con ninguna partida con materiales fotocatalíticos.

Por otro lado, la partida de "tratamiento superficial de calzada" no está incluida ni en el Bedec ni en el generador de precios del CYPE. Los precios utilizados para la generación de estas partidas son precios adecuados al mercado actual extraídos del "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"

Se propone el cambio de las siguientes partidas del presupuesto referente a la fachada principal del pabellón:

- Fachada tipo panel sándwich horizontal de chapa lisa prelacada 50/1000.
- Fachada tipo panel sándwich horizontal de chapa lisa prelacada 50/600.

FLG031	m <sup>2</sup>	Fachada ligera de panel sándwich de GRC fotocatalítico.	144,76€
Cerramiento de fachada formado por panel sándwich de GRC, de 12 cm de espesor, 3,3 m de anchura máxima y 12 m <sup>2</sup> de superficie máxima, acabado liso de color blanco, formado por dos láminas de cemento fotocatalítico descontaminante, TX ARIA "FYM ITALCEMENTI GROUP", arena de sílice de granulometría seleccionada y fibra de vidrio, y un núcleo de poliestireno expandido.			

Ajustes en el presupuesto final:

Código	Resumen	Cantidad	Precio	Importe
9.1	m <sup>2</sup> P.SANDW.HORIZ. CHAPA LISA PREL-50/1000 ETNA I/REMATES	440,45	60,51	- 26.651,63
	m <sup>2</sup> Fachada ligera de panel sándwich de GRC fotocatalítico.		144,76	+63.759,54
9.2	m <sup>2</sup> P.SANDW.HORIZ. CHAPA LISA PREL-50/600 ETNA I/REMATES	91,78	65,97	- 6.054,73
	m <sup>2</sup> Fachada ligera de panel sándwich de GRC fotocatalítico.		144,76	+13.286,07

Se propone cambio de cubierta invertida no transitable con acabado de grava por la siguiente cubierta con acabado de pintura fotocatalítica:

QAD010	m <sup>2</sup>	Cubierta plana no transitable, no ventilada, autoprotegida, impermeabilización mediante láminas asfálticas.	53,85€
Cubierta plana no transitable, no ventilada, autoprotegida, tipo convencional, pendiente del 1% al 15%, compuesta de: formación de pendientes: arcilla expandida de 350 kg/m <sup>3</sup> de densidad, vertida en seco y consolidada en su superficie con lechada de cemento, con espesor medio de 10 cm, sobre forjado de hormigón armado (no incluido en este precio); aislamiento térmico: panel rígido de lana mineral soldable, de 50 mm de espesor; impermeabilización monocapa adherida: lámina de betún modificado con elastómero SBS, LBM(SBS)-50/G-FP totalmente adherida con soplete.			

A la cual se le deberá añadir el precio unitario de la siguiente partida:

m<sup>2</sup> TRATAMIENTO CALZADA Aplicación de tratamiento fotocatalítico con dióxido de titanio en base acuosa sobre pavimentos de acera, naturales o prefabricados.

TOTAL PARTIDA ..... 6,30€

Ajustes en el presupuesto final:

Código	Resumen	Cantidad	Precio	Importe
7.2	m <sup>2</sup> Cub. Inv. No Trans. C/A Grava	64,86	48,07	- 3117,82
	m <sup>2</sup> Cubierta plana no transitable, no ventilada, autoprotegida, impermeabilización mediante láminas asfálticas.		53,85	+ 3492,71
	m <sup>2</sup> TRATAMIENTO CALZADA Aplicación de tratamiento fotocatalítico con dióxido de titanio		6,30	+ 408,62

Se propone el cambio del pavimento de loseta 4 PAST.CEM.GRIS 20x20 por el siguiente pavimento:

RSG130	m <sup>2</sup>	Solado de baldosas cerámicas "GRES PANIA", colocadas con adhesivo.	62,68€
Solado de baldosas cerámicas de gres porcelánico, estilo cemento, serie City "GRES PANIA", acabado antideslizante, color gris, 30x30 cm y 15 mm de espesor, y acabado de fábrica con recubrimiento fotocatalítico H&Ttiles, para uso público exterior, con resistencia al deslizamiento tipo 3, según CTE, recibidas con adhesivo cementoso mejorado, C2 gris, y rejuntadas con lechada de cemento y arena, L, 1/3 CEM II/A-P 32,5 R, para junta abierta (> 15 mm), coloreada con la misma tonalidad de las piezas.			

Ajustes en el presupuesto final				
Código	Resumen	Cantidad	Precio	Importe
7.2	m <sup>2</sup> PAV. LOSETA 4 PAST. CEM. GRIS 20x20	24,66	30,91	- 762,24
	m <sup>2</sup> Solado de baldosas cerámicas "GRES PANIA", colocadas con adhesivo.		62,68	+ 1.545,69

**Presupuesto inicial de la reforma:**

TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL	85.156,08 €
13,00% Gastos generales.....	11.070,29
6,00% Beneficio industrial.....	5.109,37
SUMA DE G.G. y B.I.	16.179,66
TOTAL PRESUPUESTO CONTRATA	<b>101.335,74</b>
21,00% I.V.A.....	21.280,50
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL	<b>122.616,24 €</b>

**Presupuesto opcional con materiales fotocatalíticos:**

TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL	131.062,29 €
13,00% Gastos generales.....	17.039,1
6,00% Beneficio industrial.....	7.863,74
SUMA DE G.G. y B.I.	24.902,84
TOTAL PRESUPUESTO CONTRATA	<b>155.965,13</b>
21,00% I.V.A.....	32.752,68
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL	<b>188.717,81 €</b>

El porcentaje de sobrecoste por el uso de los materiales propuestos fotocatalíticos es del 51%

**8.1.2. Discusión del resultado**

Utilizando materiales o sistemas constructivos alternativos fotocatalíticos únicamente en la envolvente del edificio con el fin de descontaminar el ambiente que lo rodea el presupuesto final de obra se nos encarece un 53,9%.

Pero esto es por el hecho de que se trata de un pabellón deportivo donde sistema constructivo utilizado en la fachada era de panel sándwich de acero galvanizado. Los tratamientos fotocatalíticos sobre materiales metálicos son bastante costosos ya que no están estandarizados y la empresa que los fabrica los personaliza según la muestra del metal que se desea colocar en obra.

Por no saber el coste de la fabricación y suministro personalizada del tratamiento fotocatalizador se ha optado por un panel sandwich cerámico de una marca en concreto la cual tiene los precios bastante elevados. Este hecho ha sido el que ha encarecido significativamente el presupuesto.

Y se debe tener en cuenta también que un gran porcentaje del presupuesto de la obra se destina justamente a la envolvente puesto que es una obra de rehabilitación y reforma.

Estudios concluyen que el encarecimiento del presupuesto cuando se trata del proyecto de una obra nueva esta entorno al 5%. Esto tiene sentido puesto que la suma del peso presupuestario de las estructuras, las cimentaciones y las instalaciones es significativo y hace que el encarecimiento de la envolvente por la utilización de materiales fotocatalíticos disminuya.

## 8.2. Estudio de fachadas

En este segundo apartado se ha realizado la comparación de presupuestos de 4 tipos de fachadas realizadas con materiales tradicionales y con materiales fotocatalíticos de  $TiO_2$ :

- Fachada muro cortina.
- Fachada de paneles GRC.
- Fachada ligera sin ventilar de fábrica revestida con mortero monocapa.
- Fachada ligera sin ventilar de fábrica revestida con mortero monocapa acabado pintura.

Además, para completar el estudio, se ha investigado la capacidad de cada uno de los materiales fotocatalíticos propuestos de eliminar compuestos de  $NO_x$ .

### Fachada muro cortina

Estudio del aumento de costes de la utilización de materiales fotocatalíticos en este tipo de fachada se ha realizado mediante la utilización de la base de precios de la construcción del gobierno de Extremadura para el precio vidrio fotocatalítico Climalit Bioclean y la base de precios de CYPE ingenieros para el muro cortina tradicional.

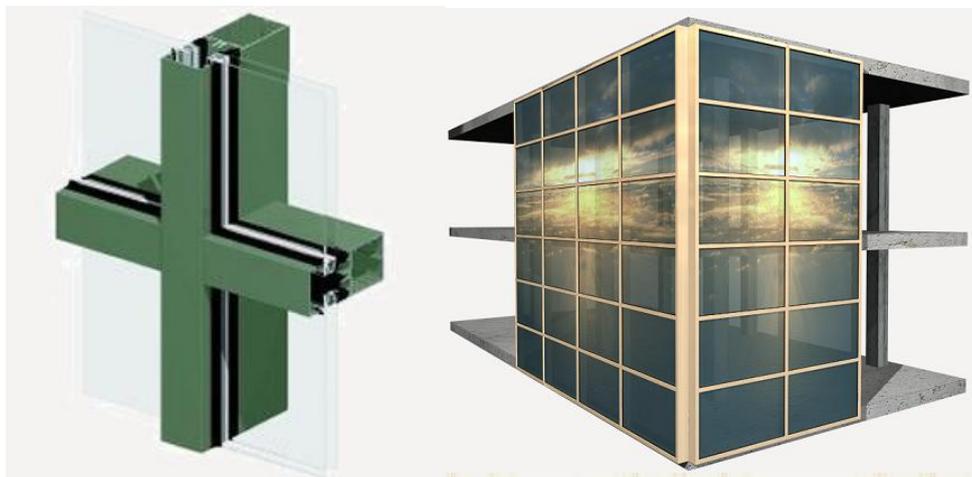


Figura 9. Muro cortina

El precio del doble acristalamiento Climalit Bioclean, formado por un vidrio float incoloro autolimpiable y descontaminante Bioclean de 6 mm y un vidrio float incoloro Planilux de 6 mm, cámara de aire deshidratado de 10, 12 ó 16 mm con perfil separador de aluminio y doble sellado perimetral es de:

Resumen	Rendimiento	Precio Partida
m2 Climalit Bioclean 6/10,12,16/6	1,006	58,80€

Y a continuación podemos el precio descompuesto de un muro cortina con vidrios convencionales, por lo que sustituyendo el precio anterior en la siguiente partida tendremos el precio total de un muro cortina efectuado con vidrios autolimpiables y descontaminantes:

FMY030	m <sup>2</sup>	Sistema "TECHNAL" de muro cortina de aluminio.	240,76€
Muro cortina de aluminio realizado mediante el sistema parrilla tradicional con rotura de puente térmico, de "TECHNAL", con estructura portante calculada para una sobrecarga máxima debida a la acción del viento de 60 kg/m <sup>2</sup> , compuesta por una retícula con una separación entre montantes de 150 cm y una distancia entre ejes del forjado o puntos de anclaje de 270 cm; cerramiento compuesto de un 40% de superficie opaca (antepechos, cantos de forjado y falsos techos) y un 60% de superficie transparente fija con doble acristalamiento templado de control solar, color azul, 6/6/6.			

Descompuesto	Ud	Descomposición	Rend.	Precio unitario	Precio partida
mt25mct010faa	m	Montante de aluminio, "TECHNAL", de 100x52 mm (Ix= 116,05 cm <sup>4</sup> ), acabado lacado blanco, con el sello QUALICOAT, que garantiza el espesor y la calidad del proceso de lacado, incluso junta central de estanqueidad.	0,667	25,09	16,74
mt25mct020caa	m	Travesaño de aluminio, "TECHNAL", de 60x52 mm (Iy= 19,09 cm <sup>4</sup> ), acabado lacado blanco, con el sello QUALICOAT, que garantiza el espesor y la calidad del proceso de lacado, incluso junta central de estanqueidad.	1,111	19,67	21,85
mt25mct040a	m	Pieza de anclaje puntual del vidrio, de poliamida, para su uso con el sistema MX Contratapa Puntual parrilla tradicional "TECHNAL".	1,778	1,30	2,31
mt25mct030aa	m	Tapa embellecedora de aluminio horizontal y vertical, para su uso con el sistema MX Contratapa Puntual parrilla tradicional "TECHNAL", acabado lacado blanco, con el sello QUALICOAT, que garantiza el espesor y la calidad del proceso de lacado.	2,889	7,56	21,84
mt25mct100a	Ud	Repercusión, por m <sup>2</sup> , de accesorios de muros cortina para el sistema MX Contratapa Puntual parrilla tradicional "TECHNAL", elementos de anclaje y sujeción y remates a obra.	1,000	16,50	16,50
mt21veg040yac	m <sup>2</sup>	Doble acristalamiento templado de control solar, conjunto formado por vidrio exterior templado, de control solar, color azul de 6 mm, cámara de aire deshidratada con perfil separador de aluminio y doble sellado perimetral, de 6 mm, y vidrio interior Float incoloro de 6 mm de espesor.	0,604	73,67	44,50
mt25mco045a	m <sup>2</sup>	Panel de chapa de aluminio, de 9 mm de espesor total, acabado lacado color blanco, formado por lámina de aluminio de 0,7 mm y alma aislante de poliestireno extruido (densidad 35 kg/m <sup>3</sup> ).	0,402	21,73	8,74
mt21sik020b	Ud	Cartucho de silicona sintética de color Elastosil-605-S "SIKA", de 310 ml (rendimiento aproximado en juntas de estanqueidad de 2 m por cartucho).	0,700	2,67	1,87
mt21vva021	Ud	Material auxiliar para la colocación de vidrios.	1,000	1,26	1,26
mo017	h	Oficial 1ª cerrajero.	0,713	17,52	12,49
mo057	h	Ayudante cerrajero.	0,972	16,19	15,74
mo048	h	Oficial 1ª montador de muro cortina.	1,555	17,82	27,71
mo094	h	Ayudante montador de muro cortina.	2,332	16,13	37,62
	%	Medios auxiliares	2,000	229,17	4,58
	%	Costes indirectos	3,000	233,75	7,01
Coste de mantenimiento decenal: 43,34€ en los primeros 10 años.				Total:	240,76

$$240,76€ - 44,50€ + 58,80€ = 255,06€$$

Precio m <sup>2</sup> muro cortina Technal	Precio m <sup>2</sup> muro cortina Climalit Bioclean	Porcentaje de incremento de precio
240,76	255,06	6%

Vemos pues, que el incremento que supone utilizar un vidrio fotocatalítico en vez de un convencional es de un **6%**. Un sobrecoste totalmente asumible teniendo en cuenta los beneficios que la utilización de dichos materiales comporta.



Imagen 23. Vidrio tradicional y vidrio Bioclean

Las propiedades que se le atribuyen a un vidrio fotocatalítico le son conferidas mediante un tratamiento superficial, mediante el cual se deposita una capa transparente de un material que contiene  $\text{TiO}_2$ .

Como ya hemos visto, las propiedades que se le atribuyen a un vidrio fotocatalítico son la hidrofilia (propiedad que permite que se cree una cortina de agua que arrastra la suciedad), el efecto autolimpieza (se descompone la suciedad de la superficie) y el efecto descontaminante (descompone una gran cantidad de gases perjudiciales).

Respecto a esta última, la empresa Climalit no proporciona datos en sus catálogos técnicos del efecto descontaminante de sus vidrios Bioclean tratados con  $\text{TiO}_2$ , pero por similitud se han cogido los datos proporcionados por Laurentia technologies, otra empresa que se dedica al tratamiento de autolimpieza de superficies acristaladas. Esta empresa ha conseguido rendimientos de descomposición de NO de 21.9 % y de  $\text{NO}_x$  de 13.1 %.

Si extrapolamos esto al nivel del aire de Barcelona,  $1\text{m}^2$  de este vidrio puede limpiar hasta un 21,9% de NO y un 13,1% de  $\text{NO}_x$  de  $1\text{m}^3$  de aire cada 10 min. Por lo tanto, análogamente, hará lo propio con  $52.560\text{m}^3$  en un año.

La concentración del Eixample de  $\text{NO}_x$ , como se ha dicho con anterioridad, es de  $0,065\text{mg}/\text{m}^3$ , lo que supone que si  $1\text{m}^2$  de este vidrio se colocara en una vivienda del Eixample podría destruir hasta:

$$0,131 * 0,065 * 52.560 = 447,54\text{mg de NO}_x$$

## Fachada de panel GRC

Por otro lado, tenemos los paneles de GRC que son elementos prefabricados y cuyo nombre proviene de las iniciales de "Glass Reinforced Concrete", es decir, hormigón Armado con Fibra de Vidrio. Este material compuesto está constituido por una matriz de micro hormigón de cemento Portland y está armado con fibra de vidrio dispersa en toda la masa para otorgarle mayor resistencia a flexión.

Existen tres tipos de paneles GRC:

a) Paneles tipo Sandwich, formado por dos láminas de GRC separadas por un núcleo de poliestireno expandido (por ejemplo) que hace de aislamiento térmico y/o acústico. Puede ofrecer sus dos caras a la vista y cuenta con rigidizadores internos de GRC.

b) Paneles tipo cascara o nervado, formado por una lámina de 10 mm de GRC reforzada con nervios del mismo producto.

c) Paneles tipo Stud-Frame, formado con una lámina como el anterior pero reforzada con una estructura metálica tubular (que se ancla a la estructura principal del edificio), unida al GRC con conectores.



Figura 10. Tipos de paneles GRC existentes

Los diversos tipos de paneles GRC se utilizan a menudo en fachadas de edificios por su rapidez en ejecución. Por ello es interesante ver la diferencia de precios entre los tres tipos de fachada GRC realizados con cemento tradicional y con cemento fotocatalítico TX-Active según el banco de precios del CYPE:

Tipo de Panel	Precio m <sup>2</sup> fachada de panel realizado con cemento tradicional	Precio m <sup>2</sup> fachada de panel realizado con cemento fotocatalítico	Porcentaje de incremento de precio
Paneles tipo Sandwich	125,61	141,37	12,5%
Paneles tipo cascara o nervado	119,17	131,78	10,5%
Paneles tipo Stud-Frame	132,08	144,68	9,5%

Como es lógico los paneles con más porcentaje de GRC son los que se encarecen más cuando se utiliza cemento fotocatalítico, siendo el porcentaje en todos los casos bastante reducido (de un 9,5% a un 12,5%).

En cuanto a la reducción de gases NO<sub>x</sub>, a continuación se pueden ver los resultados sacados directamente del informe del ensayo de la capacidad descontaminante de las

muestras de paneles GRC realizados con cemento de TX-Active expuestos a una intensidad UV-A de  $20\text{mW/cm}^2$ . Dicho ensayo fue realizado por Italcementi Group para la tesis doctoral “Estudio de las formas de aplicación de la fotografía sobre los materiales pétreos para la arquitectura” de Ricardo Santonja Jiménez. En la tabla 1 se observan los diversos porcentajes de reducción de gases  $\text{NO}_x$  según si la muestra tiene su superficie original o esta decapada con láser y presenta zonas rugosas:

Reference	Surface	Initial reference	NO reduction (%)	NO <sub>2</sub> reduction (%)	NO <sub>x</sub> reduction* (%)
1200911BET	Smooth	001	59	44	52
1200912BET	Smooth	002	65	48	58
1200913BET	Mix smooth and rough	F501	48	39	44
1200914BET	Mix smooth and rough	F502	49	35	43
Reference			47	35	41

\*  $\text{NO}_x$  concentration is defined as the sum of  $\text{NO}$  and  $\text{NO}_2$  concentration.

Tabla 1. Reducción de  $\text{NO}_x$  en las muestras de GRC fotocatalítico

Como se ve los resultados más favorables, es decir de superficie sin decapar con láser que es el estado en el que nos la encontraríamos en obra, dieron unos resultados de una reducción de hasta el 65% de  $\text{NO}$  y del 58% de  $\text{NO}_x$  (suma de  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ ).

### Fachada ligera sin ventilar de mortero monocapa

Los morteros monocapa es un revestimiento exterior que surgió como consecuencia de la evolución tecnológica de los morteros de cemento por lo que se puede decir que es una variante moderna de los productos de toda la vida para revestimientos continuos.

Como sabemos, la fachada realizada con un revestimiento de mortero monocapa es una de las más extendidas a nivel de vivienda puesto que los materiales de producción del monocapa se controlan fácilmente y se puede aplicar de forma rápida aunque la mano de obra no sea del todo especialista.

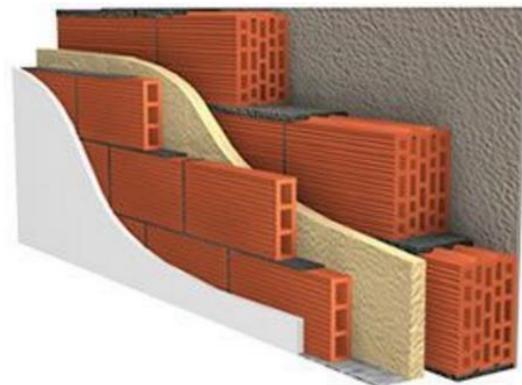


Figura 11. Fachada mortero monocapa

Su aplicación en fachadas de obra nueva suele darse mayoritariamente sobre ladrillo en cualquiera de sus formatos y algunas veces sobre bloque de hormigón. En obras de reforma y rehabilitación se suele aplicar sobre mortero de cal o mixto y mampostería. A la izquierda vemos un detalle de un ejemplo de fachada revestida con mortero monocapa cuya composición de dentro a fuera es yeso, tabique, lana de roca, ladrillo ligero y revestimiento monocapa.

Al ser una de las fachadas más extendidas tanto en obra nueva como en rehabilitación es de gran interés analizar cuál sería el sobrecoste de utilizar un cemento fotocatalítico TX active en el mortero monocapa en vez de uno tradicional así como los gases NO<sub>x</sub> que puede conseguir eliminar este material.

Precio m <sup>2</sup> revestimiento exterior mortero monocapa	Precio m <sup>2</sup> revestimiento exterior mortero monocapa fotocatalítico	Porcentaje de incremento de precio
21,59	26,14	21%

Como vemos, el incremento en el revestimiento fotocatalítico es de un 21%, mayor que en el caso de la fachada GRC puesto que en este caso el material únicamente es mortero y no intervienen otros materiales.

Por otro lado se ha calculado el incremento de precio de utilizar un cemento fotocatalítico en el monocapa pero siendo un porcentaje calculado sobre el precio de toda la fachada:

Precio m <sup>2</sup> hoja exterior de fachada de ladrillo cerámico para revestir	Precio m <sup>2</sup> aislamiento por el interior en fachada de doble hoja de fábrica para revestir	Precio m <sup>2</sup> hoja de partición interior de ladrillo para revestir	Precio m <sup>2</sup> guarnecido de yeso	Precio m <sup>2</sup> enlucido de yeso	Precio total fachada sin monocapa
20,50	7,87	14,27	7,30	1,70	51,64

Precio m <sup>2</sup> fachada de ladrillo recubierta de mortero monocapa	Precio m <sup>2</sup> fachada de ladrillo recubierta de mortero monocapa fotocatalítico	Porcentaje de incremento de precio
73,23	77,78	6,2%

Como vemos, en este caso el incremento porcentual es menor puesto que intervienen muchos más materiales en la realización de la fachada.

Ahora vamos a estudiar que potencial de reducción de gases NO<sub>x</sub> tiene el mortero monocapa fotocatalítico. Como no se han encontrado datos de ensayos con este material específico nos guiamos en la bibliografía que nos dice que en uno de los primeros ensayos in situ en el que se utilizó un mortero fotocatalítico que contenía TX Active. El mortero se utilizó para cubrir la superficie asfáltica de un tramo de carretera en Segrate (Milán) cuya monitorización reveló que se había producido una reducción de aproximadamente el 60% en el nivel de NO<sub>x</sub> del lugar.

Por otro lado, en la tesis doctoral anteriormente nombrada del Dr. Ricardo Santonja Jiménez también se muestran los resultados de una serie de ensayos de mortero fotocatalítico realizados por el grupo Italcementi Group. Para hacernos una idea más clara de la reducción

de los gases  $\text{NO}_x$ , se ha realizado la media de los diferentes resultados, tanto los encontrados en la tesis de R. Santorja como el que nos proporciona Italcementi Group en su ficha técnica sobre la reducción medida en el tramo de carretera, y se muestran en la tabla siguiente:

Test NOx			
Localización	% reducción NO	% reducción $\text{NO}_2$	% reducción $\text{NO}_x$
Muestra 1	59	44	52
Muestra 2	65	48	58
Muestra 3	48	39	44
Muestra 4	49	35	43
Carretera Seggrate	-	-	60
Media	55,25	41,5	51,4

Tabla 2. Media de los diversos resultados encontrados sobre reducción de  $\text{NO}_x$  por morteros fotocatalíticos

Por lo tanto vemos que el porcentaje de la reducción de la concentración de los gases  $\text{NO}_x$  (suma de los NO y  $\text{NO}_2$ ) se encuentra alrededor del 50% (51,4). Este resultado nos puede servir como porcentaje orientativo de un mortero monocapa aunque la composición no termine de ser la misma.

### Fachada ligera sin ventilar de mortero monocapa con acabado de pintura

Para rehabilitar una fachada se pueden llevar a cabo distintos procedimientos: proteger el material exterior con un tratamiento invisible, aplicar un mortero monocapa, revestirla de otro material (piedra, cerámica, etc.) y como no, aplicarles una mano de pintura para exterior.

La pintura es seguramente una de las soluciones más habituales y económicas para tratar las fachadas. Se suele aplicar sobre mortero, cemento, hormigón, piedra y ladrillo, no solo porque al pintar el edificio se embellece, sino porque además se protegen los paramentos de las inclemencias del tiempo.

Por lo tanto, al ser una de las opciones más recurrentes de mantenimiento de fachadas es interesante ver el incremento de precio de realizar la aplicación con pintura tradicional o con pintura fotocatalítica. El precio de pintado con pintura fotocatalítica expuesto a continuación está extraído de la base de datos de acae para Presto en el que participa el fabricante Keim de pintura de todo tipo. Y por otro lado, el precio de pintado con pintura tradicional está extraído de la base de datos del CYPE.

Precio $\text{m}^2$ pintura al silicato sobre paramentos exteriores	Precio $\text{m}^2$ pintura al sol-silicato fotocatalítica KEIM Soldalit-ME con acabado liso sobre paramento vertical exterior	Porcentaje de incremento de precio
11,58	12,54	8%

En el caso de utilizar una pintura fotocatalítica al sol-silicato como acabado de una fachada en vez de una pintura tradicional al silicato, únicamente supondrá un incremento de un 8% en el precio de la partida.

En el caso de que la pintura fotocatalítica se utilice en obra nueva, el incremento que supondrá en el precio total de la fachada, poniendo el ejemplo anterior de una fachada con acabado monocapa, será el siguiente:

Precio m <sup>2</sup> fachada sin ventilar ligera de ladrillo con acabado monocapa		73,23 €* <sup>*</sup>
Precio m <sup>2</sup> fachada de ladrillo recubierta de mortero monocapa y acabado de pintura al silicato	Precio m <sup>2</sup> fachada de ladrillo recubierta de mortero monocapa y acabado de pintura al sol-silicato fotocatalítica KEIM Soldalit-ME	Porcentaje de incremento de precio
84,81	85,77	1,1%

\*El precio se extrae del apartado anterior donde había sido calculado

Como vemos, en este caso el incremento porcentual que supone el utilizar una pintura fotocatalítica en vez de una tradicional en el precio final de la realización de una fachada de obra nueva es ínfimo. En el caso del precio de pintura ya era muy bajo y aquí al intervenir muchos más materiales resulta casi imperceptible. Además, los descensos de NO<sub>x</sub> que producen superficies tratadas con dicha pintura son bastante relevantes en comparación con el precio.

A continuación se muestran los resultados de la reducción de NO<sub>2</sub> en el ensayo in situ que llevó a cabo la empresa Keim a lo largo de un día. Como vemos, las medidas van variando por las diferentes potencias de radiación solar que se den a cada hora del día además de la variación de otros factores que también intervienen en la fotocatalisis.

#### Ensayo de intemperie sobre la reducción de NO<sub>2</sub> con KEIM Soldalit-ME

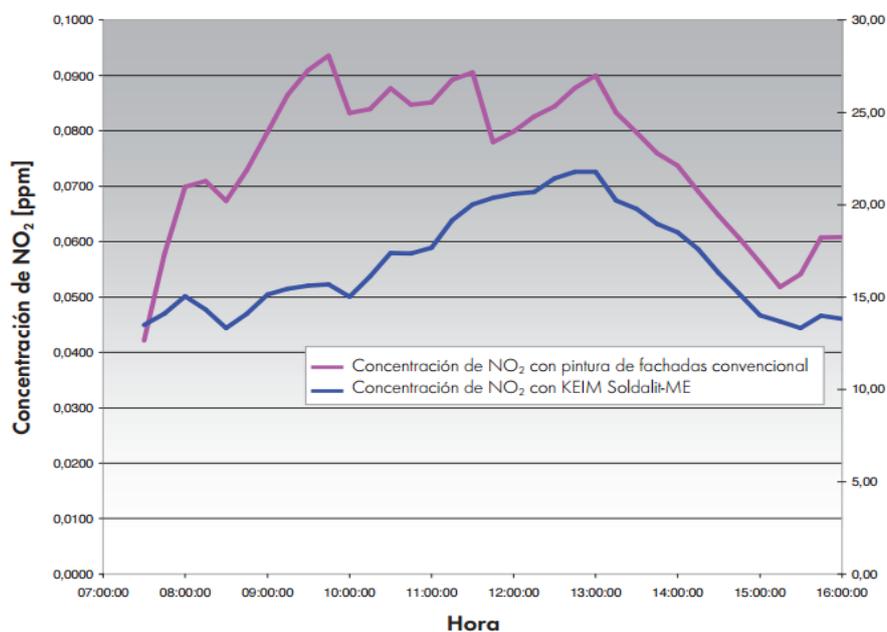


Gráfico 6. Reducción de NO<sub>2</sub> por la pintura fotocatalítica Keim Soladit-ME en el ensayo realizado in situ

Para el ensayo in situ, la empresa construyó una “calle simulada” en la cual se forzó una aportación constante de óxidos de nitrógeno durante un tiempo prolongado. La pintura Soladit-ME aportaba una reducción de  $\text{NO}_2$  que oscilaba entre el 10% y el 50% a lo largo del día siendo mayores los porcentajes cuando el sol más incidía.

### 8.1.2. Discusión del resultado

Esta segunda parte del caso de estudio tuvo como propósito identificar dentro del grupo de fachadas escogidas, por ser las más comunes en utilización de materiales fotocatalíticos, las que tenían un sobrecoste debido a dicha utilización más reducido.

Paralelamente también se pretendía averiguar cuáles eran las tipologías de fachadas que más nos podrían ayudar a limpiar el aire de los núcleos urbanos por poseer un mejor comportamiento descontaminante de los gases  $\text{NO}_x$ .

De los resultados obtenidos en esta búsqueda, se puede concluir diciendo que la mejor relación en cuanto a sobrecoste y reducción de los gases  $\text{NO}_x$  la tienen las fachadas ligeras sin ventilar de fábrica de ladrillo con recubrimiento de mortero monocapa fotocatalítico, y aún mejor todavía por su precio el mismo modelo de fachada pero con mortero tradicional y acabado con pintura fotocatalítica.

Se debe tener en cuenta que el ensayo de este último tipo de fachada se realizó al aire libre con una radiación variante según la hora, y ni mucho menos la más óptima en las horas de mayor incidencia de radiación. Esto no ocurre en los ensayos de laboratorio donde la radiación posee una potencia bastante alta y constante y además se proporciona con lámparas a una distancia cercana a la superficie fotocatalítica. Por lo tanto, los ensayos nos proporcionan valores de reducción de gases de  $\text{NO}_x$  más altos que las pruebas realizadas en campo, como por ejemplo, el 58% que se obtiene en los ensayos de los paneles GRC.

Por otro lado, los tratamientos de  $\text{TiO}_2$  realizados en el muro cortina nos proporcionan unos valores bastante bajos de descontaminación ya que están destinados mayoritariamente a proporcionarle al vidrio la característica principal de autolimpieza y ya con un papel secundario la de descontaminación.

Finalmente, en el caso de los paneles GRC, los valores anteriormente nombrados de descontaminación son óptimos pero al ser espesores más grandes los que contienen partículas de fotocatalizador el precio termina encareciéndose más que en el resto de los casos cuando se utiliza la opción descontaminante.

## **9. CONCLUSIONES**

En cuanto a la calidad del aire que respiramos, hemos visto que España es un país altamente contaminado. El 95% de la población está respirando aire contaminado según el último informe de Ecologistas en Acción basándose en las recomendaciones de la OMS. De este porcentaje, los más afectados son los habitantes de las ciudades, unos 10 millones de personas. Estos sufren, además de los altos niveles de O<sub>3</sub> troposférico, los NO<sub>x</sub> producidos por la oxidación de los gases de combustión originados por los vehículos y las industrias.

A este se le une una aparente falta de “voluntad política” para cumplir un plan de mejora de la calidad del aire promoviendo u obligando a desarrollar estrategias que reduzcan la producción de estos gases contaminantes entre otros.

Por ello, desde una vertiente técnica, se ha querido informar y fomentar el uso de materiales descontaminantes aplicados al sector de la construcción a través de este documento. Estos materiales están basados en la actividad fotocatalítica de uno de sus componentes (fotocatalizador), que por su precio y eficacia suele ser TiO<sub>2</sub>, y está ubicado en la superficie del elemento constructivo. El fotocatalizador utiliza luz solar y oxígeno para reaccionar químicamente con los compuestos contaminantes y descomponerlos volviéndolos así inocuos. Este proceso, en teoría, no se agota en el tiempo, ya que el catalizador no se modifica químicamente, siempre y cuando la superficie mantenga sus propiedades originales. Pero esto último en la práctica no suele suceder, ya que a largo plazo la suciedad y partículas se van adhiriendo a la superficie fotocatalítica y van reduciendo su rendimiento. Se ha visto que existen en el mercado una gran variedad de elementos y materiales que incluyen en sus propiedades la actividad fotocatalítica. Esto además de conllevar la limpieza del aire que los rodea de gases NO<sub>x</sub>, les atribuye paralelamente, también otras características como la de autolimpieza, muy útil en fachadas o muros exteriores y la de desinfección, interesante sobre todo para espacios habitados por la población más vulnerable.

Como se ha podido ver en el caso de estudio, se trata de materiales con un coste añadido únicamente de entre un 5-10% más que los materiales convencionales. Este sobrecoste, la todavía escasa industrialización y variedad de productos en el mercado y el desconocimiento aún por parte de muchos proyectistas tanto del producto como de sus precios aproximados propician que sean materiales que se utilizan en proyectos muy puntuales y sobretodo proyectos promovidos por la administración.

Por otro lado, se ha visto también que la reducción de gases NO<sub>x</sub> producida por estos materiales una vez se han colocado en obra oscila entre un 10%-65% dependiendo de la radiación. Pero teniendo en cuenta que este efecto es constante las 24h del día es una cantidad nada despreciable que puede mejorar la calidad de vida de los habitantes de las ciudades produciendo un ahorro de gran magnitud en los gastos de salud pública.

Estas soluciones constructivas, para que tengan un gran impacto, deben globalizarse. Es decir, se deben crear sistemas constructivos urbanos inteligentes que potencien ciudades más saludables y que actúen en beneficio del medio ambiente y de los ciudadanos.

Pero aun entendiendo y recomendando estos nuevos sistemas constructivos, su divulgación no se hará posible sin la ayuda de las administraciones públicas, ya sea mediante el obligado cumplimiento de la implantación de estos materiales fotocatalíticos en obra nueva y rehabilitación o mediante subvenciones que cubran el sobrecoste que tienen dichos materiales sobre los tradicionales. Por ello, son necesarias y recomendables nuevas políticas promotoras y una normativa que sea, agente y motor, incentivador de estas tecnologías en la arquitectura.

En conclusión, estamos ante una tipología de materiales, con un gran número de cualidades positivas, que hace falta promover para ir aumentando progresivamente su implantación.

## **10. BIBLIOGRAFÍA**

- Adamson, I.Y.R., Vincent, R., Bjarnason, S.G. (1999). *Cell Injury and Interstitial Inflammation in Rat Lung after Inhalation of Ozone and Urban Particulates*. Am. J. Respir. Cell Mol. Biol. 20(5) págs.1067-1072.
- Adamson, I.Y.R., Prieditis, H., Hedgecock, C., Vincent, R. (2000). *Zinc Is the Toxic Factor in the Lung Response to an Atmospheric Particulate Sample*. *Toxicology and Applied Pharmacology* 166, (2) págs. 111–119.
- Almazán, D., Rovito, G, (2012). *Evaluación del Comportamiento de los Pavimentos Descontaminantes*. Jornadas Nacionales de ASEFMA en Madrid.
- Anpo, M., y M. Takeuchi. (2003). *The design and development of highly reactive titanium oxide photocatalysts operating under visible light irradiation*. *Journal of Catalysis*, Vol. 216, págs. 505-516.
- Ao, C.H., S.C. Lee, C.L. Mak, y L.Y. Chan. (2003). *Photodegradation of volatile organic compounds (VOCs) and NO for indoor air purification using TiO<sub>2</sub>: promotion versus inhibition effect of NO*. *Applied Catalysis B: Environmental* Vol.42, págs.19-129.
- Asociación Ibérica de Fotocatálisis. (2012) *Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas*. CONAMA (Congreso Nacional de Medio Ambiente).
- Banerjee S.; Gomal J.; Muraleedharan P.; Tyagi A.K. & Raj, B. (2006). *Physics and chemistry of photocatalytic titanium dioxide: Visualization of bactericidal activity using atomic force microscopy*. *Current Science*, Vol. 90. págs. 1378-1383.
- Bilmes, S. A., Candal, R. J., Arancibia, A. y Rodríguez, J. *Fotocatálisis Asistida por Potencial*. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea, Cap VIII. Texto colectivo red CYTED. Págs. 215-240.
- Boonen, E., Beeldens, A. (2014). *Photocatalytic Applications for Air Purification in Belgium*. *Coatings*, Vol. 4, Págs. 553-573.
- Candal, R. J., Aldabe, S., Blesa, M. A. (2004). *Semiconductores con Actividad Fotocatalítica*. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea, Cap IV. Texto colectivo red CYTED. Págs. 97-122
- Candal, R. J., Rodríguez, J., Colón, G., *Materiales para Fotocatálisis y Foelectrocatalisis*. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea, Cap. VII. Texto colectivo red CYTED. Págs. 189-210
- Chen, J., Poon, C. (Sept. 2009) *Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications*. *Building and Environment*. Vol. 44, Issue 9, Págs. 1899-1906.

Cohen, Juan D., Narváez, Leonardo. (2012) *Aplicación de la fotocatalisis heterogénea solar para la degradación de residuos farmacéuticos en efluentes líquidos*. Universidad de Cartagena, Programa de Ingeniería química.

Díaz, J., y Linares, C. (2010). *Las causas de la contaminación atmosférica y los contaminantes atmosféricos más importantes*. Observatorio de Medio Ambiente en España. DKV Seguros y ECODES.

Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (21 de mayo de 2008) relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.

Ecologistas en acción. (2014). *Informe: La calidad del aire en el Estado español durante 2013*.

Garcés, L. F., Mejía, E. A., Santamaría, J. J. *La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. Revista Lasallista de investigación. Vol 1. Nº1. Págs. 83-92.

Herrmann, J.M. *Solar Safe Water. Capítulo 10. Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocatalisis heterogénea*. Laboratorio de Química del Medioambiente, (LACE, UMRr CNRnrS Nn°5634). (153 págs.)

Jaramillo, C. A., Taborda, G. (2006). *La fotocatalisis: aspectos fundamentales para una buena remoción de contaminantes*. Revista Universidad de Caldas, págs. 71-88.

Jiménez, L. M., Jiménez, D., Prieto, F. (2007). *Calidad del aire en las ciudades clave de sostenibilidad urbana*. Observatorio de la sostenibilidad en España (379 págs.)

PICADA. 2001. *Project. Photocatalytic Innovated Coverings Applications for Depollution Assessment (PICADA)*. Guideline for end-users, GROWTH Project GRD1-2001-40449.

Portela, R. (2008). *Eliminación fotocatalítica de H<sub>2</sub>S en aire mediante TiO<sub>2</sub> soportado sobre sustratos transparentes en el UV-A*. Doctorado por la Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela.

Querol, X. (2008). *Calidad del aire, partículas en suspensión y metales*. Xavier Querol. Rev Española de Salud Pública; Vol. 82: págs..447- 454.

Rodríguez, J., Candal, R. J., Solis, J., Estrada, W. y Blesa, M. (2005). *Capítulo 9, El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones in Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*. Miguel Blesa y Julián Blanco Gálvez Ed. Buenos Aires, Argentina.

Sánchez, B., Cardona, A., Peral, J. y Litter, M.I. (2001). *Purificación de gases por fotocatalisis heterogénea: Estado del arte*. Eliminación de Contaminantes por Fotocatalisis Heterogénea, Editorial CYTED, La Plata, Argentina. ISBN: 987-43-3809-1. págs. 27-50. 2001.

Sunada,K.; Watanabe, T.; Hashimoto, K. (2003). *Studies on photokilling of bacteria on TiO<sub>2</sub> thin film*. J. Photoch, Photobio, Vol. 156, págs. 227-233.

## Documentación electrónica

Web de educación ambiental: <http://www.jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf2c.html>  
(Fecha de última consulta 13/09/2015)

Web de Asociación Ibérica de Fotocatálisis, AIF: <http://www.fotocatalisis.org/>  
(Fecha de última consulta 24/10/2015)

Web de la Agencia Europea de Medio Ambiente, AEMA (European Environmental Agency).  
<http://www.eea.europa.eu/es> (Fecha de última consulta 15/09/2015)

Web del generador de precios de la construcción de CYPE Ingenieros.  
<http://www.generadordeprecios.info/> (Fecha de última consulta 16/12/2015)

Web empresa de pintura fotocatalítica Keim <http://www.keim.es/> (Fecha de última consulta 19/12/2015)

Web de la base de precios de la construcción del gobierno de Extremadura:  
<http://basepreciosconstruccion.gobex.es/> (Fecha de última consulta 13/01/2015)

Web banco de precios de la construcción del ITEC: <http://itec.cat/nouBedec.c/bedec.aspx>  
(Fecha de última consulta 15/01/2015)

Web de base de datos de precios por empresa de acae para Presto: [www.acae.es](http://www.acae.es)  
(Fecha de última consulta 18/01/2015)

Tesis Doctoral Ricardo Santonja Jiménez:  
[http://oa.upm.es/14853/1/RICARDO\\_SANTONJA\\_JIMENEZ\\_1.pdf](http://oa.upm.es/14853/1/RICARDO_SANTONJA_JIMENEZ_1.pdf)  
(Fecha de última consulta 19/01/2015)



## **11. AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, me gustaría agradecer a la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona de la UPC la posibilidad de poder realizar este trabajo fin de master dentro del Master Universitario de Edificación, el cual he disfrutado mucho llevándolo a cabo.

Y como no, en especial me gustaría agradecer a mi tutora Laia Haurie, por darme la oportunidad de realizar este trabajo final de máster bajo su supervisión, por apoyarme, aconsejarme y saber proponer opciones de cambio cuando las líneas de trabajo escogidas no terminaban de dar los frutos esperados.

También agradecer a mi familia el apoyo moral, en especial a mi padre por ayudarme día a día y poder sacar así tiempo para realizar el trabajo.

Y por último también agradecer a mis amigos y compañeros de la EPSEB por la fuerza y los consejos brindados para poder llevar a cabo este trabajo que tanta dedicación ha llevado, sobre todo al final para poder terminarlo con éxito.



## **12. CONTENIDO DEL CD**

- Archivo PDF: “Resumen”
- Archivo PDF: “Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción”