

Más que Hormigón: Superficies fotoactivas que mejoran la calidad del aire y mitigan la carga microbiológica

Marc Lucas

Industrial Breinco S.A., Llinars del Vallès (Barcelona), España, mlucas@breinco.com

Resumen

El presente artículo técnico evalúa el desempeño de la tecnología fotocatalítica AirClean® incorporada en prefabricados de hormigón, enfocándose en sus propiedades descontaminantes y de mitigación microbiológica en superficies urbanas. Mediante la incorporación de Dióxido de Titanio (TiO₂), el material actúa como un semiconductor activado por radiación UV-A. Se analizan los mecanismos de oxidación avanzada que degradan contaminantes atmosféricos e inducen la inactivación de patógenos. Los resultados experimentales de degradación de contaminantes y actividad biocida, validados mediante ensayos bajo las normativas internacionales, demuestran una reducción drástica de contaminantes atmosféricos, colonias bacterianas y una inhibición completa del crecimiento de esporas fúngicas en la superficie del material. Complementariamente, se correlacionan estos datos con la durabilidad mecánica del catalizador frente a la abrasión y su inocuidad eco toxicológica en el ciclo hídrico urbano. El estudio concluye que los pavimentos bio-activos representan una solución madura y escalable para la transformación de la infraestructura urbana en sumideros de contaminación y barreras sanitarias pasivas.

Palabras Clave: Fotocatálisis, Degradación contaminantes atmosféricos, Actividad antimicrobiana, Hormigón sostenible.

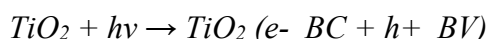
1 Introducción

La urbanización contemporánea y el incremento de superficies pavimentadas expuestas a una alta densidad peatonal plantean retos críticos no solo en términos de calidad del aire, sino también en la proliferación de vectores microbiológicos en el mobiliario y la pavimentación. Los espacios urbanos con altos índices de humedad relativa o expuestos a deposición de materia orgánica, favorecen la colonización microbiana y la formación de bio-films en materiales porosos tradicionales.

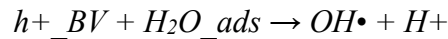
La tecnología AirClean®, desarrollada y monitorizada industrialmente a lo largo de las últimas dos décadas, utiliza el principio de la fotocatalisis heterogénea para mitigar esta problemática. Como propiedad principal la aplicación de prefabricados de hormigón fotocatalítico se ha asociado históricamente a la reducción de óxidos de nitrógeno (NO_x), este artículo expone de manera rigurosa la capacidad de estas superficies para actuar como desinfectantes pasivos continuos, reduciendo de forma significativa la carga patógena ambiental sin necesidad de agentes químicos adicionales [1, 2].

2 Fundamento Físicoquímico y Mecanismo

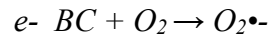
El principio activo de la tecnología radica en la excitación electrónica del TiO₂. Cuando el fotocatalizador absorbe un fotón con energía igual o superior a su band gap, se produce la promoción de un electrón desde la banda de valencia (BV) hacia la banda de conducción (BC), generando un par electrón-hueco:



El hueco generado en la banda de valencia (h^+_{BV}) posee un potencial de oxidación altamente positivo, permitiéndole reaccionar con el agua adsorbida en la estructura molecular del hormigón para generar radicales hidroxilos (OH^\bullet):

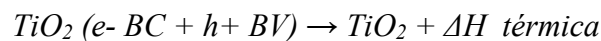


Simultáneamente, el electrón de la banda de conducción (e^-_{BC}) reduce el oxígeno molecular atmosférico para dar lugar al radical libre superóxido ($O_2^{\bullet-}$):



Al tratarse de un proceso puramente electroquímico y superficial, la red cristalina del TiO_2 actúa estrictamente como un catalizador sólido; por lo tanto, no sufre degradación estequiométrica, alteración química ni consumo de masa a lo largo del tiempo.

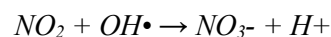
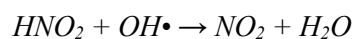
Aquellos pares portadores de carga que no participan en los procesos redox interfaciales experimentan una recombinación electrónica natural. Los electrones remanentes en la BC decaen de forma no radiativa hacia los orbitales vacíos de la BV, liberando la energía térmica residual excedente:



Este balance restituye por completo la configuración electrónica fundamental del semiconductor, garantizando la perfecta reversibilidad del ciclo y la sostenibilidad operativa del pavimento ante múltiples ciclos consecutivos de irradiación lumínica. El TiO_2 como catalizador, vuelve a su estado inicial para volver a empezar el proceso.

2.1 Mecanismo de descontaminación atmosférica

Las especies reactivas de oxígeno generadas inician una ruta de oxidación competitiva sobre los óxidos de nitrógeno (NO_x) adsorbidos en la superficie del ligante cementicio. El monóxido de nitrógeno (NO) es oxidado consecutivamente a dióxido de nitrógeno (NO_2) y, finalmente, a la especie estable ion nitrato (NO_3^-):



Los productos resultantes (NO_3^-) son neutralizados por la alta alcalinidad de la matriz del hormigón, quedando fijados transitoriamente en forma de sales de nitrato cálcico hasta su lixiviación natural por escorrentía pluvial o lavado superficial, lo que regenera de forma natural los centros activos del semiconductor. La concentración de NO_3^- en el agua de lixiviación ha demostrado ser inocua para las Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR).

2.2 Mecanismo Biocida y Destrucción Celular

A diferencia de los desinfectantes químicos de acción temporal, las especies reactivas de oxígeno generadas continuamente en la superficie del pavimento interactúan directamente con los microorganismos mediante un proceso secuencial de peroxidación lipídica de la membrana externa. Los radicales OH^\bullet atacan los ácidos grasos poliinsaturados de la pared celular bacteriana, alterando drásticamente su permeabilidad. Esta pérdida de integridad estructural provoca la fuga de iones

esenciales (como el K+) y la pérdida del gradiente electroquímico, culminando en la lisis completa del microorganismo y la posterior degradación fotooxidativa de su material genético [1, 2].

3 Metodología Experimental y Validación Normativa

Para certificar el comportamiento de la tecnología frente a amenazas biológicas en condiciones estandarizadas de laboratorio, se sometieron muestras comerciales de pavimentos a ensayos de actividad antimicrobiana y antifúngica controlados por laboratorios externos acreditados.

3.1 Ensayo de Actividad Antibacteriana (ISO 27447)

La evaluación de la eficacia bactericida se realizó implementando el método de cobertura con lámina hidrofílica bajo la norma ISO 27447 [1]. Las probetas fotocatalíticas fueron inoculadas con suspensiones bacterianas de cepas de referencia de *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*. Las muestras se dividieron en dos grupos de control: uno mantenido en condiciones de oscuridad estricta y otro expuesto a una radiación ultravioleta controlada (UV-A) de baja intensidad. Tras el periodo de incubación, se determinó el valor de la actividad antibacteriana:

Staphylococcus aureus: 69,80 %

Escherichia coli: 42,46 % [1].

3.2 Ensayo de Actividad Antifúngica (ISO 13125)

La resistencia del hormigón ante la colonización por hongos y esporas se validó de acuerdo con la norma ISO 13125 [2]. Se utilizaron inóculos de hongos filamentosos de alta persistencia ambiental. El seguimiento de las probetas demostró que las especies reactivas generadas en la superficie degradan de forma continua las estructuras que componen las paredes fúngicas, impidiendo la fijación del hongo y deteniendo por completo su ciclo de reproducción y esporulación de forma pasiva. Se determinó el valor de la actividad antifúngica:

Aspergillus niger: > 99,90 %

Penicillium pinophilum: > 99,81 % [2].

4 Inocuidad sobre el Ciclo del Agua (Ensayos Fraunhofer)

Los análisis ecotoxicológicos desarrollados en colaboración con el Instituto Fraunhofer (Alemania) evaluaron la lixiviación de compuestos derivados de la actividad fotocatalítica (sales de nitrato) [3]. Los modelos de peor escenario simulado determinaron que las concentraciones residuales de iones nitrato en las aguas subterráneas atribuibles exclusivamente a las reacciones fotocatalíticas se mantienen en valores máximos de 1.6 mg/l. Este valor se sitúa drásticamente por debajo del umbral de potabilidad legal fijado por la Unión Europea (50 mg/l), confirmando que la actividad biocida y descontaminante del pavimento es completamente segura para los acuíferos y ecosistemas hídricos [3].

5 Conclusiones

La investigación y el despliegue industrial de la tecnología AirClean® demuestran que el pavimento urbano puede evolucionar para convertirse en un agente activo de salud pública. Los ensayos normalizados bajo estándares ISO confirman que la fotocatalisis aplicada a prefabricados de hormigón mitiga de manera eficaz la concentración de contaminantes y la proliferación microbiológica y fúngica en el entorno urbano de contacto. Esta propiedad biocida, sumada a una total inocuidad medioambiental, valida la viabilidad y la necesidad de implantar estas soluciones a gran escala en el diseño de las ciudades contemporáneas.

Referencias

- [1] IVAMI (2019). Prueba de actividad antimicrobiana de materiales fotocatalíticos semiconductores - producto Aireclean® (Norma ISO 27447:2019). Registro N°: D/22/B0720. Instituto Valenciano de Microbiología, Bétera, Valencia, España.
- [2] IVAMI (2019). Prueba de actividad antifúngica de materiales fotocatalíticos semiconductores con el producto Aireclean® (Norma ISO 13125:2013). Registro N°: D/22/B0721. Instituto Valenciano de Microbiología, Bétera, Valencia, España.
- [3] Instituto Fraunhofer (2010). Estimación prospectiva del riesgo para el medio ambiente debido a los productos en transformación (Sales de Nitrato) en pavimentos fotocatalíticos Breinco. Fraunhofer IME, Schmallenberg, Alemania.