

Nanopartículas de TiO₂ fotocatalíticas incorporadas en materiales de construcción. ¡Construyamos edificios inteligentes!

Photocatalytic TiO₂ nanoparticles incorporated into building materials. Let's build smart buildings!

Luis Felipe Rodríguez-Alfaro,* Edith Luévano-Hipólito,*[†] Leticia Myriam Torres-Martínez*

ABSTRACT: A high concentration of air pollutants is being produced in the world's metropolitan areas because of the growing number of vehicles, factories, industries, and construction sites, causing severe air quality, public health, and structural deterioration. In recent years, to address these problems, photocatalytic building materials have emerged as a new alternative technology to remedy urban air pollution and maintain the aesthetics and functionality of infrastructures. Large surface areas are exposed to the sun in any infrastructure providing the optimal conditions for applying photocatalytic solutions. The great interest in this technology has encouraged the creation of many intelligent building materials with photocatalytic properties by incorporating TiO₂ nanoparticles. A wide variety of products are currently available in the market, such as paints, windows, stucco, pavement, cement, etc. The aim of this study is to make a comprehensive review of the photocatalytic process, its properties, its applications in the construction industry, and the problems and limitations of this technology.

KEYWORDS: photocatalytic building materials, nanoparticles, TiO₂, photocatalysis, air purification.

RESUMEN: En las grandes áreas metropolitanas del mundo se está generando una alta concentración de contaminantes atmosféricos, producto del creciente número de vehículos, fábricas, industrias y construcciones, los cuales están propiciando serios problemas de calidad del aire, de salud pública y de deterioro estructural. Para abordar estos problemas, el uso, en los últimos años, de los materiales de construcción fotocatalíticos ha surgido como una nueva tecnología alternativa para remediar la contaminación de la atmósfera urbana, mantener la estética y la funcionalidad de las infraestructuras. Las grandes áreas superficiales expuestas al sol de cualquier infraestructura proporcionan las condiciones óptimas para la aplicación de materiales fotocatalíticos. El gran interés por esta tecnología ha alentado la creación de diversos materiales de construcción inteligentes con propiedades fotocatalíticas, al incorporarles nanopartículas de TiO₂. Por ese motivo, hoy en día se dispone de una gran variedad de productos, tales como pinturas, vidrio, estucos, pavimentos, cementos, entre muchos otros, cuya aplicación se ha promovido recientemente. El propósito del presente trabajo es hacer una revisión integral del proceso fotocatalítico, sus propiedades y sus aplicaciones en la industria de la construcción, así como de los problemas y limitaciones de esta tecnología.

PALABRAS CLAVE: materiales de construcción fotocatalíticos, nanopartículas, TiO₂, fotocatálisis, purificación del aire.

Recibido: 27 de febrero, 2022.

Aceptado: 9 de enero, 2023.

Publicado: 9 de marzo, 2023.

* Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil–Departamento de Ecomateriales y Energía.

[†]Autora de correspondencia: edith.luevanohp@uanl.edu.mx



Introducción

La atmósfera es un bien indispensable para la vida del que todas las personas deben tener tanto el derecho de su uso como la obligación de su conservación. Por lo anterior, la preservación de la calidad del aire debería ser un tema prioritario de cualquier política ambiental en el mundo, por su condición de recurso clave para la vida misma y por los daños que de su contaminación pueden derivarse para la salud humana. Desafortunadamente, esto no es así, pues existe una ineficiente planeación a mediano y largo plazo por parte de muchos de los países del orbe para mejorar la calidad de vida de su población (Gopalan *et al.*, 2020). Todas las evaluaciones efectuadas en esta materia ponen de manifiesto que, a pesar de las medidas puestas en marcha, tanto los niveles de contaminación como los efectos adversos asociados con estos, siguen resultando muy significativos, particularmente en las aglomeraciones urbanas (Pulvirenti *et al.*, 2020). Además, los más recientes estudios confirman que, de no adoptarse nuevas e inminentes medidas, los problemas ambientales y de salud se recrudecerán en el futuro (Russell *et al.*, 2021).

En la atmósfera existen diferentes tipos de contaminantes que repercuten negativamente tanto en los seres humanos, como en el medio ambiente y en los materiales de construcción. Entre ellos, existen seis considerados como “contaminantes criterio” que son monitoreados por sus efectos adversos en los ecosistemas y en la salud de la población. Estos son: el monóxido de carbono (CO), el ozono troposférico (O_3), el plomo (Pb), el material particuliar (PM), el dióxido de azufre (SO_2), y, los óxidos de nitrógeno (NO_x) (Zhou *et al.*, 2019). La mayoría de estos contaminantes se generan durante procesos de combustión a altas temperaturas y por la quema incompleta de combustibles fósiles, principalmente en los motores de los vehículos móviles. Así las cosas, este se vuelve un problema relacionado con ambientes urbanos donde existe un enorme parque automotor. Estas emisiones producen una diversidad de problemas en la salud de la población, daños estructurales en los inmuebles, así como efectos ambientales negativos sobre el planeta. La emisión de estos seis contaminantes altamente reactivos a la atmósfera puede iniciar una cascada de procesos químicos que tienen un impacto devastador en la salud humana y en el ecosistema; por lo cual, existen acciones tanto políticas como tecnológicas para reducir su concentración en los ambientes urbanos (Russell *et al.*, 2021). Una tecnología potencial para el abatimiento de los contaminantes atmosféricos es la fotocatálisis heterogénea aplicada en materiales utilizados para la construcción. Estos materiales pueden ser de varios tipos, pero los más estudiados son el concreto (Han *et al.*, 2017a) y el asfalto (Fan *et al.*, 2017), los cuales pueden ser mezclados o rociados con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), el fotocatalizador empleado por excelencia (Hamidi y Aslani, 2019).

Desde hace años se estudia la incorporación de nanopartículas específicamente diseñadas en materiales de construcción tradicionales (por ejemplo, re-



cubrimientos, pinturas, vidrio, pavimentos, etc.), los cuales otorgan nuevas propiedades y funcionalidades, como la autocompactación, la autocuración, la resistencia al desgaste, a la degradación fotocatalítica de algunos contaminantes criterio, al material original, mejorando la estabilidad, longevidad y funcionamiento de las infraestructuras (Han *et al.*, 2017b). Además, la incorporación de estas nanopartículas en los materiales de construcción promueve en algunos casos, la reducción de los costos de ciclo de vida, el consumo de recursos y la contaminación ambiental. A estos nuevos materiales se les conoce como “materiales inteligentes” (Khitab *et al.*, 2014). Entre las incorporaciones más importantes se encuentra la adición de nanopartículas fotocatalíticas que le otorga las propiedades de descontaminación, autolimpieza y propiedades antimicrobianas al material de construcción empleado (Pietrzak *et al.*, 2016). Diversos estudios sobre estos materiales han demostrado resultados positivos y altamente prometedores, por lo cual han sido aplicados exitosamente en varios campos dentro de la industria para fabricar diferentes tipos de materiales. En consecuencia, hoy en día se considera a la nanotecnología como la nueva tendencia en la industria de la construcción (Papadaki *et al.*, 2018), al permitir el mejoramiento de sus propiedades químico estructurales a partir de la adición de nanopartículas con propiedades fotocatalíticas. El dióxido de titanio como fotocatalizador es un ejemplo de nanotecnología, al presentar en escala nanométrica propiedades fotocatalíticas que le proporcionan la capacidad de eliminar contaminantes nocivos de la atmósfera, al ser activado con energía solar y vapor de agua (Pietrzak *et al.*, 2016), además de repeler partículas de polvo permitiendo mantener limpias las infraestructuras por más tiempo gracias a su propiedad de autolimpieza.

Proceso fotocatalítico

Se denomina catálisis al proceso donde una reacción química es acelerada mediante la participación de una sustancia denominada catalizador. En la fotocatálisis, este catalizador suele tener las propiedades de un material semiconducto el cual, al igual que un conductor o un aislante, se caracteriza por tener bandas de energía (Folli *et al.*, 2010). Dichas bandas se generan por la gran cantidad de átomos presentes en un material sólido que, al estar tan cerca unos de otros, configuran niveles de energía en forma de bandas, donde cada una tiene una energía diferente, y en su estado fundamental los electrones tienden a llenar estas bandas iniciando desde la más baja hasta la más alta, de forma similar a como los electrones ocuparían los orbitales en un átomo. La banda de energía más alta, la análoga al orbital molecular ocupado más alto (*highest occupied molecular orbital*, HOMO), se llama banda de valencia. La siguiente banda más abajo, la análoga al orbital molecular desocupado más bajo (*lowest unoccupied molecular orbital*, LUMO) se llama banda de conducción. Ambas bandas de energía están separadas por una diferencia de energía (E_g), denominada banda prohibida (*band gap*). Para que un electrón fluya entre las

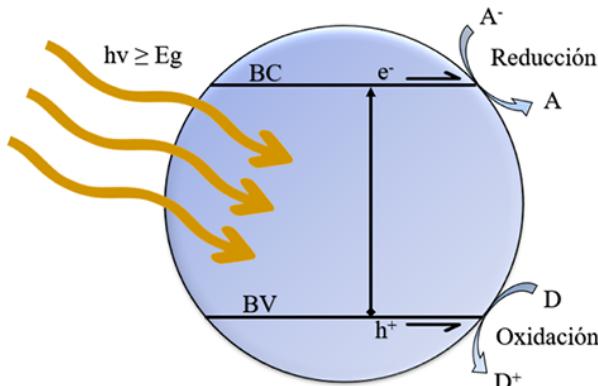
bandas en un material semiconductor sólido, es necesaria la aplicación de radiación electromagnética y que tenga acceso también a una banda energética vacía cercana (Ayyub y Rao, 2020). En un material conductor, como los metales, la banda de valencia y de conducción están sobreuestas o muy cercanas entre sí, lo cual provoca que los electrones se muevan libremente a través de ellas y accedan fácilmente a las áreas energéticas vacías. En contraparte, en un material aislante los electrones no llegan a fluir entre las capas debido a que la banda de conducción se encuentra demasiado alejada para que los electrones puedan acceder a ella y en general la banda de valencia se encuentra completamente llena de electrones. Sin embargo, en un material semiconductor al estar en un punto intermedio entre ambos, conductor y aislante, la separación entre bandas no es muy alta y al aplicarse una cierta energía electromagnética suficiente, los electrones pueden llegar a fluir desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, creando así lo que se denomina el par electrón-hueco. Esta energía electromagnética es de apenas unos pocos electronvoltios (eV) y es propia de cada material semiconductor (Tong *et al.*, 2012).

Cuando la activación del catalizador implica la absorción de luz (fotón, $h\nu$) por parte de este, entonces hablamos de fotocatálisis, y el catalizador se denomina comúnmente fotocatalizador. La fotocatálisis engloba un conjunto de reacciones químicas de oxidación-reducción (redox) que se producen en la superficie del material semiconductor cuando estos son irradiados con luz natural o artificial a una longitud de onda (λ) igual o superior a la energía de banda prohibida del material a utilizar (Gołąbiewska *et al.*, 2018). Este proceso se desarrolla frecuentemente en un tipo de fotocatálisis denominada “heterogénea”, pues el medio y el fotocatalizador se encuentran en fases distintas (gas-sólido o líquido-sólido). Sin suficiente o nada de excitación fotónica, el fotocatalizador permanecerá en su estado fundamental donde los electrones estarán confinados en la banda de valencia. Sin embargo, una vez que un fotón con una energía igual o superior a la energía de la banda prohibida ($h\nu \geq E_g$) impacta sobre el semiconductor, los electrones son promovidos a la banda de conducción, dentro de una escala de tiempo de femtosegundos (Hoffmann *et al.*, 1995). La transición de estos electrones conduce a huecos (electrones vacantes) que quedan en la zona de la banda de valencia, produciendo los pares electrón-hueco, es decir, electrones activos (e^-) en la banda de conducción y huecos positivos (h^+) en la banda de valencia. Estos pares electrón-hueco generados, designados como portadores de cargas libres, pueden, a su vez, migrar a la superficie del semiconductor propiciando una transferencia electrónica con sustancias adsorbidas en la superficie del material. Por una parte, los electrones reducen a un aceptador de electrones (A) y, por otro lado, los huecos aceptan electrones de una especie donadora de electrones (D), de manera que esta última se oxida (Bajorowicz *et al.*, 2018) (figura 1).

A la par de este proceso, se generan tres rutas probables para los pares electrón-hueco recién formados (Tahir *et al.*, 2020): 1) que ocurra una recom-



FIGURA 1. Ilustración esquemática del proceso de fotocatálisis de un semiconductor.



$h\nu$ = fotón de energía; E_g = energía de banda prohibida; BV = banda de valencia; BC = banda de conducción; h^+ = hueco positivo; e^- = electrón; A = especie aceptadora de electrones; D = especie donadora de electrones.

Fuente: Elaboración de los autores.

binación electrónica en la superficie o dentro del photocatalizador (recombinación), en donde los electrones pierden energía y vuelven a su estado de equilibrio al ocupar nuevamente un nivel más abajo de energía (banda de valencia); 2) que los electrones liberados se lleguen a espaciar sobre la superficie del photocatalizador y reaccionen con las moléculas de oxígeno circundantes (O_2 , especie aceptadora de electrones) presente en la atmósfera, para producir radicales de oxígeno reactivo (O_2^-) (fotorreducción); 3) o que los huecos generados en la banda de valencia oxiden a las moléculas de agua (H_2O , especie donadora de electrones) para formar radicales hidroxilos altamente oxidantes (OH^-) (fotooxidación). Los radicales hidroxilos (OH^-) y los superóxidos (O_2^-) generados sobre la superficie del TiO_2 han demostrado una gran capacidad para desactivar diferentes microrganismos, una gran variedad de contaminantes orgánicos y otros compuestos inorgánicos, tales como gases NO_x y SO_x (Zhou *et al.*, 2019).

TiO₂ como photocatalizador

A pesar de que existe una gran variedad de materiales semiconductores reportados, solo unos pocos llegan a ser efectivos como photocatalizadores. Idealmente, un semiconductor con capacidad photocatalítica debería ser un material estable, efectivo, ecológico, abundante, fácil de producir, de usar, que sea económico, y que además sea activado con luz visible (Grabowska *et al.*, 2018). De ser así, no sorprendería que ningún semiconductor se ajuste por completo a esta lista ideal; no obstante, existen ciertos materiales semiconductores que cumplen con varias de estas características idóneas y que se han utilizado para llevar a cabo la reacción photocatalítica, siendo los más relevantes: TiO_2 ,



ZnO, CdS, Fe₂O₃, SnO₂, BiO_x, PbS, ZnS y el WO₃, aunque la mayoría aún son objetos de investigación y carecen de ensayos de campo a gran escala (Tahir *et al.*, 2020). De entre ellos, el dióxido de titanio es el que más se acerca a todas las características deseadas en un fotocatalizador ideal, debido a su asequibilidad, seguridad, estabilidad química, bajo costo, gran actividad fotocatalítica, buena efectividad bajo radiación de luz solar en ambientes naturales, alta disponibilidad en la corteza terrestre (Castellote y Bengtsson, 2011) y clasificado como material no peligroso de acuerdo con las Naciones Unidas (ONU) y el Sistema Global Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (GHS, por sus siglas en inglés) (Schilling *et al.*, 2010). Asimismo, el TiO₂ ofrece otras importantes características como la facilidad de su método de síntesis, su versatilidad de aplicación y su compatibilidad con los materiales de construcción tradicionales (Hamidi y Aslani, 2019).

En la naturaleza el TiO₂ se presenta en tres fases cristalográficas: rutilo, anatasa y brookita. La anatasa y el rutilo son las dos fases más importantes para emplearse en aplicaciones prácticas en fotocatálisis debido a su alta fotoactividad y mayor estabilidad en comparación con la brookita. Aunque al rutilo se le considera como la fase más estable y a la anatasa como la fase más fotoactiva (Hanaor y Sorrell, 2011), se ha reportado que a menudo la mezcla sinérgica de ambas fases otorga una mayor fotoactividad en el producto final. El polvo comercial Degussa (Evonik) P25 contiene una mezcla de 80% anatasa y 20% rutilo, con una pureza de 99.5% (Shu *et al.*, 2013). Una de las mayores desventajas en el empleo del dióxido de titanio como fotocatalizador es que solo puede trabajar bajo radiación UV, limitando su potencial. Se ha documentado que el rutilo posee una energía de banda prohibida de 3.0 eV (equivalente a $\lambda = 413$ nm), mientras que la anatasa tiene una banda prohibida ligeramente mayor de 3.2 eV (equivalente a $\lambda = 388$ nm). Ambas bandas prohibidas están dentro de la longitud de onda larga perteneciente al espectro UV (315-400 nm de longitud de onda). Se sabe que alrededor del 44% de la energía emitida por el sol tiene una longitud de onda entre 400-700 nm, que corresponde a la luz visible. Cerca del 37% de la emisión se encuentra entre 700 a 1500 nm, que corresponde a la radiación infrarroja (IR) y menos del 7% de la energía solar emitida tiene una longitud de onda menor a 400 nm, que corresponde a la radiación ultravioleta (UV) (Moreno-Huerga, 2018). En consecuencia, la activación del dióxido de titanio se lleva a cabo a través de esa pequeña fracción (alrededor del 5%) del espectro solar que se recibe. A pesar de esta limitación, se considera que sus características positivas superan con creces a esta negativa; así, el dióxido de titanio se ha convertido en el material semiconductor con mayor uso en diversos campos como es el ambiental, el energético y el de salud (Nevárez-Martínez *et al.*, 2017).

El dióxido de titanio es uno de los materiales industriales más populares en nuestra vida cotidiana, pudiéndose encontrar en una plétora de productos comerciales como pigmento para pinturas, cosméticos, productos alimenticios, entre otros (Nakata y Fujishima, 2012). Pero, debido a su capacidad para

degradar compuestos contaminantes y a su facilidad para combinar con cualquier elemento, desde hace varios años se ha buscado la implementación de este fotocatalizador a escala nanométrica en los materiales de construcción (cementos, pavimentos, ventanas, etc.) para que estos puedan adquirir sus propiedades fotocatalíticas de descontaminación, desinfección y autolimpieza. El uso de materiales de la industria de la construcción se ha llevado a cabo en mayor o menor medida en el continente europeo y asiático, siendo una de las primeras empresas que empezó a probar este tipo de materiales Italcementi® (Italcementi, 2009), la cual presenta la mayor cantidad de patentes de este tipo de productos y fue la primer empresa en proporcionar el cemento fotocatalítico para la construcción de la iglesia Dives in Misericordia en Roma, Italia, uno de los ejemplos más representativos de una construcción fotocatalítica. Actualmente, se siguen construyendo más edificaciones con materiales a base de cemento y elementos constructivos que contiene TiO₂ (Norhasri *et al.*, 2017), en los cuales se profundizará más adelante.

El mecanismo fotocatalítico del dióxido de titanio se explica con la teoría de bandas (de valencia y conducción), descrita anteriormente, donde el proceso de fotoactivación en el TiO₂ se da cuando el material absorbe radiación UV (luz solar o lámparas fluorescentes, $h\nu$) y ocurre la transferencia de electrones entre bandas, generando los pares electrón-hueco (eq. 1):



Los electrones de la banda de conducción (e_{BC}^-), con fuerte potencial reductor, reaccionan con el oxígeno para producir radicales superóxidos (O_2^-) (eq. 2):



Mientras que los huecos positivos de la banda de valencia generados (h_{BV}^+) reaccionan con las moléculas de agua formando grupos hidroxilos (OH^-) (eq. 3)



Posteriormente, estos radicales libres (O_2^- y OH^-) pueden reaccionar con moléculas contaminantes convirtiéndolas en otros compuestos o pueden crear otras especies oxidativas. Durante todo el proceso fotocatalítico, el TiO₂ permanece inalterable, al descomponer únicamente los contaminantes orgánicos e inorgánicos (Baltes *et al.*, 2018). Por este motivo, la adición del TiO₂ a los materiales de construcción, por caso, a un material cementicio, puede crear un generador oxidante permanente que solo necesita radiación solar UV, además de oxígeno y agua, para seguir trabajando y reduciendo contaminantes.



A pesar de la enorme popularidad y ventajas que presenta el uso del TiO₂, incluso en materiales de construcción, recientemente se han estado desarrollando estrategias para mejorar su eficiencia en las propiedades fotocatalíticas, así como en lograr su fotoactivación en el espectro de luz visible que supone el 46% de la radiación total que llega a la Tierra. Para esto se han empleado diversas estrategias para hacer al TiO₂ un material activo bajo luz visible (Pelaez *et al.*, 2012). Las técnicas o metodologías para lograr esto incluyen la modificación de la superficie a través de materiales orgánicos, la mezcla con otros semiconductores activos en luz visible, el ajuste de la banda prohibida mediante la creación de vacancias de oxígeno, el dopaje y co-dopaje con metales (Cr, Mn, Fe y Ni) (Grabowska *et al.*, 2018) y no-metales (C, N, S e I) (Janus *et al.*, 2019), la preparación de nuevas nanoestructuras del TiO₂, las heterouniones con otros elementos, la inclusión con otro compuesto o simplemente con la formación de nuevos compuestos con rendimientos mejorados (figura 2) (Mamaghani *et al.*, 2020). En los últimos años se han desarrollado varios enfoques innovadores relacionados con las modificaciones químico-estructurales del TiO₂, centrándose en obtener mejores rendimientos fotocatalíticos para los procesos de descontaminación, autolimpieza y desinfección. Dicha investigación se ha centrado en aprovechar la luz solar para satisfacer la urgente demanda social de un medio ambiente más limpio y en el desarrollo de nuevos materiales de construcción más ecoeficientes (Janus *et al.*, 2020). Investigadores e ingenieros están dirigiendo su atención hacia el desarrollo de fotocatalizadores más avanzados que aprovechen la radiación de luz solar e incorporarlos en los materiales de construcción. Se espera que estos nuevos materiales, estructural y funcionalmente diseñados, se utilicen para apoyar en mitigar los problemas de contaminación atmosféricos de una manera más económica y eficiente (Gopalán *et al.*, 2020). Por supuesto, esta área de trabajo todavía está en etapas iniciales, pero varios investigadores (Batsungnoen *et al.*, 2020; Gopalán *et al.*,

FIGURA 2. Representación de las distintas metodologías utilizadas para mejorar la eficiencia fotocatalítica del TiO₂.



Fuente: Elaboración de los autores.

2020; Yamazaki *et al.*, 2020) consideran que el mejoramiento, la comercialidad, el costo de producción y la facilidad de preparación deben optimizarse en esta dirección mediante una amplia y continua investigación.

Materiales de construcción fotocatalíticos

La contaminación atmosférica representa un agente de deterioro ocasionando que muchos edificios se vayan dañando con el paso del tiempo (Di Paola *et al.*, 2012). La suciedad en una fachada puede definirse como el depósito y acumulación de partículas y sustancias presentes en el aire, produciéndose tanto en las superficies exteriores de un edificio como en las paredes interiores del mismo. Su acumulación se considera como un hecho inevitable, puesto que cualquier construcción, al estar rodeada por el aire atmosférico, será susceptible de recibir las partículas orgánicas e inorgánicas que se encuentren suspendidas en él. Este fenómeno se manifiesta aún más en las grandes ciudades donde la contaminación atmosférica es mucho mayor. Los efectos de dicha contaminación sobre los materiales constructivos tienen repercusiones importantes a nivel estético, social, económico y de salubridad (Brand, 2018). Entre los principales contaminantes atmosféricos que afectan las edificaciones se encuentran los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de carbono (CO_x) los compuestos orgánicos volátiles (COV's), el material particulado, el ozono, entre otros (Khin *et al.*, 2012). La mayoría de estos compuestos pueden incluso reaccionar entre sí, por la presencia de humedad en el ambiente, la radiación solar y otros compuestos que facilitan las reacciones para formar nuevos contaminantes denominados "secundarios" (Brand, 2018). Estos nuevos contaminantes llegan a ser igual o más dañinos para los materiales de construcción y para las personas que habitan los inmuebles. De igual forma, la presencia de patógenos en el aire, como bacterias, virus y hongos, provoca efectos nocivos tanto en la salud de los habitantes como en los materiales de construcción (Rodríguez-Gonzalez *et al.*, 2020), los cuales, mediante una acumulación prolongada de microrganismos pueden provocar una disminución en la dureza y estética del material (Chen *et al.*, 2010). Con base en lo anterior, se ha vuelto indispensable reducir los contaminantes y patógenos para una mejor calidad de vida. Esto ha generado áreas de oportunidad para la implementación y puesta a prueba de nuevos avances tecnológicos, específicamente en nuestro caso, mediante el uso de materiales fotocatalíticos en la rama de la construcción.

Desde hace varios años, los investigadores han centrado su atención en desarrollar "materiales de construcción inteligentes" (Han *et al.*, 2017b), incorporando materiales nanoestructurados en elementos comunes de construcción, como es la adición de nanopartículas de dióxido de titanio. La capacidad fotocatalítica en materiales de construcción se ha demostrado en laboratorios, a escala piloto y, recientemente, con algunos programas específicos de monitoreo en campo (como el Proyecto PICADA) para la reducción de

los niveles de contaminación urbana y de desarrollo. Lo anterior ha propiciado la creación actual de un mercado de materiales basados en TiO₂ donde incluso ya existen empresas como Italcementi, Mitsubishi que comercializan materiales utilizando este photocatalizador u otros más. Entre los materiales de construcción photocatalíticos más populares están las pinturas, morteros, fachadas, cubiertas, tejados, azulejos antibacterianos, ventanas inteligentes, filtros de aire, etc. (Chen y Poon, 2009). En la tabla 1 se muestran empresas enfocadas en la industria de la construcción que han sacado al mercado productos con propiedades photocatalíticas.

TABLA 1. Empresas dedicadas a la venta de productos photocatalíticos para el sector de la construcción.

Compañía	Productos	Nanomaterial
Agro Buchtal	Productos cerámicos	TiO ₂ , Fe ₂ O ₃
Asahi Glass	Fabricación de vidrio, electrónica y energía	TiO ₂
Bioni CS	Pinturas y recubrimientos antibacterianos y antifúngicos	Ag/TiO ₂
Duravit	Cerámica para sanitarios, accesorios para bañeras	TiO ₂ , Ag
ENEQ	Industria de recubrimientos funcionales para el vidrio	Al ₂ O ₃ /TiO ₂ , ZnS
Erlus AG	Tejados	TiO ₂
Industrial Nanotech Inc.	Fabricación de pinturas y materiales de revestimientos	TiO ₂
Italcementi	Producción de cemento, TX Active	TiO ₂
Jotun	Pinturas, recubrimientos y estucos	TiO ₂
Lafarge	Fabricación de cemento, cemento blanco Lafarge, cemento Lafarge bajo en carbono	TiO ₂
MAXIT Airfresh	Techos y paredes, pinturas photocatalíticas	TiO ₂
Mitsubishi Chemical Group Corp.	Varios materiales de construcción	TiO ₂ , varios
Nanoguard	Revestimientos y pinturas	TiO ₂ , ZnO, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂
Nanoshel	Manufacturación de cemento	TiO ₂ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃
Pilkington	Ventanas y vidrios autolimpiantes	TiO ₂
PPG Industries	Vidrio autolimpiante y energía	TiO ₂
Relius Roof	Revestimientos de paredes, pinturas y yesos	Acrílico Nanotech
Rocca	Productos sanitarios y losa cerámica	TiO ₂
Villeroy Boch	Productos cerámicos de alta calidad	TiO ₂

Fuente: Elaboración de los autores.

Junto con las ventanas photocatalíticas, los materiales photocatalíticos base cemento, como, por ejemplo, los morteros y concretos, se han convertido en los más utilizados en el campo de la construcción debido a dos factores (Danyial *et al.*, 2019): 1) a la naturaleza de la matriz que es adecuada para incorporar las nanopartículas de TiO₂, y, 2) a los distintos usos de este material en el campo de la construcción tradicional. A pesar de eso, su incorporación en materiales cementosos todavía se le considera una tarea desafiante (Feng *et al.*, 2020). Es deseable tener la máxima cantidad de catalizador en la superficie del material, sin el riesgo de perderlo por abrasión o meteorización. Para esto



existen dos métodos principales para la incorporación del nanocompuesto en sistemas cementosos: 1) agregar el photocatalizador al concreto directamente durante el proceso de mezclado, o, 2) rociar el photocatalizador en forma de solución sobre la superficie del concreto (revestimientos superficiales). En el primer método las nanopartículas de TiO₂ se incrustan dentro del material cementoso, proporcionando una mejor estabilidad para la fotodegradación. No obstante, presenta el inconveniente de que cierto porcentaje de partículas no se expondrán para mostrar actividad photocatalítica, por lo que se desperdicia material potencialmente activo. Además, la fotoactividad del TiO₂ se podría reducir significativamente con el tiempo, debido a la cobertura en la superficie del material que conduciría a una eventual supresión de la actividad photocatalítica. En el segundo método, las nanopartículas de TiO₂ se apoyan en la superficie de la matriz del cementante, lo cual otorga un efecto positivo y más eficiente para la fotocatálisis y, por ende, para la degradación de los contaminantes (Wang, Yu, *et al.*, 2020). Sin embargo, este método presenta serios problemas de durabilidad, en particular por la remoción de los componentes fotoactivos debido al viento, a la lluvia y, en general, a todo agente ambiental.

Adsorción de contaminantes

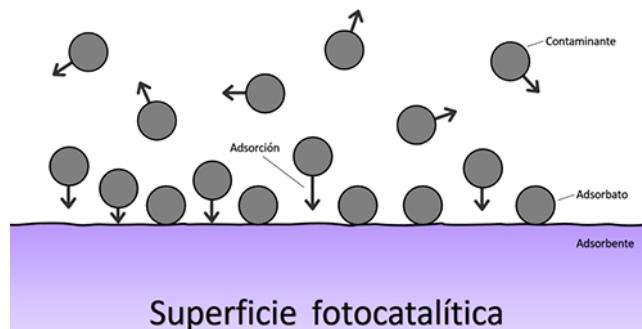
Uno de los factores fundamentales para que ocurra la reacción photocatalítica, y en muchos casos determinante para su eficiencia, es el fenómeno de adsorción de los contaminantes atmosféricos en la superficie de los materiales de construcción (Abebe *et al.*, 2018). La adsorción se define como un proceso superficial en el cual una sustancia en fase fluida (gas, líquido o sólidos en suspensión) se adhiere, deposita y acumula sobre la superficie de otra fase (generalmente sólido), debido a fuerzas de atracción intermoleculares entre las fases involucradas. El material retenido en la superficie sólida en el proceso de adsorción se denomina adsorbato, mientras que el material sobre el que se retiene se denomina adsorbente (figura 3). Esta acumulación superficial del adsorbato sobre el adsorbente se le denomina adsorción. Una vez realizado este fenómeno, los materiales adsorbidos pueden difundirse sobre la superficie, permanecer fijos y/o sufrir una reacción química (como la fotocatálisis) (Soledad-Faraldos, 2012). La naturaleza exacta de la unión entre ambas fases depende de varios factores y de las especies involucradas, pero en general se han clasificado en dos tipos: a) la adsorción física o fisisorción en la cual los átomos, iones o moléculas se mantienen unidas a la superficie del material por medio de fuerzas débiles de Van der Waals, o, debido a una atracción electrostática entre las fases presentes, o, b) la adsorción química o quimisorción donde estas se adhieren a la superficie del sólido mediante un enlace químico fuerte, generalmente enlaces covalentes.

La importancia de este fenómeno en los materiales de construcción radica en que para que ocurra una reacción química, los reactivos deben entrar en contacto íntimo, es decir, las especies involucradas deben permanecer lo

más próximas posible (Rashed, 2013). Por este motivo la mayor parte de los eventos del proceso fotocatalítico ocurre en la capa más cercana a la superficie del semiconductor y todo lo que podría llegar a incidir en el proceso de adsorción influirá en el rendimiento de fotodegradación. Hoy en día, se tienen identificados varios factores medioambientales que modifican la eficiencia de los procesos de adsorción como es la intensidad de la radiación incidente, la humedad relativa, la temperatura, el viento, entre otros, así como otros factores intrínsecos del photocatalizador como el método de aplicación, la cantidad del photocatalizador, la naturaleza del semiconductor, tamaño de partícula, tipo de soporte, por mencionar algunos. Asimismo, es dependiente de otras características como: i) la del adsorbente (tipo de material, porosidad, topografía, tamaño de área específica, tipo de estructura, naturaleza de los agregados, etc.); ii) condiciones de adsorción (magnitud, velocidad, tipo de mecanismo, fuerzas físicas o químicas involucradas), o, iii) condiciones del proceso (temperatura, presión, concentración, tiempo, pH) (Rashed, 2013; Sansotera *et al.*, 2018; Dell'Edera *et al.*, 2021).

Se sabe que todos los sólidos tienen la propiedad de adsorber en su superficie átomos, moléculas o iones que se encuentran a su alrededor. Aun en las superficies más cuidadosamente pulidas, desde un punto de vista microscópico, llegan a presentar defectos e irregularidades. La presencia de ellos es importante en el estudio de los procesos superficiales, como es la fotocatálisis, pues los átomos implicados suelen ser más susceptibles a los campos de fuerza y también son más reactivos (Abebe *et al.*, 2018; Agboola y Benson, 2021). El área superficial es otro factor importante que mejora el proceso de adsorción, esto debido a que con el aumento de la superficie de contacto se aumenta la velocidad de reacción química (actividad fotocatalítica) (Dell'Edera *et al.*, 2021). Esto se puede lograr al disminuir el tamaño de grano del material semiconductor lo que aumenta su área superficial y por consiguiente, se tiene un mayor espacio para que interactúen con las moléculas de los contaminantes (Rafique

FIGURA 3. Representación del fenómeno de adsorción de los contaminantes sobre la superficie de un material de construcción photocatalítico.



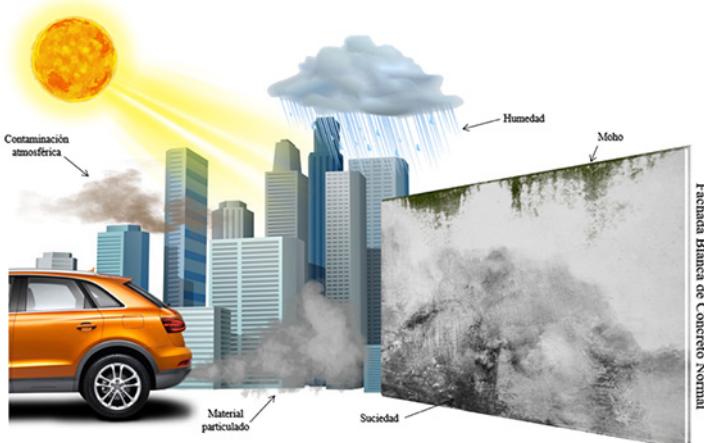
Fuente: Elaboración de los autores.

et al., 2020; Tahir et al., 2020). En ese sentido, una mayor área superficial conduce, generalmente, a una alta capacidad de adsorción y una mayor reactividad superficial, y, en consecuencia, a un incremento en la remoción de los contaminantes. Muchos materiales de construcción presentan irregularidades y grandes áreas superficiales expuestas a una fuente de luz natural o artificial, que en conjunto crean las condiciones óptimas para la aplicación de soluciones photocatalíticas (Gopalan et al., 2020; Singh et al., 2021).

Propiedad autolimpiente

En un entorno natural, es común que la estética y el brillo de la superficie de un edificio ordinario se pierda con el tiempo debido al envejecimiento paulatino del material. Las fachadas de un inmueble se ensucian debido a una acumulación constante de compuestos orgánicos e inorgánicos que provocan una fuerte adherencia del polvo ambiental y otros compuestos sobre la superficie. Como resultado, la suciedad acumulada en esta altera la apariencia visual y las propiedades de reflectancia, influyendo, además, en un aumento de la temperatura interna del edificio debido a una mayor absorción de calor (Topcu et al., 2020). Se ha establecido que por sus características fisicoquímicas, como son rugosidad, porosidad y composición mineralógica, los materiales a base de cemento facilitan la deposición de contaminantes orgánicos, material particulado y crecimiento microbiano causando ese cambio de color y el deterioro físico y visual en las estructuras de construcción, siendo más evidentes en fachadas con colores claros (Khanna et al., 2020; Wang, Gauvin, et al., 2020) como se esquematiza en la figura 4.

FIGURA 4. Modelo esquemático donde se muestra la contaminación a la que está expuesta una fachada típica de concreto en un ambiente urbano alterando su apariencia visual.



Fuente: Elaboración de los autores.

Sin un mantenimiento constante y adecuado, resultaría difícil mantener las propiedades estéticas originales de los edificios (Ganesh *et al.*, 2011). Para mitigar este problema se han utilizado diferentes técnicas como la aplicación de aditivos antiadherentes o pinturas especiales; sin embargo, estas soluciones temporales han supuesto un gasto importante para las personas. Otra opción corresponde al uso de materiales photocatalíticos basados en TiO₂. La limpieza de las superficies con este método se basa en dos procesos fundamentales: i) a la fotoxidación de la capa orgánica responsable de la adherencia de las partículas contaminantes mediante reacciones redox lo que facilita su remoción, y, ii) a la capacidad anfipática del TiO₂, es decir, a que puede presentar tanto la propiedad hidrofóbica como hidrofílica. La propiedad anfipática del TiO₂ se descubrió por accidente en 1995 (Wang *et al.*, 1999) al encontrar que el semiconductor al ser irradiado con luz UV propiciaba que el ángulo de contacto del agua disminuyera, haciendo que esta se forme en capas en vez de acumularse en forma de gotas (Topçu *et al.*, 2020). Este fenómeno provoca que el agua se pueda extender a una mayor velocidad y por una mayor área superficial en el material que, además de disipar el calor proveniente de la luz solar y, por ende, disminuir el efecto albedo en el edificio, facilita un aumento de la presencia de moléculas de H₂O en la zona. Esto provoca, a su vez, un aumento en la formación de radicales hidroxilos (OH⁻) mediante el proceso de fotoxidación del semiconductor, acelerando la degradación del contaminante. Al ir disminuyendo la energía lumínica sobre el photocatalizador se provoca un incremento paulatino en el ángulo de contacto del agua formando gotas cada vez más esféricas, hasta generar la propiedad superhidrofóbica. Ese fenómeno induce una mayor movilidad de las gotas sobre la superficie que, además, absorben y desplazan a las partículas previamente fotodegradadas a su paso, creando la propiedad de autolimpieza (figura 5).

FIGURA 5. Modelo que ejemplifica el proceso de autolimpieza: a) la parte orgánica del contaminante es degradada por photocatalisis dificultando su adherencia a la superficie; b) las gotas de agua se deslizan por la propiedad superhidrofóbica del material absorbiendo los contaminantes a su paso, y, c) los contaminantes son removidos fácilmente dejando una superficie limpia.

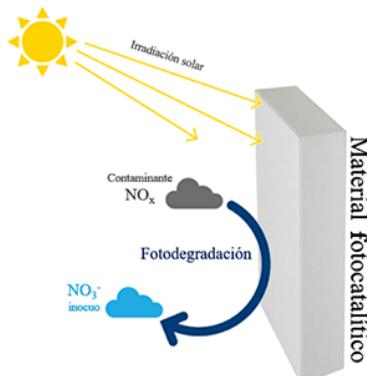


Fuente: Elaboración de los autores.

Propiedad descontaminante del aire

Sabemos que la calidad del aire es uno de los factores críticos para determinar la calidad de vida del ser humano. El aire que respiramos está contaminado con diversas impurezas, de varios tamaños y composiciones (Fermoso *et al.*, 2020). La mayoría de los contaminantes tienden a dañar la salud humana, la biodiversidad, los ecosistemas y también cualquier obra de infraestructura. Una proporción significativa de la población mundial vive en áreas urbanas, principalmente ciudades, donde las concentraciones de elementos nocivos son aún mayores (Hay *et al.*, 2015). Las exposiciones prolongadas a muchos de los contaminantes varían en gravedad en los seres humanos, pero van desde el deterioro del sistema respiratorio hasta la muerte prematura. En los edificios pueden causar cambios importantes en la apariencia estética de los materiales, así como una disminución en la resistencia mecánica del mismo (Di Paola *et al.*, 2012). Para solucionar este problema ambiental, se han propuesto diversos procedimientos para reducir el nivel de contaminación tales como: la reducción misma de la fuente de contaminación, cambios de comportamiento, uso de transporte público o “activo” (ej. ciclismo) o a través de vehículos de cero emisiones (Hay *et al.*, 2015). Sin embargo, muchos de ellos no son atractivos debido a su impacto lento o al alto costo inicial (Comission, 2015). Por este motivo, la oxidación fotocatalítica de contaminantes atmosféricos se ha vuelto una propuesta atractiva debido a su facilidad de uso, impacto instantáneo y bajo costo en comparación con otros métodos (Fermoso *et al.*, 2020). La manera de actuar de este método es que los contaminantes gaseosos quedan atrapados en la superficie del material fabricado con TiO_2 , y, al ser este activado con luz solar propicia reacciones de oxidación-reducción descritas transformando los óxidos contaminantes en sales solubles e inocuas (figura 6).

FIGURA 6. Modelo simple del proceso de descontaminación del aire vía fotocatálisis en un material fotocatalítico.



Fuente: Elaboración de los autores.

Específicamente hablando de los gases de nitrógeno (NO_x) cuando estos son expuestos a los radicales hidroxilos (OH^-), generados en la superficie del TiO_2 durante la fotoactivación, son oxidados y convertidos a iones de nitrato (NO_3^-) de acuerdo con las ecuaciones (eq. 4, 5 y 6) (Russell *et al.*, 2021). La reacción fotocatalítica del dióxido de titanio produce dos intermediarios, como son el ácido nitroso (HNO_2) (eq. 5) y los iones nitritos (NO_2^-) (eq. 6). El HNO_2 es consumido completamente durante la reacción redox generando iones de nitritos NO_2^- más agua (H_2O) (eq. 5). Este nitrito vuelve a la cadena de reacción (eq. 4) para transformarse en iones de nitratos (NO_3^-) más hidrógeno (H^+). Estos nitratos permanecen sin alterarse, pero al ser inofensivos se remueven con la acción del agua y al ser absorbidos en la tierra pueden actuar como fertilizantes de suelos.



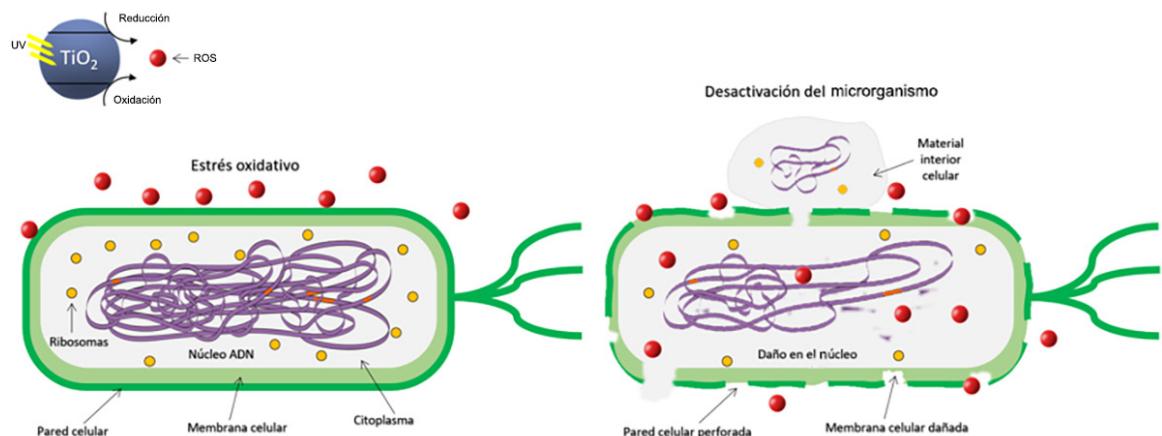
Propiedad antimicrobiana

Las propiedades fotocatalíticas del TiO_2 también se pueden utilizar para la inactivación de un amplio espectro de microrganismos, incluidos virus, hongos, polen, algas y bacterias que desencadenan cambios químicos y estéticos no deseados en el material constructivo (Foster *et al.*, 2011; Sagir *et al.*, 2020). La actividad antimicrobiana inducida por la fotoactivación del TiO_2 a menudo se denomina como fotoesterilización y es una forma eficaz de reducir el recuento de bacterias. Dichos materiales se pueden emplear en áreas que requieran una limpieza extraordinaria o altos niveles de esterilización como son hospitales, cocinas, escuelas, plantas procesadoras de alimentos, tanques de almacenamiento de agua y similares (Guo *et al.*, 2013). Debido a la complejidad de los microrganismos, se desconoce aún el mecanismo exacto de inactivación que ejerce la fotocatálisis sobre ellos. Lo que sí está documentado es que debido a un ataque prolongado de las especies reactivas de oxígeno (principalmente los radicales hidroxilos, OH^-) que se originan durante el proceso de fotoxidación, se crea un estrés oxidativo en el germen. Este proceso empieza a ocasionar un daño en el microrganismo iniciando en la pared celular y posteriormente en la membrana citoplasmática hasta perforarlas e induciendo la fuga de su sustancia interna. Después de esto, los ROS continúan el ataque introduciéndose en el germen y comenzando un ataque directo contra sus componentes intracelulares, destruyendo en esta etapa su ADN, proteínas y núcleo, de esta forma matan al microrganismo (figura 7) e incluso evitan la replicación del individuo celular inhibiendo el crecimiento de su población (Ganguly *et al.*, 2018). Ac-



tualmente, la mayoría de las investigaciones se restringen a la etapa de laboratorio, las aplicaciones prácticas son muy pocas y las pruebas de campo aún son requeridas para verificar la factibilidad del concreto antimicrobiano (Qiu *et al.*, 2020). En el futuro, se espera que continúe el desarrollo de nuevos materiales de construcción novedosos que sean mejores agentes antimicrobianos, de alta eficiencia, larga duración, amplio espectro y respetuosos con el medio ambiente, además de tener un excepcional desempeño antimicrobiano en el campo de la lucha contra los virus (Chen *et al.*, 2010).

FIGURA 7. Ilustración del posible mecanismo de inhibición de los microrganismos a través del proceso de fotocatálisis.



Fuente: Elaboración de los autores.

Dependiendo de la propiedad fotocatalítica que se quiera explotar (descontaminación, autolimpieza o desinfección), será más efectiva su aplicación sobre determinado tipo de elemento constructivo por lo cual se deberá usar en su forma más adecuada.

Aplicaciones

A principios de la década de los años 1990, la posibilidad de utilizar la radiación solar para activar un fotocatalizador impulsó las primeras investigaciones que perseguían la aplicación práctica de la fotocatálisis para la eliminación de residuos contaminantes y patógenos dañinos (Hashimoto *et al.*, 2005). Esto condujo al desarrollo de nuevos tipos de materiales con propiedades mejoradas, por lo que se han realizado diseños conceptuales para la aplicación en práctica de los procesos de oxidación fotocatalítica en la industria de la construcción. Desde entonces, múltiples informes de investigación han estudiado una variedad de materiales de soporte para la industria, como revestimientos

a base de cemento (Yang *et al.*, 2018), estucos (Luévano-Hipólito y Martínez-de la Cruz, 2018), pinturas (Salvadores *et al.*, 2020), ventanas (Angulo-Ibáñez *et al.*, 2021), pavimentos (Cordero *et al.*, 2020), etc., la mayoría de ellos enfocados en la eliminación del NO_x bajo condiciones de laboratorio y, en menor medida, en condiciones exteriores reales y su impacto en la calidad del aire. Aunque, afortunadamente en la última década varios estudios (Dell'Edera *et al.*, 2021; Russell *et al.*, 2021) sí se han realizado en ambientes naturales obteniendo resultados aceptables. A continuación, se mostrarán los estudios más relevantes sobre diferentes materiales empleados en la construcción.

Pinturas fotocatalíticas

A lo largo del orbe, se han reportado diversos proyectos desarrollados en condiciones de exteriores para fomentar el uso de pinturas fotocatalíticas como posible solución para superar problemas ambientales. En efecto, la pintura fotocatalítica para recubrir edificios es uno de los materiales más usados para este tipo de aplicaciones. Un recubrimiento de pintura fotocatalítica sobre cualquier material constructivo propicia la existencia de un área interfacial más grande disponible para la fotocatálisis, originando superficies fotoactivas para degradar los contaminantes (Ângelo *et al.*, 2014). No obstante, si bien el dióxido de titanio es uno de los componentes principales en la formulación de una pintura, se le considera pigmentario, es decir, su función es dar opacidad a la pintura, principalmente en fase rutilo previniendo cualquier fotoactividad, por lo cual, la sola presencia de TiO₂ pigmentario en las pinturas supondría un peligro para la fotodegradación, al actuar como agente bloqueante de la radiación solar, dando como resultado niveles bajos de conversión y selectividad de los contaminantes atmosféricos (Aguia *et al.*, 2011). En consecuencia, la formulación de la pintura se modifica para incorporar el dióxido de titanio. Para esto, el TiO₂ pigmentario se elimina de la formulación de la pintura y se remplaza por extensores, los cuales son beneficiosos para la fotoactividad de la película de pintura. Se han reportado diversos casos donde se ha utilizado este material. Por ejemplo, el túnel Umberto I en Roma, Italia, se recubrió con una pintura fotocatalítica (pintura a base de cemento con TX Active®) y se equipó con un sistema de luz UV artificial. Este estudio reportó valores de más del 20% de reducción de NO_x (Guerrini, 2012). Boysen® KNO_xOUT™ es una pintura comercial fotocatalítica conocida en Europa, utilizada tanto para aplicaciones en interiores (pintura a base de acrílico) como en exteriores (pintura a base de silicona). En el caso de estudio, se utilizó una pintura para interiores cargada con este fotocatalizador para revestir el aparcamiento Vinci en París, Francia. Se recubrió e iluminó un área de aproximadamente 1,800 m² con luces fluorescentes; se observó una disminución del 90% de la concentración de NO_x (Guerrini, 2012). Por otro lado, Maggos y colaboradores reportaron una reducción del 20% de NO_x en un estacionamiento revestido con una pintura fotocatalítica e iluminado con lámparas ultravioleta (Maggos *et al.*, 2007). En lo que respecta a las aplicaciones al aire libre, Allen y colaboradores demostra-

ron la efectividad de esta tecnología en un estudio piloto de la fotohabilitación del patio de la escuela Sir John Cass, en Londres, Reino Unido (Allen *et al.*, 2009). Se pintó el patio de recreo con un área de 300 m² con pintura photocatalítica marca Boysen® KNO_xOUT™ y se midió la concentración de NO_x durante 6 meses; aunque evaluar el papel de la pintura photocatalítica fue muy difícil debido a la naturaleza abierta del parque infantil, fue posible observar una disminución en los niveles de NO_x (Claire *et al.*, 2007; Allen *et al.*, 2009). El proyecto EDSA – Everyone Deserves Safe Air, de la empresa Boysen Paints, en Filipinas, coordinado por la Autoridad de Desarrollo de Metro Manila y comisariado por TAO Incorporation, tuvo como objetivo reducir la contaminación atmosférica exterior utilizando elementos artísticos plasmados en paredes, muros, fachadas, etc., empleando pintura photocatalítica, aunque, desafortunadamente no se realizaron mediciones para reportar su eficiencia (EDSA, 2013).

Maggos y colaboradores evaluaron la eficacia de descontaminación de materiales photocatalíticos en un estacionamiento interior contaminado con gases de escape de automóviles, cubriendo la superficie del techo con una pintura acrílica blanca que contenía TiO₂; reportando una reducción del 19% y 20% para NO y NO₂, respectivamente (Maggos *et al.*, 2008). Los mismos autores evaluaron la capacidad de eliminación de NO_x por pintura tratada con TiO₂ en tres calles con paredes laterales. En dos de ellos se utilizaron paneles revestidos con la pintura photocatalítica, mientras que en el tercero estuvo ausente el TiO₂. Los resultados indicaron que la concentración de NO_x en presencia del photocatalizador era de 36.7% hasta 82.0% más baja que en las muestras de control sin presencia del semiconductor. La variación dependió de las emisiones de la fuente de contaminación, la dirección del viento y la orientación del muro. Salthammer y colaboradores estimaron la reducción de los contaminantes del aire interior (NO_x y COVs) en presencia de pinturas para paredes disponibles comercialmente mediante el uso de luz diurna artificial interior, con y sin intercambio de aire (Salthammer y Fuhrmann, 2007). Los resultados mostraron que el NO₂ se eliminó en presencia de intercambio de aire, mientras que no se observó ningún efecto photocatalítico significativo para los COV, en condiciones dinámicas. Guo y colaboradores compararon la autolimpieza y la resistencia a la intemperie de una pintura que contenía TiO₂ sobre la superficie de morteros arquitectónicos autocompactantes (SCAM, por sus siglas en inglés), con un 5% de P25-TiO₂ mezclado directamente con el SCAM (Guo *et al.*, 2016). La primera muestra exhibió una alta eficiencia de autolimpieza en condiciones a la intemperie, mientras que la última mostró solo una ligera eficiencia para la eliminación de los gases NO_x. Por último, Yang y colaboradores investigaron la estabilidad de los agregados recubiertos con pintura de TiO₂ para aplicaciones de concreto y encontraron que, después de solo 10 ciclos de lavado, el photocatalizador se eliminó un 30% (Yang *et al.*, 2018). Considerando la aplicación específica de la degradación del NO_x, las pinturas photocatalíticas presentan dos ventajas principales en comparación con otro tipo de soportes de construcción. Una de ellas es que los recubrimientos de pintura se pueden

aplicar en diferentes elementos constructivos, como los edificios, túneles, paredes, techos, entre otros, tanto en interiores como en exteriores, mientras que la otra ventaja es que se presentan como una capa “tridimensional” donde se encuentran disponibles nanopartículas de TiO₂ para fotocatálisis con un espesor óptimo reportado de la película de pintura de ~100 µm (Yu *et al.*, 2018). No obstante, su composición orgánica es susceptible de ser oxidada por las especies generadas en los fotocatalizadores.

Pavimentos fotocatalíticos

En los últimos años, el fotocatalizador TiO₂ se ha incorporado en muestras de asfalto y concreto utilizando varios métodos de aplicación, incluida la adición directa, la modificación del aglutinante y la pulverización en suspensión (Segundo *et al.*, 2018). Muchos de los estudios se han focalizado en la fotoxidación de gases NO_x, y sus resultados han sido altamente favorables. Por ejemplo, parte de la calle Borgo Palazzo en Bérgamo en Italia, se cubrió con adoquines fotocatalíticos (piedras de concreto recubiertas con TX Active® producido por Ital cementi) y se midió la concentración de NO_x durante dos semanas. Los resultados se compararon con la fracción no modificada de la calle pavimentada con asfalto. El aire circundante del pavimento fotocatalítico mostró una concentración de NO_x de aproximadamente 30-40% menor que los valores de referencia (Italcementi, 2009). En Amberes, Bélgica, se desarrolló un proyecto similar. Se recubrió un área de 10,000 m² con bloques de pavimento fotocatalítico y se evaluó la correspondiente eficiencia hacia la fotohabitación de NO_x. A pesar de que se realizaron pruebas de laboratorio para demostrar la eficiencia fotocatalítica de estos bloques a lo largo del tiempo (mediante equipo de intemperismo acelerado), en el exterior sus resultados no fueron tan prometedores (Beeldens *et al.*, 2011). Pero esto se debió a que, en el exterior, y a pesar de que se encontró una disminución en la concentración de NO_x, no fue posible extraer conclusiones sólidas ya que las mediciones se realizaron solo durante un periodo relativamente pequeño. De Melo y colaboradores evaluaron la eficiencia del pavimento fotocatalítico en el campo durante un año en Brasil encontrando una reducción dramática de la eficiencia de degradación de NO_x después de este tiempo (De Melo *et al.*, 2012). Folli y colaboradores realizaron un estudio de campo de elementos de pavimentación purificadores de aire que contenía TiO₂, y observaron que en condiciones climáticas ideales (es decir, en verano), la concentración promedio mensual de NO era alrededor de un 22% más baja que en el área de referencia, en contraste con los resultados del laboratorio donde la degradación por NO fue de más del 78% (Folli, 2015). Fan y colaboradores prepararon una muestra asfáltica compuesta de TiO₂ rociando polvo de TiO₂ en suspensión sobre esteras de fibra de vidrio tratadas con asfalto emulsionado, y reportaron un excelente desempeño en la remoción de NO_x (Fan *et al.*, 2017). Pérez-Nicolás y colaboradores recrearon casi el mismo experimento, pero sin la fibra de vidrio y obtuvieron conclusiones similares (Pérez-Nicolás *et al.*, 2017). Por otro lado, en lugar de usar métodos de rociado, Chen y colaboradores agre-



garon polvo de TiO_2 modificado en la superficie de un asfalto poroso (Chen y Liu, 2010). Los resultados mostraron que las muestras de asfalto permeable tenían un buen efecto descontaminante de NO_x , pero se veía significativamente afectado por las fuentes de luz. Particularmente, se obtuvieron mejores eficiencias al utilizar lámparas de 254 nm que al usar fuentes de 365 nm. Esto impacta negativamente durante la aplicación de los materiales, pues la luz solar emite una pequeña parte de radiación UV (365 nm) y una mayor parte de luz visible. Por lo cual, para asegurar buenas eficiencias photocatalíticas se deben realizar modificaciones al photocatalizador TiO_2 para mejorar su absorción en la región visible del espectro solar y de este modo, asegurar la remoción de los contaminantes en ambientes exteriores.

Por su parte, para mejorar la durabilidad del mortero photocatalítico, Wang y colaboradores mezclaron un mortero de cemento con TiO_2 pulverizado y lo adhirieron a la superficie del pavimento asfáltico utilizando resina epoxi (Wang *et al.*, 2016). Basándose en los resultados de la prueba, observaron una eficiencia en la degradación del NO_x más duradera incluso después de varias pruebas por intemperismo acelerado, indicando que este método podría ser factible para su implementación práctica. Sin embargo, encontraron que mediante este método (mezcla) la degradación photocatalítica de NO_x fue relativamente baja incluso con altas dosis de TiO_2 (Hassan *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011). Por estos motivos, varios estudios concuerdan que, con el método de incorporación directa, el material adquiere una mayor degradación photocatalítica debido a una mayor concentración de TiO_2 en la superficie de las muestras de hormigón (Yousefi *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2017).

Por último, Ballari y colaboradores realizaron una demostración a gran escala del pavimento purificador de aire en Hengelo, Países Bajos (Ballari y Brouwers, 2013). Todo el ancho de una calle se pavimentó de un hormigón que contenía TiO_2 en una longitud de 150 m (“De NO_x street”). Otra parte de la calle, de unos 100 m, fue pavimentada con adoquines normales (“Calle Control”). El monitoreo al aire libre lo realizaron durante 26 días por un periodo superior a un año, y los parámetros medidos incluyeron la intensidad del tráfico, concentraciones de NO, NO_2 y ozono, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento e irradiancia de luz visible y ultravioleta. Para estas mediciones de campo, los bloques usados también se midieron en el laboratorio para evaluar su desempeño. Los resultados indicaron que la concentración de NO_x fue, en promedio, 19% (considerando todo el día) y 28% (considerando solo las tardes) menor a los valores obtenidos en la calle control. Sin embargo, en condiciones climáticas ideales (alta radiación y baja humedad relativa) observaron una disminución de la concentración de NO_x cerca del 45%.

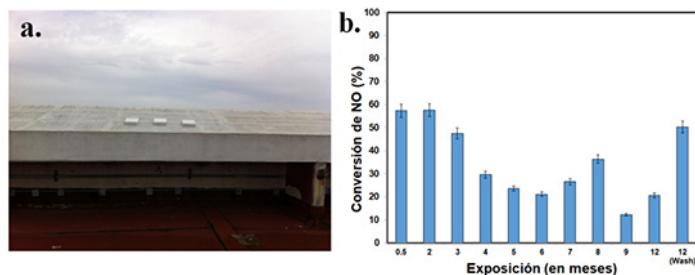
Estucos photocatalíticos

Los estucos son una forma de terminación o decoración de paredes y techos, interiores o exteriores, basados en diferentes tipos de morteros que permite la obtención de diversas texturas. El desarrollo de este tipo de material de construc-

ción con propiedades fotocatalíticas forma parte de las nuevas estrategias ecológicas para reducir la contaminación atmosférica; no obstante, no se han realizado muchos estudios al respecto. Cros y colaboradores estudiaron la remoción de NO y NO₂ por un estuco mezclado con TiO₂ en condiciones naturales al aire libre (Cros, 2013). A través de un diseño de experimento factorial se encontró que los aumentos en la humedad relativa o la temperatura condujeron a disminuciones significativas en la remoción de NO y NO₂. Asimismo, un aumento en los niveles de contaminantes orgánicos en el aire condujo a una disminución significativa en la remoción de NO, pero el NO₂ no se vio afectado significativamente.

Existe otro estudio sobre el desarrollo de un estuco fotocatalítico mediante la incorporación de TiO₂ sintetizado por el método sol-gel (Luévano-Hipólito y Martínez-de la Cruz, 2018). En este, se evaluó su rendimiento para eliminar los gases NO_x tanto en condiciones artificiales (figura 8a) como de intemperismo natural siguiendo las recomendaciones establecidas por las normas internacionales ISO22197-1 e ISO11341:2004. Según sus resultados, la eficiencia del recubrimiento fotocatalítico para la remoción de los gases NO_x mejoró en condiciones de alta humedad (es decir, en días lluviosos), debido a que el ambiente aportaba más moléculas de agua para iniciar la formación de los radicales hidroxilos que tienen un papel importante en la fotoxidación de gases NO_x. Luego de 1 año de exposición, el recubrimiento aún reportaba actividad fotocatalítica para la remoción de NO_x en condiciones reales, la cual fue potenciando luego de un simple mantenimiento que consistió en lavarlo con agua desionizada, como se observa en la figura 8b.

FIGURA 8. a) Exposición del estuco fotocatalítico a condiciones naturales. b) Eficiencia de la conversión de gases NO_x durante 1 año de exposición del estuco.



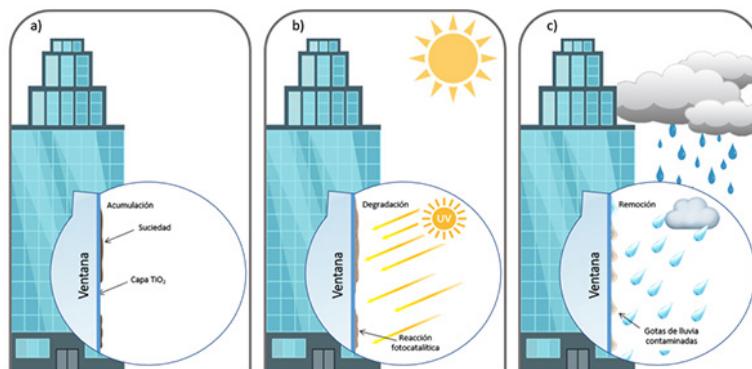
Fuente: Elaboración de los autores.

Ventanas fotocatalíticas

El vidrio es uno de los materiales de referencia más utilizados para crear desarrollos comerciales y residenciales modernos. Su ubicuidad actual es el resultado de toda una nueva gama de tecnologías que significan poder utilizarlo para mucho más que simples ventanas. Las innovaciones en los recubrimientos han otorgado al vidrio una variedad de propiedades beneficiosas como el aislamiento térmico, así como el control solar y del ruido. Una de las propiedades más po-

pulares, por sus ventajas estéticas, son los recubrimientos de TiO_2 que otorgan al vidrio una propiedad de autolimpieza (figura 9). Desde que el vidrio fotocatalítico estuvo disponible comercialmente, se ha vuelto frecuente en los diseños de edificios, especialmente porque la tecnología permite ayudar a los arquitectos a garantizar que sus edificios se vean inmaculados por más tiempo, y a los propietarios una disminución sustancial sobre el costo de mantenimiento. Sin embargo, la mayoría de los estudios se han enfocado en la propiedad de autolimpieza y muy pocos han estudiado los efectos y niveles de degradación de un contaminante aprovechando su propiedad de descontaminación. Angulo-Ibáñez y colaboradores desarrollaron una ventana fotocatalítica duradera revisiéndola con sustratos de vidrio de SiO_2 como capa protectora interna y una capa exterior de anatasa (TiO_2) mesoporosa con área superficial mejorada y tamaño de cristal nanoscópico (30-60 nm) (Angulo-Ibáñez *et al.*, 2021). Para medir el rendimiento de las ventanas fotocatalíticas diseñadas, se utilizó la fotodegradación del CO_2 a metanol, obteniendo como resultados valores altos, por encima del 72% después de 2 horas de iluminación UV. También encontraron que la transformación del CO_2 a metanol aumentaba para las ventanas fotocatalíticas preparadas a partir de mezclas que contenían del 5 a 20% de TiO_2 , relacionándolo con la reducción del tamaño de los cristales y al aumento de la porosidad de los recubrimientos de anatasa. Cantidad más alta de fotocatalizador mostraron una disminución en la formación del metanol, atribuido a un aumento del contenido de N y S los cuales tendían a cubrir los poros. De igual forma, se encontró que las ventanas fotocatalíticas con monocapa de TiO_2 mostraron rendimientos más bajos en la transformación de CO_2 a metanol y una estabilidad fotocatalítica más deficiente, lo que demostró para los autores la importancia de aplicar una capa extra como material de soporte para el fotocatalizador y de esta forma mantener su capacidad fotocatalítica por más tiempo.

FIGURA 9. Representación esquemática del principio de autolimpieza de una ventana fotocatalítica: a) acumulación de los contaminantes en la superficie de la ventana; b) activación de la capa fotocatalítica por irradiación solar, y, c) descomposición fotocatalítica de los contaminantes y remoción por agua de lluvia.



Fuente: Elaboración de los autores.

Ji y colaboradores desarrollaron un revestimiento de dos capas en una ventana para purificar el aire interior y reducir la entrada de energía solar al tiempo que conservaba su función principal de acristalamiento, siendo este el permitir un buen contacto entre el interior y el exterior con la iluminación natural (Ji *et al.*, 2019). Para esto, crearon una bicapa termocrómica la cual proporcionaba un rendimiento de energía solar dependiente de la temperatura, y otra fotocatalítica compuesta de TiO_2/VO_2 capaz de destruir contaminantes (uno de ellos NO_x) en el interior. Con base en los resultados obtenidos, los autores confirmaron que la bicapa fotocatalítica TiO_2/VO_2 exhibió una purificación del aire mejorada en comparación con la de una sola capa de TiO_2 , debido al calentamiento de la película subyacente de VO_2 que absorbía infrarrojos. Tanto así que la tasa de degradación fotocatalítica casi se duplicó para la película bicapa de TiO_2/VO_2 en comparación con la de TiO_2 de una sola capa. Los revestimientos se depositaron mediante pulverización reactiva sobre vidrio calentado, ambos eran nanocrystalinos y la fase anatasa predominaba en el TiO_2 .

Cementos fotocatalíticos

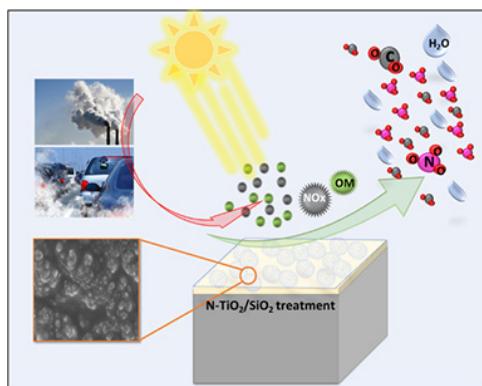
Los cementos fotocatalíticos son los materiales ecológicos más aplicados dentro de la industria de la construcción, así que describir cada uno de los estudios realizados tanto a nivel de laboratorio como de campo sería una tarea ardua y extensa, por lo cual se mencionarán algunos de los casos más importantes. Chen y colaboradores evaluaron los cambios de color del colorante rodamina B en varias mezclas de mortero con TiO_2 agregado a la matriz de cemento usando el sistema CIE $L^*a^*b^*$ con un espectrómetro (Chen *et al.*, 2011). El colorante se desvaneció a una velocidad independiente del contenido del fotocatalizador indicando que el material fotocatalítico fue eficaz para decolorar el tinte bajo la radiación UV a través de su capacidad de autolimpieza. Diamanti y colaboradores evaluaron los cambios de color en morteros reforzados con fibra con cantidades variables de anatasa tanto en polvo como en suspensión (Diamanti *et al.*, 2015). Las muestras, que eran blancas al comienzo de la prueba, se monitorearon usando un espectrofotómetro. Se produjo un cambio de color en casi todas las muestras que se expusieron al exterior. En general, las muestras con mayor actividad fotocatalítica disminuyeron su efecto amarillento. Guo y colaboradores evaluaron los efectos de la intemperie sobre la actividad fotocatalítica de cementos que contenían partículas de TiO_2 midiendo la remoción de NO_x y rodamina B bajo radiación UV o luz visible (Guo *et al.*, 2015). Sus resultados mostraron que las capacidades de autolimpieza y purificación del aire de los materiales de construcción no se veían afectadas por las condiciones climáticas, los cuales son buenos indicios si se desea aplicar a mayor escala. Esto se repite cuando la eficacia de la fotohabilitación de NO_x utilizando paneles de concreto con TiO_2 (recubiertos con TX Active®) se probó en condiciones exteriores en Francia (Maggos *et al.*, 2008). En este caso de estudio, se construyeron tres calles con paredes latera-

les y se monitorearon los niveles de concentración de NO_x. Las paredes ubicadas en los laterales de las calles cubiertas con paneles de mortero de TiO₂ mostraron valores de fotohabitación de NOx en el rango de 37-82%, dependiendo de la concentración de contaminantes, la dirección del viento y la orientación de la luz solar. Por otro lado, Boonen y colaboradores reportaron el estado del arte del envejecimiento acelerado de materiales a base de cemento y la validación de procedimientos de envejecimiento seleccionados combinados con pruebas de actividad fotocatalítica normalizada para la reducción de NO_x (Boonen *et al.*, 2017). En su estudio se encontró que, en un ambiente natural la durabilidad del material y de la fotocatálisis permanecían con poca alteración. Solo en un ambiente muy abrasivo podría ocurrir casi una completa remoción de la capa superior del material y, por ende, desprendimientos del fotocatalizador. El proyecto europeo PICADA (Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment) pretendía verificar los beneficios proporcionados por el uso de TiO₂ fotocatalítico en materiales cementosos sobre un aparcamiento y paredes verticales (Almazán-Cruzado, 2020). El efecto de autolimpieza se llevó a cabo mediante la degradación de la rodamina B, medidas por colorimetrías y exponiéndolas a una lámpara de luz ultravioleta de 300 W a un metro de las muestras. Los resultados experimentales mostraron que las muestras recuperaron alrededor del 65% de su coloración inicial en menos de un día de exposición a la luz artificial. La evidencia experimental también demostró que la reducción de gases contaminantes peligrosos como NO_x puede alcanzar, en condiciones óptimas de exposición a la luz, circulación del viento, concentración inicial de contaminantes y condiciones del tráfico, un umbral del 60%. La iglesia de Dives in Misericordia en Milán fue un proyecto diseñado por el arquitecto americano Richard Meyer en el año 2000 y es un ejemplo clásico y pionero en la construcción con materiales fotocatalíticos. El diseño está claramente marcado por tres enormes estructuras fabricadas con 346 bloques de hormigón blanco prensado adicionado con dióxido de titanio. Seis años después de su construcción, se evaluó su propiedad autolimiante tanto de los bloques de hormigón exteriores como interiores no encontrando diferencias significativas (Chen y Poon, 2009). Las mediciones del cambio de color se tomaron 6 veces en 5 puntos de cada uno de los 30 paneles de hormigón seleccionados. Para ello utilizaron el sistema CIEL*a*b* (Comission International de l'Edairage) y las conclusiones fueron las siguientes: en los tres primeros años, las tres estructuras presentaron el mismo comportamiento, con un cambio de color entre sutil a ligeramente evidente. A partir del 5º año de comenzar las mediciones, se observó una clara diferencia con las estructuras exteriores, las cuales variaron de evidente a muy evidente, mientras que las estructuras interiores se mantuvieron casi iguales. La última medición la realizaron en el 6º año y mostró una estabilización del color tanto de superficies exteriores como interiores.

En la figura 10 se muestra un esquema de la aplicación de cementos fotocatalíticos con actividad fotocatalítica. En este caso, el cemento fue incorporado

con nanopartículas de TiO_2 dopadas con nitrógeno para mejorar su absorción de luz solar, además de nanopartículas de silice. Sin embargo, estas nanopartículas fueron depositadas por el método sol-gel, el cual podría presentar desprendimiento de material durante su vida útil. Por lo cual, es importante continuar investigando nuevas estrategias para el depósito adecuado de nanopartículas que permitan la purificación del aire, la creación de superficies autolimpiantes, así como evitar la dispersión de virus, hongos y bacterias en el medio ambiente.

FIGURA 10. Esquema de la aplicación de cementos photocatalíticos, en este caso funcionalizados con TiO_2 dopado con N y agregados de nanopartículas de sílice



Fuente: Elaboración de los autores.

Isla fotocatalítica

Muchos de los productos photocatalíticos aplicados sobre las infraestructuras urbanas se han estudiado de manera individual. Pero ¿qué ocurriría si los aplicáramos todos conjuntamente sobre un barrio o zona localizada de una ciudad con altas cotas de contaminación? Precisamente esto es lo que se ha desarrollado como “isla photocatalítica” (Almazán-Cruzado, 2020). Se trata de una medida pionera en España, pero que en otros países como Japón se está popularizando rápidamente (Soledad-Faraldos, 2012); consiste en aplicar los materiales photocatalíticos sobre una zona muy localizada, que puede ser una calle o un barrio, donde se den cita todas las aplicaciones anteriormente mencionadas, de tal forma que se creara una especie de “eco-barrio”. Este concepto está íntimamente relacionado con las *smart cities* que parten de la base de crear espacios que mejoren la calidad de vida en las ciudades a través de la implementación de materiales inteligentes (Han *et al.*, 2017b). El concepto de “isla photocatalítica” se podría aplicar sobre calles o barrios ya existentes, a nivel de conservación y mantenimiento, o bien sobre nuevas urbanizaciones (Almazán-Cruzado, 2020). En el caso de infraestructuras existentes, podría aplicarse spray sobre la fachada o la acera existente, siempre y cuando se encuentren en buen estado y sin necesidad de colocar

pavimento o concreto nuevo, repintado sobre el mobiliario urbano, rehabilitación de fachadas existentes o impermeabilización de cubiertas existentes. De esta forma, un barrio o calle actual podrían ser convertidos fácilmente en una isla fotocatalítica. Lo interesante de estas experiencias sería establecer un protocolo de medidas de niveles de contaminación en la zona donde se pretendiera ubicar la isla fotocatalítica, con objeto de comparar estos resultados con los que se obtendrían una vez llevada a cabo la citada isla. En el caso de nuevos planes urbanísticos o la creación de nuevas calles o urbanizaciones a menor escala, tendría más sentido incorporar directamente en los proyectos de construcción este tipo de materiales, fotocatalíticos, con el objetivo principal de respirar un aire más limpio dentro de una ciudad, zona o barrio con problemas de contaminación (Soledad-Faraldos, 2012).

Limitaciones y retos para superar

Aunque los efectos de autolimpieza, descontaminación y desinfección de los materiales de construcción fotocatalíticos son evidentes, aún existen problemas y limitación importantes sin resolver cuando estos materiales se utilizan, principalmente en aplicaciones de la vida real.

Una limitante es que el fotocatalizador solo es capaz de degradar los contaminantes que son absorbidos en su superficie. En espacios muy abiertos, la eficacia en la eliminación de contaminantes puede ser baja, pues solo una pequeña fracción de los contaminantes puede quedar atrapada. Por esta razón, la aplicabilidad de los materiales de construcción fotocatalíticos en ambientes exteriores está restringida a espacios confinados y calles cerradas donde, debido a la baja dispersión de contaminantes y la mala ventilación, la degradación de las sustancias peligrosas de interés se vuelve significativa (Witkowski *et al.*, 2019).

Además, la actividad fotocatalítica puede disminuirse por cambios fisicoquímicos en la superficie del cemento (Topçu *et al.*, 2020). Dicha desactivación del efecto fotocatalítico puede deberse a la deposición de especies superficiales, productos intermedios, subproductos o contaminantes difíciles de descomponer por los procesos de oxidación-reducción (Han *et al.*, 2017a). Esto implicaría la necesidad de un mantenimiento y lavados periódicos de las superficies para mantener las propiedades de remediación de la contaminación del aire, lo que para algunos esto podría conllevar un gasto extra. También se han encontrado otros factores que afectan el rendimiento fotocatalítico, los cuales pueden ser divididos principalmente en dos ambientes: interno y externo (Nguyen *et al.*, 2020). Los factores internos incluyen la recombinación par electrón-hueco del catalizador e hidratos con el material, la morfología del catalizador, tamaño de la partícula, la composición del material, la cantidad de fotocatalizador, su distribución dentro del material, el dopaje, el grado de exposición, dureza, entre otros. Como factores externos está la humedad, la temperatura, las condiciones de luz, las condiciones atmosféricas, la velocidad del

viento, los niveles de abrasión, la dispersión de los contaminantes, la situación geográfica, la intensidad de luz, la disponibilidad de oxígeno, la concentración del contaminante en el medio, la durabilidad del material de soporte, por mencionar algunos. Y es que los recubrimientos fotocatalíticos, cuando están presentes en superficies externas en condiciones de la vida real, están sujetos a diversos elementos naturales y al intemperismo ambiental (Singh *et al.*, 2021). Estos factores a la postre propician la gran variabilidad de resultados registrados en la reducción de NO_x tanto en campo como en laboratorio. De igual manera, este rango de resultados también se debe a las diferencias en el diseño del estudio y las métricas utilizadas para cuantificar la reducción del contaminante. Aunque los resultados de los estudios de laboratorio han mostrado ser más homogéneos que los resultados de campo, aún existen problemas en la estandarización. En general, se encuentran diferentes estándares de laboratorio que se utilizan para probar la eliminación del NO_x atmosférico por fotocatálisis (Soledad-Faraldos, 2012) y varios estudios no se ajustan a ninguno de ellos o citan diferentes métricas para la reducción del NO_x. De acuerdo con el estudio realizado por Rafique y colaboradores, el 50% de las investigaciones se llevaron a cabo utilizando alguna de las normas ISO, por lo cual los resultados eran comparables, mientras que el resto utilizaron su propia configuración, sin estandarización o basándose parcialmente en una. Incluso, algunos estudios deliberadamente no utilizan ningún tipo de norma porque consideraron que las condiciones impuestas en el estándar no son suficientes para recrear las condiciones reales en un entorno urbano (Rafique *et al.*, 2020).

Por otro lado, se ha registrado que las propiedades convencionales de los materiales a base de cemento cambian con la adición de nanopartículas. A pesar de que la mayoría de los estudios se enfocan en mejorar las propiedades del cemento, la fuerza, la resistencia, la estabilidad, la porosidad, entre otros, pueden verse directamente afectados por la adición del TiO₂ (Loh *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018). Esto se puede observar en algunos estudios que muestran resultados contradictorios, principalmente en cuanto a la resistencia mecánica se refiere. Sin embargo, es importante señalar que este efecto depende de las características del fotocatalizador adicionado (por ejemplo, cantidad, microestructura, dispersión) y su metodología de implementación (Yamazaki *et al.*, 2020).

Por estos motivos, los efectos de las nanopartículas de TiO₂ sobre las propiedades inherentes de las pastas, morteros, concreto u hormigón aún deben examinarse a fondo, ya que la literatura proporciona información controvertida, o no muy clara, sobre la cuestión de si la adición de este fotocatalizador en escala nanométrica introduce actividad puzolánica, o si este actúa simplemente como un relleno no reactivo con fotoactividades (McIntyre y Hart, 2021). Si bien varios reportes han documentado que el TiO₂ es químicamente inerte en el proceso de hidratación del cemento, también se ha sugerido que puede incentivar la creación de nuevos núcleos cristalinos durante esta etapa, provocando una disminución en la resistencia a la compresión de los mor-

teros (Gopalan *et al.*, 2020). Además, se ha reportado que la alta fragilidad y las grietas internas que podrían generarse debido a la inclusión de photocatalizadores son las razones de la disminución del rendimiento photocatalítico y la vida útil de los materiales de construcción. En general, se entiende de la literatura que la incorporación de TiO₂ en compuestos a base de cemento redujeron el tiempo de fraguado y mejoraron la resistencia de los morteros y hormigones, pero esta información solo se obtuvo de sus primeras etapas, por lo que su influencia sobre las propiedades mecánicas a largo plazo es todavía tema de discusión (Gopalan *et al.*, 2020).

Otro factor intrínseco, que muchas veces no se toma en cuenta, está asociado con las características internas del material de soporte, por ejemplo, su calidad, composición química, tipo y tamaño de grano, resistencia, conductividad, rugosidad, etc., que podrían afectar la fotoactividad del semiconductor utilizado. Es decir, no solo depende del tipo photocatalizador y cómo afecta al material, sino, además, a cómo el tipo de material a utilizar puede influir en el rendimiento photocatalítico (Janus y Zajac, 2016). Se ha demostrado que el rendimiento photocatalítico depende de la composición de la matriz cementosa, y la razón la han explicado con base en los potenciales de oxidación-reducción y la energía de fotoabsorción de los diferentes constituyentes (Jimenez-Relinque *et al.*, 2015).

Por el tamaño de grano, varios reportes indican que cuando las nanopartículas de TiO₂ se utilizan en revestimiento con base en cemento, tienden a aglomerarse cuando la mezcla todavía está en fase solución, conduciendo a la disminución de los sitios activos y a su actividad photocatalítica. Para evitar este problema, se ha sugerido emplear ultrasonido antes de mezclarlas con el cemento (Ershad-Langrouri *et al.*, 2019) o dispersarla mediante alto cizallamiento o molienda de bolas, lo que para varios investigadores se traduce en gastos extra.

Otro problema importante es que el TiO₂ presenta fotoactividad restringida al espectro ultravioleta (3.0 - 3.2 eV) que representa apenas ~5% de la radiación solar recibida en la Tierra, por lo cual existe un gran desafío para expandir su actividad a la región de luz visible (Nakata y Fujishima, 2012). Para lograr que el TiO₂ sea activo en luz visible se han incluido diversas modificaciones, como se muestra en la figura 2. No obstante, muchos de estos enfoques requieren mucho tiempo, están limitados a múltiples pasos e involucran metodologías con equipo costoso, lo cual, en última instancia, excluye por el momento la posibilidad de producción comercial de materiales de construcción a gran escala.

Otro ejemplo es el factor económico. Aunque los precios pueden variar en un intervalo amplio según el precio de mercado y la calidad del material, hoy en día, la baja rentabilidad económica del TiO₂ a base de materiales photocatalíticos es la principal limitación para su uso extensivo (Nakata y Fujishima, 2012). Esta evaluación de costos es todavía muy difícil de determinar porque se deben tomar en consideración varios parámetros como los costos de fabri-

cación, aplicación y mantenimiento a largo plazo. Sin olvidar que las ventajas de la aplicación de estos materiales como la mejora de las condiciones ambientales son muy difíciles de cuantificar en términos económicos. Asimismo, no existen muchos estudios acerca de la factibilidad económica sobre este tipo de material en el usuario final. Si se tiene constancia de que el coste del cemento fotocatalítico es muy superior al del cemento convencional (Jimenez-Relinque *et al.*, 2015), pero los ahorros económicos a largo plazo todavía no son muy claros.

Otra limitante concierne a que la fotocatálisis heterogénea como estrategia para remover el contaminante atmosférico se le considera secundario, dado que hoy en día algunos estudios todavía reportan bajos porcentajes en la degradación de contaminantes (Cordero *et al.*, 2020; Nguyen *et al.*, 2020). De tal modo, se ha propuesto emplear, a la par de este proceso, otras medias medioambientales como son el empleo de menos autos, la transición a autos eléctricos, nuevas metodologías ecoeficientes para los productos y servicios, así como el empleo de nuevos materiales “verdes”, que en conjunto apoyen este proceso de descontaminación (Zhou *et al.*, 2019).

A pesar de los diversos estudios prácticos ya realizados a nivel de campo sobre la efectividad en la remediación de contaminantes de estos materiales en varias ciudades del mundo, todavía se requiere más investigación al respecto, pero en otras latitudes donde las condiciones climatológicas y la calidad de los productos con los que se realizarían no han sido explorado aún a plenitud. Principalmente en Latinoamérica (Nevárez-Martínez *et al.*, 2017; González-Barriga, 2018; Moreno-Huerga, 2018), donde existen casi nulos estudios sobre el tema, y donde su clima y condiciones socioeconómicas podrían afectar el rendimiento del producto final.

Conclusiones

Desde hace tiempo se ha establecido que la mala calidad de aire representa un riesgo importante medioambiental y un problema creciente. La exposición constante a los contaminantes del aire ha causado diversos efectos en la salud, ha provocado un deterioro gradual en los inmuebles debido a la deposición de materia orgánica y contaminantes sobre su superficie. Debido a esto ha surgido un nuevo grupo de materiales inteligentes para la construcción que buscan reducir la contaminación del aire mediante la adición de nanopartículas fotocatalíticas de TiO₂ a su sistema. Estos nuevos materiales fotocatalíticos tendrán el potencial de mantener la ciudad limpia y de mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Para esto, se han realizado varios estudios que ya han pasado del laboratorio a condiciones naturales, donde se están obteniendo resultados aceptables. Y a pesar de las limitaciones e inconvenientes que este tipo de materiales pudieran presentar, aún se considera que su aplicación podría ser una solución viable para la remediación de la contaminación del aire bajo luz solar.



Referencias

- Abebe, B. Murthy, H. C. A. y Zereffa, E. (2018). Summary on adsorption and photocatalysis for pollutant remediation: mini review. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 08: 225-255. <https://doi.org/10.4236/jeas.2018.84012>.
- Agboola, O. y Benson, N. (2021). Physisorption and chemisorption mechanisms influencing micro (nano) plastics-organic chemical contaminants interactions: a review. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.678574>.
- Aguia, C. Angelo, J. Madeira, L. M. y Mendes, A. (2011). Photo-oxidation of NO using an exterior paint - Screening of various commercial titania in powder pressed and paint films. *Journal of Environmental Management*, 92: 1724-1732. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.02.010>.
- Allen, N. S. Edge, M. Verran, J. Caballeron, L. Abrusci, C. Stratton, J. Maltby, J. y Bygott, C. (2009). Photocatalytic surfaces: environmental benefits of nanotitania. *The Open Materials Science Journal*, 3, 6-27.
- Almazán-Cruzado, D. (2020). *Libro blanco de la fotocatálisis*, vol. 1. España: Asociación Ibérica de la Fotocatálisis.
- Ângelo, J. Andrade, L. y Mendes, A. (2014). Highly active photocatalytic paint for NO_x abatement under real-outdoor conditions. *Applied Catalysis A: General*, 484: 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2014.07.005>.
- Angulo-Ibáñez, A. Goitandia, A. M. Albo, J. Aranzabe, E. Beobide, G. Castillo, O. y Peréz-Yáñez, S. (2021). Porous TiO₂ thin film-based photocatalytic windows for an enhanced operation of optofluidic microreactors in CO₂ conversion. *iScience*, 24: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102654>.
- Ayyub, M. M. y Rao, C. N. R. (2020). Design of efficient photocatalysts through band gap engineering. *Nanostructured Photocatalysts*, 1-18. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817836-2.00001-6>.
- Bajorowicz, B. Kobylański, M. P. Malankowska, A. Mazierski, P. Nadolna, J. Pieczyńska, A. y Zaleska-Medynska, A. (2018). Application of metal oxide-based photocatalysis. *Metal Oxide-Based Photocatalysis*, 211-340. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811634-0.00004-4>.
- Ballari, M. M. y Brouwers, H. J. H. (2013). Full scale demonstration of air-purifying pavement. *Journal of Hazardous Materials*, 254-255: 406-414. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.02.012>.
- Baltes, L. Patachia, S. Tierean, M. Ekincioglu, O. y Ozkul, H. M. (2018). Photoactive glazed polymer-cement composite. *Appl. Surf. Sci.*, 438: 84-95. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.09.068>.
- Batsungnoen, K. Riediker, M. Suarez, G. y Hopf, N. B. (2020). From nano to micrometer size particles - A characterization of airborne cement particles during construction activities. *J Hazard Mater*, 398: 122838. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122838>.
- Beeldens, A. Cassar, L. y Murata, Y. (2011). Applications of TiO₂ photocatalysis for air purification. *Applications of Titanium Dioxide Photocatalysis to Construction Materials*, 23-35. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1297-3_5.

- Boonen, E. Beeldens, A. Dirkx, I. y Bams, V. (2017). Durability of cementitious photocatalytic building materials. *Catal. Today*, 287: 196-202.
- Brand, C. (2018). The health costs of air pollution from cars and vans. *University of Oxford, UK Energy Research Centre*, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>.
- Castellote, M. y Bengtsson, N. (2011). Principles of TiO₂ photocatalysis. *Applications of Titanium Dioxide Photocatalysis to Construction Materials*, 5-10. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1297-3_2.
- Chen, F. Yang, X. Mak, H. K. C. y Chan, D. W. T. (2010). Photocatalytic oxidation for antimicrobial control in built environment: A brief literature overview. *Building and Environment*, 45(8): 1747-1754. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.024>.
- Chen, J. Kou, S.-C. y Poon, C.-S. (2011). Photocatalytic cement-based materials: comparison of nitrogen oxides and toluene removal potentials and evaluation of self-cleaning performance. *Building and Environment*, 46(9): 1827-1833. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.03.004>.
- Chen, J. y Poon, C. S. (2009). Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. *Building and Environment*, 44(9): 1899-1906. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.002>.
- Chen, M. y Liu, Y. (2010). NO_x removal from vehicle emissions by functionality surface of asphalt road. *J. Hazard. Mater*, 174(1-3): 375-379. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.062>.
- Claire, E. Bygott, E. Maltby, J. y Stratton, J. (2007). Symposium on photocatalysis, environment and construction materials. *RILEM Publications SARL*, 1: 251-258.
- Comission, E. I. (2015). A clear choice for the UK: Technology options for tackling air pollution. *Tecnical Report, EIC*.
- Cordero, J. M. Hingorani, R. Jimenez-Relinque, E. Grande, M. Borge, R. Narros, A. y Castellote, M. (2020). NO_x removal efficiency of urban photocatalytic pavements at pilot scale. *Sci Total Environ*, 719: 137459. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137459>.
- Cros, C. J. (2013). *The use of selective materials to reduce human exposure to ozone and oxides of nitrogen*. Tesis de grado. The University of Texas at Austin.
- Daniyal, M. Akhtar, S. y Azam, A. (2019). Effect of nano-TiO₂ on the properties of cementitious composites under different exposure environments. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6): 6158-6172. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.010>.
- De Melo, J. V. S. Triches, G. Gleize, P. J. P. y Villena, J. (2012). Development and evaluation of the efficiency of photocatalytic pavement blocks in the laboratory and after one year in the field. *Construct. Build. Mater*, 37, 310-319.
- Dell'Edera, M. Lo Porto, C. De Pasquale, I. Petronella, F. Curri, M. L. Agostiano, A. y Comparelli, R. (2021). Photocatalytic TiO₂-based coatings for environmental applications. *Catalysis Today*, 380: 62-83. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.04.023>.
- Di Paola, A. Garcia-Lopez, E. Marci, G. y Palmisano, L. (2012). A survey of photocatalytic materials for environmental remediation. *J Hazard Mater*, 211-212: 3-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.050>.
- Diamanti, M. V. Paolini, R. Rossini, M. Aslan, A. B. Zinzi, M. Poli, T. y Pedeferri, M. P.

- (2015). Long term self-cleaning and photocatalytic performance of anatase added mortars exposed to the urban environment. *Construction and Building Materials*, 96: 270-278. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.028>.
- EDSA, B. P. (2013). BoysenKnoxoutProject. HugeDomains.com. <http://boysenknoxout-project.com/>.
- Ershad-Langroudi, A. Fadaei, H. y Ahmadi, K. (2019). Application of polymer coatings and nanoparticles in consolidation and hydrophobic treatment of stone monuments. *Iran Polym Journal*, 28: 1-19. <https://doi.org/10.1007/s13726-018-0673-y>.
- Fan, W. Chan, K. Y. Zhang, C. M. y Leung, M. K. (2017). Advanced solar photocatalytic asphalt for removal of vehicular NOx. *Energy Proc.*, 143: 811-816. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.767>.
- Feng, S. Song, J. Liu, F. Fu, X. Guo, H. Zhu, J. Zeng, Q. Peng, X. Wang, X. Ouyang, Y. y Li, F. (2020). Photocatalytic properties, mechanical strength and durability of TiO₂/cement composites prepared by a spraying method for removal of organic pollutants. *Chemosphere*, 254: 126813. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126813>.
- Fermoso, J. Sánchez, B. y Suarez, S. (2020). Air purification applications using photocatalysis. *Nanostructured Photocatalysts*, 99-128. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817836-2.00005-3>.
- Folli, A. (2015). Field study of air purifying paving elements containing TiO₂. *Atmos. Environ. Monit. Assess.*, 107(2): 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.025>.
- Folli, A. Pochard, I. Nonat, A. Jakobsen, U. H. Shepherd, A. M. y Macphee, D. E. (2010). Engineering photocatalytic cements: understanding TiO₂ surface chemistry to control and modulate photocatalytic performances. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(10): 3360-3369. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03838.x>.
- Foster, H. A. Ditta, I. B. Varghese, S. y Steele, A. (2011). Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Appl Microbiol Biotechnol*, 90(6): 1847-1868. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3213-7>.
- Ganesh, V. A. Raut, H. K. Nair, A. S. y Ramakrishna, S. (2011). A review on self-cleaning coatings. *Journal of Materials Chemistry*, 21(41). <https://doi.org/10.1039/c1jm12523k>.
- Ganguly, P. Byrne, C. Breen, A. y Pillai, S. C. (2018). Antimicrobial activity of photocatalysts: fundamentals, mechanisms, kinetics and recent advances. *Applied Catalysis B: Environmental*, 225: 51-75. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.018>.
- Gołąbiewska, A. Kobylański, M. P. y Zaleska-Medynska, A. (2018). Fundamentals of metal oxide-based photocatalysis. *Metal Oxide-Based Photocatalysis*: 3-50. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811634-0.00002-0>.
- González-Barriga, G. A. (2018). *Fotocatálisis aplicada a los materiales de la construcción*. Chile: Universidad Mayor.
- Gopalan, A. I. Lee, J. C. Saianand, G. Lee, K. P. Sonar, P. Dharmarajan, R. Hou, Y. L. Ann, K. Y. Kannan, V. y Kim, W. J. (2020). Recent progress in the abatement of

- hazardous pollutants using photocatalytic TiO₂-based building materials. *Nanomaterials (Basel)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/nano10091854>.
- Grabowska, E. Marchelek, M. Paszkiewicz-Gawron, M. y Zaleska-Medynska, A. (2018). Metal oxide photocatalysts. *Metal Oxide-Based Photocatalysis*, 51-209. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811634-0.00003-2>.
- Guerrini, G. L. (2012). Photocatalytic performances in a city tunnel in Rome. *J. Construction and Building Materials*, 27: 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.065>.
- Guo, M. Z. Ling, T. C. y Poon, C. S. (2013). Nano-TiO₂-based architectural mortar for NO removal and bacteria inactivation: Influence of coating and weathering conditions. *Cement and Concrete Composites*, 36: 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.006>.
- Guo, M. Z. Ling, T. C. y Poon, C. S. (2017). Photocatalytic NO x degradation of concrete surface layers intermixed and spray-coated with nano-TiO₂: influence of experimental factors. *Cem. Concr. Compos.*, 83: 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.022>.
- Guo, M. Z. Maury-Ramirez, A. y Poon, C. S. (2015). Photocatalytic activities of titanium dioxide incorporated architectural mortars: effects of weathering and activation light. *Build. Environ.*, 94: 395-402. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.08.027>.
- Guo, M. Z. Maury-Ramirez, A. y Poon, C. S. (2016). Self-cleaning ability of titanium dioxide clear paint coated architectural mortar and its potential in field application. *J. Clean. Prod.*, 112: 3583-3588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.079>.
- Hamidi, F. y Aslani, F. (2019). TiO₂-based photocatalytic cementitious composites: materials, properties, influential parameters, and assessment techniques. *Nanomaterials (Basel)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/nano9101444>.
- Han, B. Zhang, L. y Ou, J. (2017a). Photocatalytic concrete. *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures*, 299-311. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9_17.
- Han, B. Zhang, L. y Ou, J. (2017b). *Smart and multifunctional concret (photocatalytic concrete)*. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9>.
- Hanaor, D. y C. Sorrell. (2011). Review of the anatase to rutile phase transformation. *Journal of Materials science*, 46(4): 855-874. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-5113-0>.
- Hashimoto, K. Hiroshi, I. y A. F. (2005). TiO₂ photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1 Regular Papers Short Notes and Review Papers*, 44(12): 8269. <https://doi.org/10.1143/JJAP.44.8269>.
- Hassan, M. M. Dylla, H. Mohammad, L. N. y Rupnow, T. (2010). Evaluation of the durability of titanium dioxide photocatalyst coating for concrete pavement. *Constr. Build. Mater.*, 24(8): 1456-1461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.009>.
- Hay, S. O. Obee, T. Luo, Z. Jiang, T. Meng, Y. He, J. Murphy, S. C. y Suib, S. (2015). The viability of photocatalysis for air purification. *Molecules*, 20(1): 1319-1356. <https://doi.org/10.3390/molecules20011319>.
- Hoffmann, M. R. Martin, S. T. Choi, W. y Bahnemann, D. W. (1995). Environmental

- applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical Reviews*, 95: 69-96. <https://doi.org/10.1021/cr00033a004>.
- Italcementi, T. X. (2009). *The active photocatalytic principle. Scientific results: laboratory test*. Reporte técnico, 1. Italcementi Group. Bergamo, Italia. <https://p2infohouse.org/ref/41/40516.pdf>.
- Janus, M. Madraszewski, S. Zajac, K. y Kusiak-Nejman, E. (2020). A new preparation method of cement with photocatalytic activity. *Materials (Basel)*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/ma13235540>.
- Janus, M. Madraszewski, S. Zajac, K. Kusiak-Nejman, E. Morawski, A. W. y Stephan, D. (2019). Photocatalytic activity and mechanical properties of cements modified with TiO₂/N. *Materials (Basel)*, 12(22). <https://doi.org/10.3390/ma12223756>.
- Janus, M. y Zajac, K. (2016). Concretes with photocatalytic activity. *High Performance Concrete Technology and Applications*. <https://doi.org/10.5772/64779>.
- Ji, Y. Mattsson, A. Niklasson, G. A. Granqvist, C. G. y Österlung, L. (2019). Synergistic TiO₂/VO₂ window coating with thermochromism, enhanced luminous transmittance, and photocatalytic activity. *Joule*, 3(10): 2457-2471.
- Jimenez-Relinque, E. Rodriguez-Garcia, J. y Castillo, A. C. M. (2015). Characteristics and efficiency of photocatalytic cementitious materials: type of binder, roughness and microstructure. *Cement and Concrete Research*, 71: 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.003>.
- Khanna, S. Paneliya, S. Hinshu, H. Singh, A. P. Bhatt, N. Barik, B. Mishra, R. y Motiani, R. (2020). Incorporation of anatase-TiO₂ in cement to enhance the self-cleaning and mechanical properties: a systematic study. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.625>.
- Khannyna, S. Gil, M. L. A. Addou, M. y Mosquera, M. J. (2022). Dye decomposition and air de-pollution performance of TiO₂/SiO₂ and N-TiO₂/SiO₂ photocatalysts coated on Portland cement mortar substrates. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(42): 63112-63125. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20228-8>.
- Khin, M. M. Nair, A. S. Babu, V. J. Murugan, R. y Ramakrishna, S. (2012). A review on nanomaterials for environmental remediation. *Energy & Environmental Science*, 5(8). <https://doi.org/10.1039/c2ee21818f>.
- Khitab, A. Alam, M. Riaz, H. y Rauf, S. (2014). Smart concretes: review. *International Journal of Advances in Life Science and Technology*, 1(2): 47-53. <https://doi.org/10.18488/journal.72/2014.1.2/72.2.47.53>.
- Loh, K. Gaylarde, C. C. y Shirakawa, M. A. (2018). Photocatalytic activity of ZnO and TiO₂ 'nanoparticles' for use in cement mixes. *Construction and Building Materials*, 167: 853-859. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.103>.
- Luévano-Hipólito, E. y Martínez-de la Cruz, A. (2018). Photocatalytic stucco for NO removal under artificial and by real weatherism. *Construction and Building Materials*, 174: 302-309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.095>.
- Maggos, T. Bartzis, J. G. Liakou, M. y Gobin, C. (2007). Photocatalytic degradation of NO_x gases using TiO₂-containing paint: a real scale study. *J Hazard Mater*, 146(3): 668-673. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.079>.
- Maggos, T. Plassais, J. G. Bartzis, J. G. Vasilakos, C. Moussiopoulos, N. y Bonafous,

- L. (2008). Photocatalytic degradation of NO_x in a pilot street canyon configuration using TiO₂-mortar panels. *Environ. Monit. Assess.* 136: 35-44. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9722-2>.
- Mamaghani, A. H. Haghishat, F. y Lee, C.-S. (2020). Role of titanium dioxide (TiO₂) structural design/morphology in photocatalytic air purification. *Applied Catalysis B: Environmental*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118735>.
- McIntyre, H. M. y Hart, M. L. (2021). Immobilization of TiO₂ nanoparticles in cement for improved photocatalytic reactivity and treatment of organic pollutants. *Catalysts*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/catal11080938>.
- Moreno-Huerga, I. (2018). *Fotocatálisis en materiales en base de cemento evaluación de autolimpieza de fotocatalíticos en el espectro visible frente al UV*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Nakata, K. y Fujishima, A. (2012). TiO₂ photocatalysis: design and applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13(3): 169-189. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.06.001>.
- Nevárez-Martínez, M. C. Espinoza-Montero, P. J. Quiroz-Chávez, F. J. y Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂. *Avances en Química*, 12(2-3), 1-22. Venezuela: Universidad de los Andes.
- Nguyen, V.-H. Nguyen, B.-S. Huang, C.-W. Le, T.-T. Nguyen, C. C. Nhi Le, T. T. Heo, D. Ly, Q. V. Trinh, Q. T. Shokouhimehr, M. Xia, C. Lam, S. S. Vo, D.-V. N. Kim, S. Y. y Le, Q. V. (2020). Photocatalytic NO_x abatement: recent advances and emerging trends in the development of photocatalysts. *Journal of Cleaner Production*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121912>.
- Norhasri, M. S. M. Hamidah, M. S. y Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 133: 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005>.
- Papadaki, D. Kiriakidis, G. y Tsoutsos, T. (2018). Applications of nanotechnology in construction industry. *Fundamentals of Nanoparticles*, 343-370. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-51255-8.00011-2>.
- Pelaez, M. Nolan, N. T. Pillai, S. C. Seery, M. K. Falaras, P. Kontos, A. G. Dunlop, P. S. M. Hamilton, J. W. J. Byrne, J. A. O'Shea, K. Entezari, M. H. y Dionysiou, D. D. (2012). A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 125: 331-349. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.05.036>.
- Pérez-Nicolás, M. Navarro-Blasco, I. Fernández, J. M. y Alvarez, J. I. (2017). Atmospheric NO_x removal: study of cement mortars with iron-and vanadium-doped TiO₂ as visible light-sensitive photocatalysts. *Constr. Build. Mater.*, 149: 257-271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.132>.
- Pietrzak, A. Adamus, J. y Langier, B. (2016). Application of titanium dioxide in cement and concrete technology. *Key Engineering Materials*, 687: 243-249. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.687.243>.
- Pulvirenti, B. Baldazzi, S. Barbano, F. Brattich, E. y Di Sabatino, S. (2020). Numerical simulation of air pollution mitigation by means of photocatalytic coatings in real-world street canyons. *Building and Environment*, 186. <https://doi.org/10.1016/>.

- buildenv.2020.107348.
- Qiu, L. Dong, S. Ashour, A. y Han, B. (2020). Antimicrobial concrete for smart and durable infrastructures: a review. *Construction and Building Materials*, 260(120456): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120456>.
- Rafique, M. S. Tahir, M. B. Rafique, M. y Shakil, M. (2020). Photocatalytic nanomaterials for air purification and self-cleaning. *Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications*, 203-219. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821192-2.00012-7>.
- Rashed, M. N. (2013). Adsorption technique for the removal of organic pollutants from water and wastewater. *Organic Pollutants-Monitoring, Risk and Treatment*, 167-194. <https://doi.org/10.5772/54048>.
- Rodriguez-Gonzalez, V. Obregon, S. Patron-Soberano, O. A. Terashima, C. y Fujishima, A. (2020). An approach to the photocatalytic mechanism in the TiO₂-nanomaterials microorganism interface for the control of infectious processes. *Appl Catal B*, 270, 118853. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118853>.
- Russell, H. S. Frederickson, L. B. Hertel, O. Ellermann, T. y Jensen, S. S. (2021). A review of photocatalytic materials for urban NO_x remediation. *Catalysts*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/catal11060675>.
- Sagir, M. Tahir, M. B. Rafique, M. Rafique, M. S. y Nawaz, T. (2020). Photocatalytic nanomaterials for CO₂ photoreduction and disinfection of bacteria. *Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications*, 159-189. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821192-2.00010-3>.
- Salthammer, T. y Fuhrmann, F. (2007). Photocatalytic surface reactions on indoor wall paint. *Environ. Sci. Technol.*, 41: 6573-6578. <https://doi.org/10.1021/es070057m>.
- Salvadores, F. Reli, M. Alfano, O. M. Koci, K. y Ballari, M. L. M. (2020). Efficiencies evaluation of photocatalytic paints under indoor and outdoor air conditions. *Front Chem*, 8: 551710. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.551710>.
- Sansotera, M. Geran, S. Baggio, A. Bianchi, C. Pedeferri, M. P. Diamanti, M. V. y Navarrini, W. (2018). Absorption and photocatalytic degradation of VOCs by perfluorinated ionomer coating with TiO₂ nanopowders for air purification. *Chemical Engineering Journal*, 361. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.136>.
- Schilling, K. Bradfor, B. Castelli, D. Dufour, E. Nash, J. F. Pape, W. Schulte, S. Tooley, I. van den Bosch, J. y Schellauf, F. (2010). Human safety review of "nano" titanium dioxide and zinc oxide. *Photochem Photobiol Sci.*, 4: 495-509. <https://doi.org/10.1039/b9pp00180h>.
- Segundo, I. R. Ferreira, C. Freitas, E. F. Carneiro, J. O. Fernandes, F. Junior, S. L. y Costa, M. F. (2018). Assessment of photocatalytic, superhydrophobic and self-cleaning properties on hot mix asphalts coated with TiO₂ and/or ZnO aqueous solutions. *Constr. Build. Mater.*, 166: 500-509. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.106>.
- Shu, X. Huang, B. y Liu, J. (2013). Special issue on materials innovations for sustainable infrastructure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(7): 825-828. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000840](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000840).
- Singh, L. P. Dhaka, R. K. Ali, D. Tyagi, I. Sharma, U. y Banavath, S. N. (2021). Reme-

- diation of noxious pollutants using nano-titania-based photocatalytic construction materials: a review. *Environ Sci Pollut Res Int*, 28(26): 34087-34107. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14189-7>.
- Soledad-Faraldos, M. (2012). *Guía práctica de la fotocatálisis aplicada a infraestructuras urbanas*. España: Asociación Ibérica de Fotocatálisis, CONAMA.
- Tahir, M. B. Iqbal, T. Rafique, M. Rafique, M. S. Nawaz, T. y Sagir, M. (2020). Nanomaterials for photocatalysis. *Nanotechnology and Photocatalysis for Environmental Applications*, 65-76. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821192-2.00005-x>.
- Tong, H. Ouyang, S. Bi, Y. Umezawa, N. Oshikiri, M. y Ye, J. (2012). Nano-photocatalytic materials: possibilities and challenges. *Adv. Mater.*, 24(2): 229-251. <https://doi.org/10.1002/adma.201102752>.
- Topçu, I. B. Akkan, E. Uygunoğlu, T. y Çalışkan, K. (2020). Self-cleaning concretes: an overview. *J. Cem. Based Compos.*, 2: 6-12. <https://doi.org/10.36937/ceba-com.2020.002.002>.
- Wang, D. Leng, Z. Hüben, M. Oeser, M. y Steinauer, B. (2016). Photocatalytic pavements with epoxy-bonded TiO₂-containing spreading material. *Constr. Build. Mater.*, 107, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.164>.
- Wang, L. Zhang, H. y Gao, Y. (2018). Effect of TiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of cement at low temperatures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018: 1-12. <https://doi.org/10.1155/2018/8934689>.
- Wang, R. Sakai, N. Fujishima, A. Watanabe, T. y Hashimoto, K. (1999). Studies of surface wettability conversion on TiO₂ single-crystal surface. *J. Phys. Chem. B.*, 103(12): 2188-2194. <https://doi.org/10.1021/JP983386X>.
- Wang, Z. Gauvin, F. Feng, P. Brouwers, H. J. H. y Yu, Q. (2020). Self-cleaning and air purification performance of Portland cement paste with low dosages of nano-dispersed TiO₂ coatings. *Construction and Building Materials*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120558>.
- Wang, Z. Yu, Q. Gauvin, F. Feng, P. Qianping, R. y Brouwers, H. J. H. (2020). Nano-dispersed TiO₂ hydrosol modified Portland cement paste: The underlying role of hydration on self-cleaning mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106156>.
- Witkowski, H. Jackiewicz-Rek, W. Chilmon, K. Jarosławski, J. Tryfon-Bojarska, A. y Gąsiński, A. (2019). Air purification performance of photocatalytic concrete paving blocks after seven years of service. *Applied Sciences*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/app9091735>.
- Yamazaki, S. Takaki, D. Nishiyama, N. y Yamazaki, Y. (2020). Factors affecting photocatalytic activity of TiO₂. *Current Developments in Photocatalysis and Photocatalytic Materials*, 23-38. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819000-5.00003-5>.
- Yang, L. Hakki, A. Wang, F. y Macphee, D. E. (2018). Photocatalyst efficiencies in concrete technology: the effect of photocatalyst placement. *Appl. Catal. B Environ.*, 222: 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.10.013>.
- Yousefi, A. Allahverdi, A. y Hejazi, P. (2013). Effective dispersion of nano-TiO₂ powder for enhancement of photocatalytic properties in cement mixes. *Constr. Build. Mater.*, 41, 224-230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.057>.

Yu, Q. L. Hendrix, Y. Lorencik, S. y Brouwers, H. J. H. (2018). Field study of NO_x degradation by a mineral-based air purifying paint. *Building and Environment*, 142: 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.014>.

Zhou, Y. Luo, B. Li, J. Hao, Y. Yang, W. Shi, F. Chen, Y. Simayi, M. y Xie, S. (2019). Characteristics of six criteria air pollutants before, during, and after a severe air pollution episode caused by biomass burning in the southern Sichuan Basin, China. *Atmospheric Environment*, 215: 116840. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116840>.