

MATERIALES de CONSTRUCCIÓN *para frenar la contaminación urbana*

Este trabajo aborda el nuevo uso de los materiales de construcción como elementos urbanos para la descontaminación atmosférica. En el mismo se plantea la problemática que origina en la salud humana la presencia de los óxidos de nitrógeno en la atmósfera, así como las principales fuentes de emisión. Para abordar la eliminación de gases NO_x de la atmósfera se están desarrollando materiales de construcción con aditivos fotocatalizadores como el TiO_2 . Mediante una secuencia de reacciones químicas iniciadas por la luz solar, el aditivo TiO_2 es capaz de degradar a las moléculas de NO_x y NO . La adecuada formulación de las materias primas constituyentes permite obtener nuevos morteros de cemento de gran eficiencia para la descontaminación de atmósferas urbanas.

Por **L. SÁNCHEZ GRANADOS**. Universidad de Córdoba. Profesor titular. (luis-sanchez@uco.es). **M. CRUZ YUSTA**. Universidad de Córdoba, Profesor contratado, doctor interino. **I. MÁRMOL PRADOS**. Universidad de Córdoba, colaboradora honoraria.



Iglesia Dives in Misericordia, en Roma, vanguardista construcción a base de cemento con TiO_2 .

El problema de la contaminación del aire continúa siendo motivo de seria preocupación en España y en el resto de Europa. La calidad del aire, o mejor dicho, su degradación o contaminación, es el resultado de fenómenos complejos derivados de una pluralidad de causas y efectos, asociados en general a la actividad humana y a la emisión de contaminantes a la atmósfera. Teniendo en cuenta los importantes efectos nocivos en la salud y en el medio ambiente, disponer de un aire limpio se ha convertido en un objetivo prioritario de la política ambiental y de las estrategias de desarrollo sostenible, ya que es un factor determinante de la calidad de vida y que se percibe como una demanda social creciente.

Uno de los grandes desafíos al que se enfrenta la sostenibilidad urbana es el de los cambios e impactos cuantitativos y cualitativos no deseados, que surgen dentro de las ciudades como consecuencia de los modos de vida urbanos. El gran incremento de la actividad industrial en nuestras ciudades, así como el crecimiento desordenado de las mismas, ha originado cambios muy profundos en la composición de la atmósfera, siendo la quema de combustibles fósiles y las emisiones procedentes de la industria y de los sistemas de transporte las principales fuentes de emisión de sustancias nocivas. El resultado final es la contaminación de la atmósfera urbana que afecta directamente a la salud de las personas y a los ecosistemas. Dado que respirar aire limpio y sin riesgos para la salud es un derecho inalienable de todo ser humano, resulta necesario exigir la puesta en valor de políticas integradas innovadoras que incidan no solo en la forma de vivir de los ciudadanos, sino también en los patrones de planificación urbanística, en los elementos estructurales de las ciudades y en los modelos de transporte de la población.

Los sistemas de transporte y la contaminación atmosférica

En los entornos urbanos, el transporte es uno de los focos principales de emisión de contaminantes y gases. Así, un vehículo medio emite por su tubo de escape una combinación de sustancias contaminantes entre las que destacan por su nocividad las siguientes^[1]:

- El CO₂, gas que acentúa el efecto invernadero y el cambio climático en nuestro planeta.
- Los óxidos de nitrógeno (NO_x), gases que afectan a la salud humana, contribuyen a la formación de lluvia ácida y también acentúan el efecto invernadero y el cambio climático del planeta.
- Los hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles (COVs) procedentes de la combustión incompleta de los combustibles, siendo cancerígenos los policíclicos (HAPs) y aromáticos, y produciendo otros la irritación de la vista y de las vías respiratorias superiores.

■ La reacción de los compuestos orgánicos con los óxidos de nitrógeno genera ozono en las capas bajas de la atmósfera, especialmente en una región que, como la mediterránea, alcanza temperaturas muy elevadas en el periodo estival. Este cóctel fotoquímico produce dolor de cabeza e irritación del sistema respiratorio, además de contribuir a la degradación de las masas forestales.

■ Pb y otros metales pesados tóxicos como Cd, Cu, Cr, Ni, Se y Zn.

En los estudios realizados por la Unión Europea, el coste que provocan el ruido y la contaminación emitidos por el sistema de transporte se estima en un 0,6% del PIB. Más del 90% de este valor está asociado al transporte por carretera^[1]. En lo relativo a las emisiones debidas al transporte en el entorno urbano, los gases CO, CO₂ y NO_x constituyen las emisiones contaminantes más importantes en volumen. En la figura 1 se recoge, a modo de ejemplo, la cantidad de emisiones de estos gases originadas por diversos medios de transporte durante el año 2007 en Andalucía^[2].

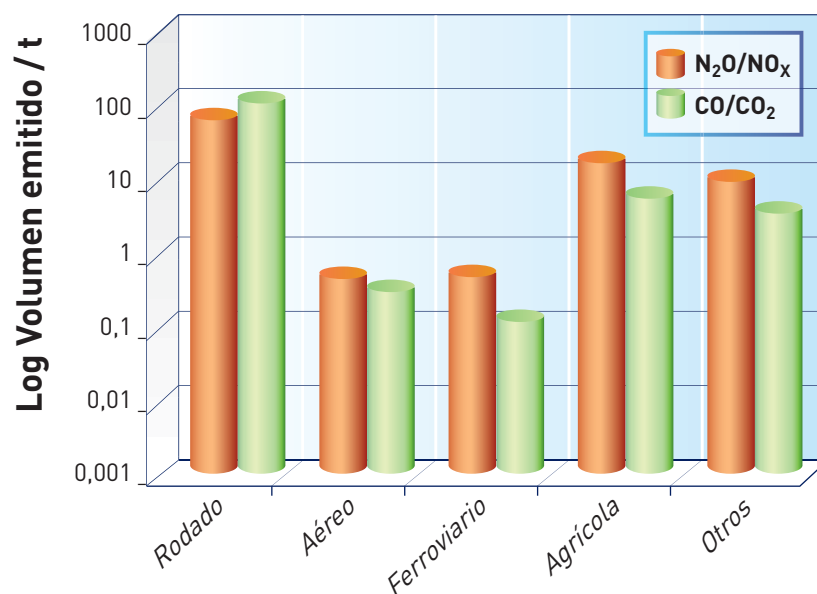


Figura 1. Volumen de gases de óxidos de carbono y de nitrógeno emitidos por los medios de transporte, durante el año 2007, en Andalucía (Fuente: Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía).

Efectos tóxicos de los óxidos de nitrógeno

Hoy en día la emisión de óxidos de nitrógeno a la atmósfera por parte de los medios de transporte es muy importante, con un volumen de emisión muy cercano al de los gases de óxidos de carbono (figura 1). Los óxidos de nitrógeno tienen una toxicidad muy elevada, incluso superior a la del monóxido de carbono. Se ha comprobado que el dióxido es unas cuatro veces más tóxico que el monóxido; presenta toxicidad cruzada con el ozono y de ahí su importancia toxicológica, pues se forman nitratos de peracilo (compuestos orgánicos tóxicos, de formulación compleja, que se forman por reacciones fotoquímicas en presencia de la luz solar) [3].

De forma general, la respiración de óxidos de nitrógeno origina bronquitis, edema pulmonar y reducción del número de cilios del árbol bronquial, lo que se manifiesta a partir de exposiciones de 2 ppm. Ultramicroscópicamente se han comprobado cambios estructurales en el colágeno pulmonar, así como lesiones alveolares, infiltración intersticial y petequias. Estas consecuencias sobre la salud se agravan con el aumento de su concentración en la atmósfera circundante. Así, por ejemplo, en exposiciones de unos 10 minutos a concentraciones de 10 mg/m³ se originan intensos trastornos respiratorios, aunque son reversibles; si la concentración se eleva a 150 mg/m³, se originan edemas pulmonares que pueden dar lugar a una disminución definitiva de la función respiratoria, y en los casos extremos de exposición a con-

centraciones de 600-900 mg/m³ se causa la muerte por asfixia al cabo de pocos días [3].

Otra problemática derivada de la presencia de gases NO_x en la atmósfera, más específicamente el N₂O, es la relacionada con su capacidad para producir un calentamiento de la misma (efecto invernadero) de una forma 207 veces más efectiva que el CO₂ [4]. Por ello, aunque su emisión por los medios de transporte sea inferior a la de CO₂, no se puede menospreciar su contribución al cambio climático del planeta.

La legislación establece valores límite, para los diferentes contaminantes, cada vez más rigurosos en el tiempo, tanto para los valores umbrales como para el número de superaciones. Por ejemplo, desde del 1 de enero de 2010 no se puede superar la media anual de 40 µg/m³ para el NO₂ [5]. A pesar de estas limitaciones, se estima que la estrategia europea para reducir la contaminación costará más de 7.000 millones de euros al año a partir de 2020, que es cuando todas las medidas entrarán en vigor. El ahorro en coste por las mejoras de la salud se evalúa en 42.000 millones de euros al año, seis veces mayor que la cantidad de dinero invertida, porque se evitarán, a nivel europeo, 140.000 muertes prematuras por la exposición a estos gases contaminantes y, además, se reducirán las bajas por enfermedad y el gasto farmacéutico ligado al tratamiento de dolencias respiratorias.

En general, en las ciudades españolas hay importantes capas de población expuestas a elevados niveles de contaminación atmosférica, motivados por el au-

mento del transporte privado y la existencia de industrias en la cercanía de los núcleos urbanos.

Los materiales de construcción como elementos urbanos para la descontaminación atmosférica

Independientemente de que se mejore la eficiencia energética y medioambiental de los medios de transporte, y de que se limiten al máximo las emisiones industriales, nuestra sociedad está aún lejos de evitar las emisiones de gases NO_x. En este sentido, resulta imprescindible estudiar acciones que favorezcan su eliminación de la atmósfera en los centros urbanos. Una manera de disminuir la concentración de estos gases en la atmósfera de una ciudad sería mediante la creación de grandes superficies des-



Polo Innovación Audiovisual de San Sebastián, construido con cemento que contiene TiO₂.

«RESULTA NECESARIO EXIGIR LA PUESTA EN VALOR DE POLÍTICAS INTEGRADAS INNOVADORAS QUE INCIDAN EN LOS PATRONES DE PLANIFICACIÓN URBANÍSTICA, EN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LAS CIUDADES Y EN LOS MODELOS DE TRANSPORTE DE LA POBLACIÓN»

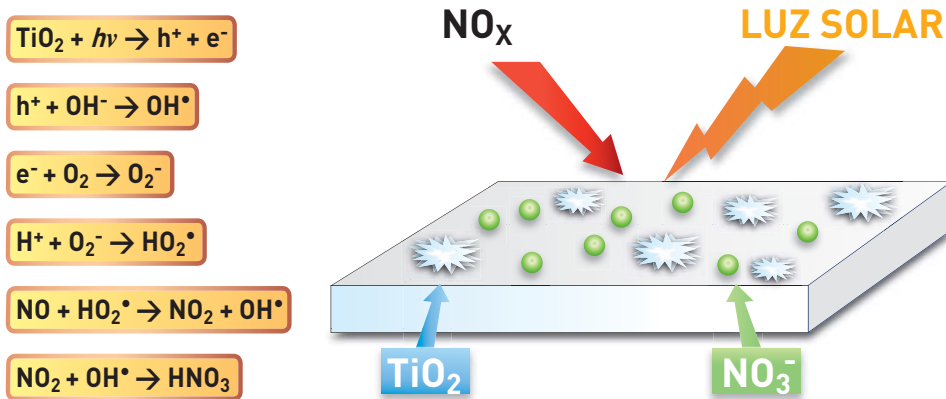


Figura 2. Reacciones fotocatalíticas de degradación de los gases NO_x que tienen lugar en la superficie de materiales de construcción que contienen TiO₂.

contaminantes que permitan la «limpieza» de los mismos en su entorno, o más específicamente, utilizar los edificios para este propósito.

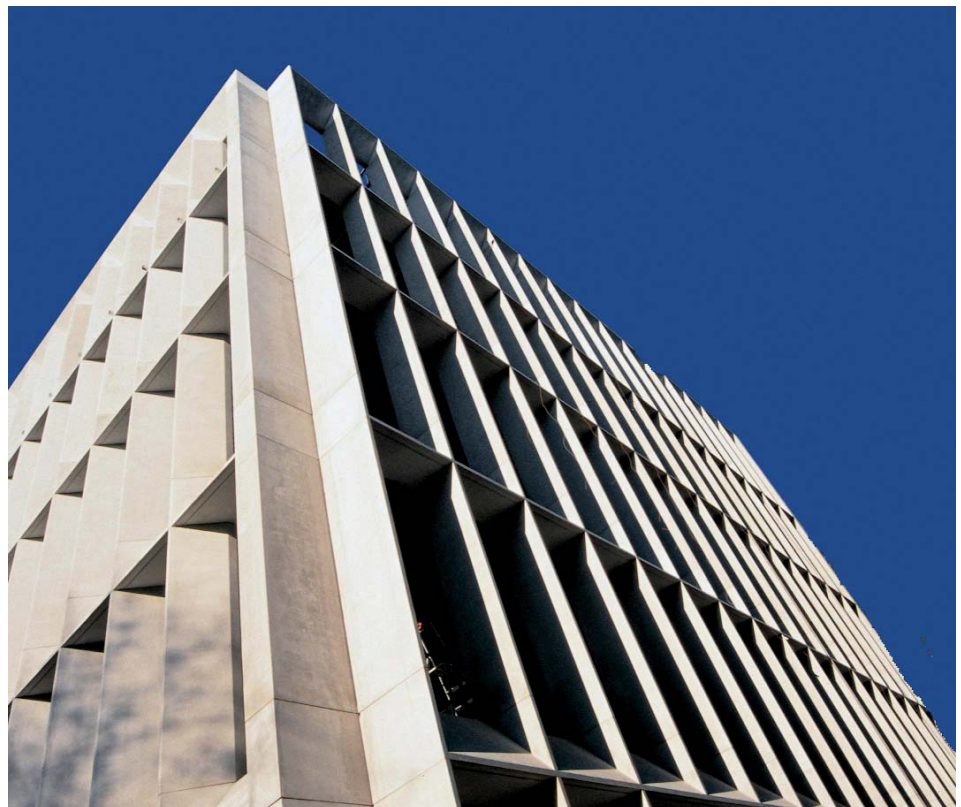
Aunque en las últimas décadas ha existido una tendencia a la utilización del vidrio y el acero para cubrir las fachadas exteriores de edificios (principalmente públicos), sigue siendo todavía mayoritario el recubrimiento externo de las edificaciones, sobre todo en viviendas familiares, con acabados de cemento, hormigón o mortero. Recientemente se han propuesto nuevas funcionalidades para estos materiales, aparte de las requeridas con fines estructurales y de aislamiento térmico/acústico. En este sentido, a partir de los trabajos realizados por L. Cassar y colaboradores^[6], el grupo italiano Italcementi ha patentado últimamente el uso de aditivos fotocatalizadores en el cemento y productos derivados. De este modo, con

el empleo de estos aditivos, los materiales de construcción pueden actuar como descontaminantes de gases NO_x y de la fracción de BTEX (Benceno, Tolueno, Etanol y Xileno) de los compuestos orgánicos volátiles, siendo ambos los principales gases tóxicos emitidos por los motores de combustión. Esto es posible gracias al mecanismo de reacción

fotoquímica que presentan aditivos como el TiO₂, que se activa por la exposición a la luz solar y origina descomposición química de los contaminantes anteriormente mencionados, y por tanto su eliminación del aire. En el caso específico de los gases NO_x, la degradación transcurriría según la secuencia de reacciones de la figura 2^[7]. Mediante este mecanismo, los gases se oxidan y se retienen como especies nitrato en el material de construcción o, más probablemente, se eliminan de la superficie del mortero como ácido nítrico débil.

La elección de TiO₂ como aditivo fotocatalizador es consecuencia de sus propiedades inherentes, tales como elevada estabilidad, baja toxicidad, compatibilidad con los materiales de construcción tradicionales y su elevada actividad fotocatalítica en comparación con otros óxidos metálicos. Estas propiedades lo convierten en el fotocatalizador

«HOY EN DÍA LA EMISIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO A LA ATMÓSFERA POR PARTE DE LOS MEDIOS DE TRANSPORTE ES MUY IMPORTANTE, CON UN VOLUMEN DE EMISIÓN MUY CERCANO AL DE LOS GASES DE CARBONO»



El edificio de la Cité de la Musique et des Beaux-Arts, en Chambéry (Francia), se ha ejecutado con una nueva generación de materiales que tiene efectos fotocatalíticos.

Tabla 1. Formulación de los morteros estudiados (% en peso).

Componente	Mortero					
	A	B	C	D	E	F
Dolomita 1 mm	–	10.3	50.8	–	25	–
Dolomita 0/1 mm	75.8	75.5	–	–	50.8	30
Dolomita 0/0.5 mm	–	–	25	60	–	30
CaCO ₃ (<i>filler</i>)	10	–	10	25.8	10	25.8
BL I 52.5 N	14	14	14	14	14	14
Aditivos	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

más adecuado para incluirlo en los materiales de construcción fotocatalíticos. Sin embargo, el coste de este aditivo es lo suficientemente elevado como para excluir su uso de forma extensa, lo que hace que la implantación de estos nuevos materiales de construcción con prometedoras aplicaciones descontaminantes haya sido muy limitada en las ciudades. De hecho, no se observa una política clara de implantación de productos de construcción con propiedades descontaminantes en los proyectos de obras públicas, tanto nacionales como internacionales. Actualmente existen algunos edificios civiles en los que se han utilizado para su construcción materiales con base de cemento que contienen TiO₂ y que están en uso. Así, la iglesia Dives in Misericordia (Roma, Italia) y el edificio público Cité de la Musique et des Beaux-Arts (Chambéry, Francia) son dos de los más referenciados. También existen otras edificaciones con este tipo de hormigón terminadas en Bélgica, Francia, Italia, Mónaco, Marrue-

cos, Japón y China. En España se ha utilizado solamente en obras puntuales debido al elevado coste que tiene su aplicación. Entre ellas figuran el edificio que acoge el Polo de Innovación Audiovisual (PIA) y la iglesia de Riberas de Loiola, ambos en Donostia-San Sebastián, y otro edificio en la plaza Conresa de Mislata (Valencia).

Nuevos avances en la preparación de materiales de construcción fotocatalíticos

Si bien este desarrollo tecnológico se ha estudiado en cemento ^[8,9], hormigones ^[10,11] y bloques de granito ^[12], no se ha implementado en gran medida sobre

los morteros secos, material de construcción muy empleado en nuestro país para el recubrimiento final de las superficies edificables. Además, debe considerarse que la porosidad de este material es elevada, por lo que el contacto con el aire atmosférico estaría favorecido, obteniéndose de este modo un buen rendimiento de la acción descontaminante. Por otra parte, como ya se ha comentado, el elevado coste del aditivo fotocatalizador TiO₂ resulta ser un inconveniente para la comercialización de estos productos. Partiendo de estas premisas, el Grupo de Investigación FQM-175 de la Universidad de Córdoba ha elaborado un estudio cuyo principal objetivo ha sido el desarrollo de materiales de construcción tradicionales con capacidad descontaminante en los que, variando los componentes de su dosificación, se pueda modular favorablemente su acción para la degradación de gases NO_x.

Para la formulación del mortero de cemento objeto de estudio se utilizaron los siguientes materiales: cemento blanco, calcita como relleno (*filler*), arena tipo dolomita como agregado y aditivos orgánicos. Se han preparado seis tipos diferentes de morteros siguiendo la distribución

«LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x) AFECTAN A LA SALUD HUMANA, CONTRIBUYEN A LA FORMACIÓN DE LA LLUVIA ÁCIDA Y TAMBIÉN ACENTÚAN EL EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO DEL PLANETA»

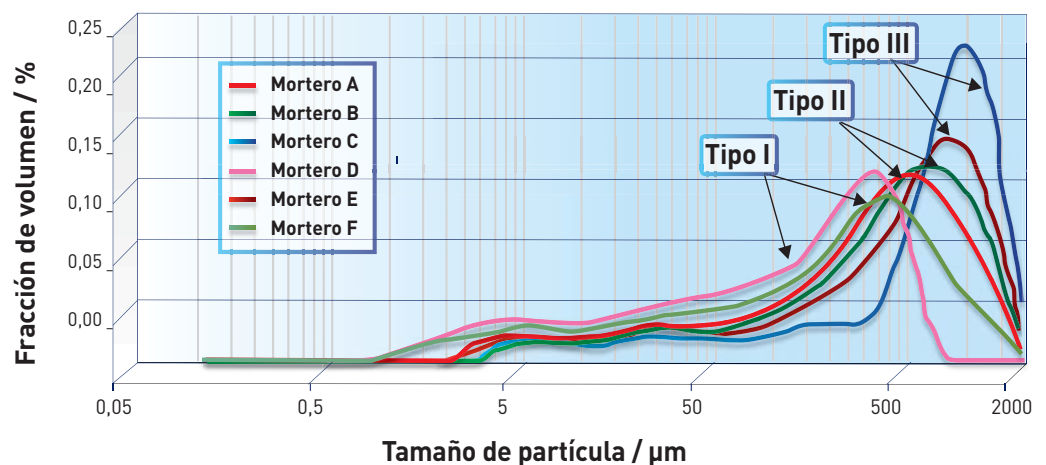


Figura 3. Distribución de tamaño de partícula para cada una de las formulaciones de los morteros objeto de estudio y tipología asociada a las curvas.

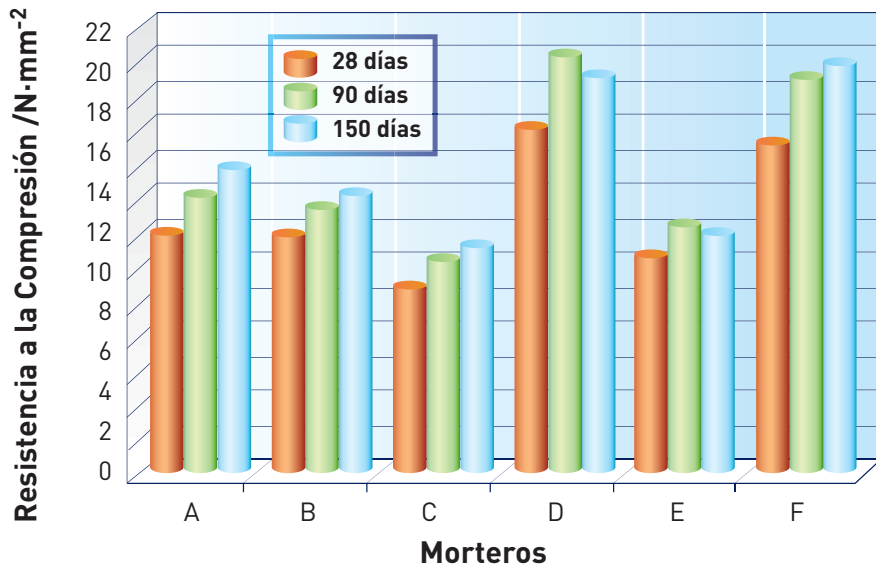


Figura 4. Valores de resistencia a la compresión de los morteros objeto de estudio, preparados con una relación agua/cemento de 1.2, medidos después de 28, 90 y 150 días de curado.

de materias primas que aparece en la tabla 1. Al ir variando la cantidad de arenas o *filler* utilizados, se obtiene un producto seco con diferente distribución de tamaño de partícula. En la figura 3 se pueden distinguir hasta tres tipos diferentes de mortero que varían en la proporción mayoritaria del tamaño de partícula de sus materias primas, desde el menor (tipo I) al mayor tamaño (tipo III).

Las diferencias observadas en las propiedades físicas, mecánicas y químicas

de los morteros endurecidos, tras la mezcla del mortero seco con agua, se relacionan con la diferente tipología de los mismos. En lo que respecta a las propiedades mecánicas, los valores de resistencia a la compresión estudiados para cada muestra a diferentes tiempos de curado se presentan en la figura 4. Se observa un lógico incremento de los mismos con el tiempo de curado, como consecuencia de la hidratación continua de las fases de cemento presentes en el mor-

tero (reacción de fraguado). Para estos morteros se establece un orden jerárquico de valores de resistencia, siendo las muestras tipo I > tipo II > tipo III (o morteros D,F > A,B > C,E).

Esta relación jerárquica también se aprecia en el estudio de la microestructura del mortero. La microestructura de un mortero de cemento es el resultado de los huecos originados entre las partículas de las diferentes arenas de su composición, así como de los poros que aparecen en los productos del fraguado del cemento, que a su vez rellenan parte de los huecos anteriormente comentados. Evidentemente, la resistencia mecánica de un mortero depende de su porosidad [13]. Mediante el estudio de la tipología y fracción de volumen de los poros formados se conoce la microestructura que se origina después del curado de las muestras y se puede relacionar la misma con los valores de resistencia mecánica observados. Para evaluar el volumen de poros de un mortero fraguado se recurre a la técnica de Porosimetría de Intrusión de Mercurio, que, como su nombre indica, consiste en introducir mercurio a presión en la estructura porosa del material. La figura 5 muestra, a modo de ejemplo, el in-

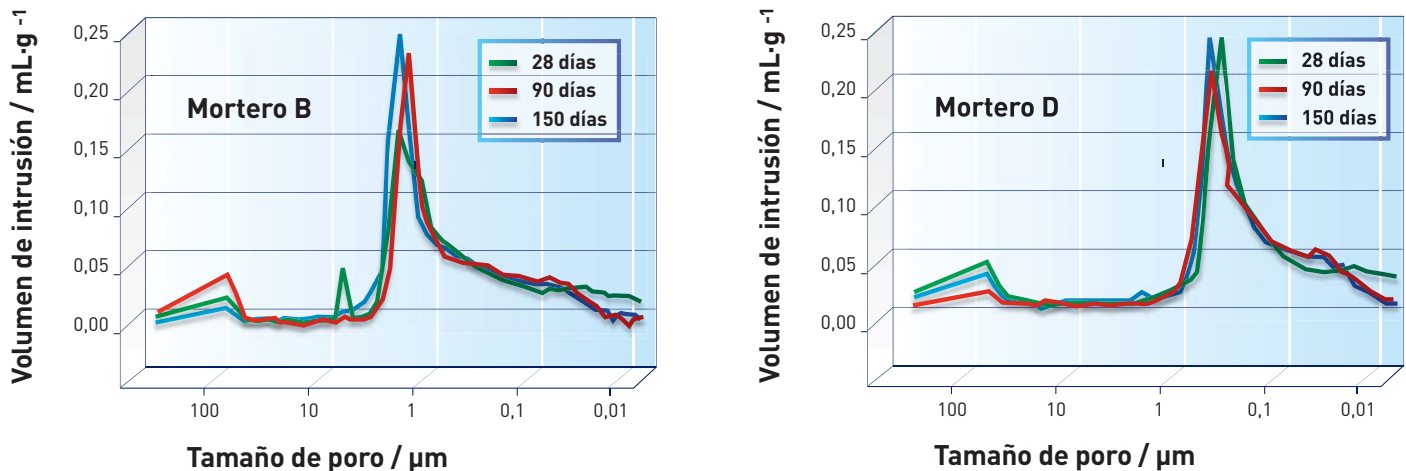


Figura 5. Distribución de diámetro de poro de los morteros B y D, preparados con una relación agua/cemento de 1.2, después de 28, 90 y 150 días de curado.

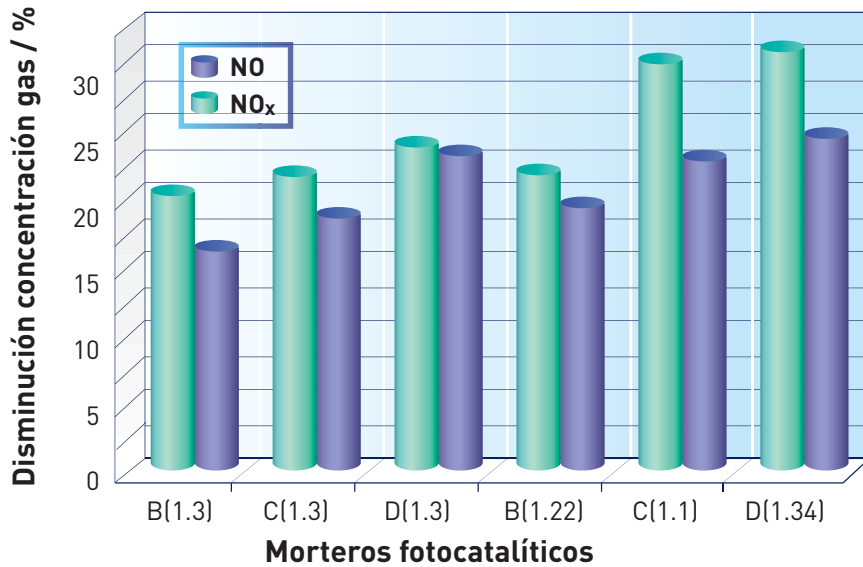


Figura 6. Porcentaje de degradación de gases NO y NO_x sobre la superficie de los morteros B, C y D obtenidos tras 28 días de curado. Entre paréntesis se denota la relación agua/cemento empleada en cada mortero.

«UNA MANERA DE DISMINUIR LA CONCENTRACIÓN DE ESTOS GASES EN LA ATMÓSFERA DE UNA CIUDAD SERÍA MEDIANTE LA CREACIÓN DE GRANDES SUPERFICIES DESCONTAMINANTES QUE PERMITAN LA 'LIMPIEZA' DE LOS MISMOS EN SU ENTORNO, UTILIZANDO LOS EDIFICIOS PARA ESTE PROPÓSITO»

cremento de volumen de intrusión de mercurio en función del diámetro de poro para dos de los morteros (B y D) curados a 28, 90 y 150 días. Se observó que el principal tamaño de poro (el de mayor volumen de intrusión) está estrechamente relacionado con la tipología de distribución de tamaño de partícula anteriormente descrita. Así, para las muestras tipo I, tipo II y tipo III, el diámetro de poro observado es de 0.4 – 0.55, 1.0 – 1.5 y 1.5 – 2.0 μm, en buena concordancia con la relación jerárquica establecida para los valores de resistencia medidos. De este modo, las muestras tipo I, con el diámetro de poro inferior, son las que presentan mayores valores de resistencia mecánica. La distribución de volumen de poro apenas cambia con el tiempo de curado, indicando, de nuevo, que la microestructura interna se desarrolla durante las pri-

meras etapas de curado y depende de la formulación inicial establecida para cada mortero (tabla 1).

Por tanto, el estudio detallado de formulaciones específicas de morteros de cemento nos permite conocer la influencia directa de la distribución de tamaño de partícula en las propiedades mecánicas y físicas. Además, la investigación realizada constató que la porosidad de cada mortero está influenciada por la relación de agua/cemento utilizada en la mezcla y que esta porosidad influye en el progreso de la reacción de fraguado, parámetro que finalmente tendrá consecuencias sobre la capacidad del mortero para la descontaminación de gases NO y NO_x. En este sentido, al objeto de evaluar la degradación de los óxidos de nitrógeno sobre la superficie de estos materiales, se seleccionaron tres morteros (B, C y D) con diferente tipología de distribución de tamaño de partícula. A cada una de sus formulaciones (tabla 1) se le añadió un 1% del compuesto TiO₂



Las fachadas de la iglesia de Riberas de Loiola, en Donostia-San Sebastián, están revestidas con un mortero autolimpiante y descontaminante.

«RECIENTEMENTE SE HA PATENTADO EL USO DE ADITIVOS FOTOCATALIZADORES EN EL CEMENTO Y PRODUCTOS DERIVADOS. GRACIAS AL MECANISMO DE REACCIÓN FOTOQUÍMICA QUE PRESENTAN ESTOS ADITIVOS, ACTIVADO POR LA LUZ SOLAR, SE PRODUCE LA DESCOMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS CONTAMINANTES»

P25 (aditivo fotocatalítico), y para cada uno de ellos se utilizó una diferente relación agua/cemento. En la figura 6 se observa cómo la capacidad de degradación de gases NO y NO_x es diferente. El mortero D (tipo I) presenta la mayor eficacia de degradación fotocatalítica de óxidos de nitrógeno, siendo el B (tipo II) el de peor rendimiento. Esta degradación de los gases se asume que transcurre según la secuencia de reacciones mostrada en la figura 1. De este modo, existirá una mayor degradación cuando los reactivos necesarios para llevar a cabo las reacciones involucradas –TiO₂, H₂O y O₂– estén presentes en la superficie del mortero. Hay que considerar que la formación de los productos hidratados de cemento en forma de gel puede atrapar en su interior las partículas de TiO₂, y por tanto, retirarlas de la superficie. Es-

to explica que sea el mortero B, para el que conocemos que más progresa la reacción de fraguado, el que presente menor porcentaje de degradación de gases NO_x. Por otra parte, la accesibilidad a las moléculas de agua y oxígeno será proporcional a la superficie específica de la muestra expuesta a los gases (mayor a mayor porosidad); por ello, el mortero D presenta los mayores valores de degradación.

Según el estudio realizado, modulando la composición y microestructura de los morteros se pueden obtener variaciones de hasta un 52% de rendimiento en la degradación de gases NO/NO_x y hasta un 38% en los valores de resistencia mecánica. Por tanto, como conclusión principal, se puede afirmar que la optimización de la formulación de morteros de cemento con funcionalidad fo-

tocatalítica permitirá rebajar en un valor considerable la cantidad de cemento y aditivo fotocatalizador a emplear –siendo estas las materias primas más caras de este tipo de producto–, sin menoscabar en sobremanera sus funcionalidades en el mortero. Además, el mejor rendimiento en la descontaminación de gases NO_x se exhibe en morteros con baja porosidad y elevada superficie específica. Por tanto, mediante la preparación de nuevos morteros secos de última generación más económicos, y de formulación optimizada, se facilitará la implantación de estos materiales en el sector de la construcción y se podrán convertir los nuevos elementos edificables en núcleos descontaminantes de la atmósfera de las grandes vías, plazas y calles de nuestras ciudades. ♦

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen la Ayuda de Investigación obtenida de FUNDACIÓN MAPFRE (convocatoria 2010). Asimismo, agradecen la cofinanciación recibida por la Junta de Andalucía a través del grupo de investigación FQM-175 y el proyecto P09-FQM-4764, así como el apoyo técnico de la empresa Grupo Puma S.L.

PARA SABER MÁS

[1] Plan de Infraestructuras para la Sostenibilidad del Transporte en Andalucía 2007-2013 (PISTA 2007-2013). Consejería de Obras Públicas, Junta de Andalucía.

[2] Emisiones de las Fuentes de Área Móviles. En: Inventario de Emisiones a la Atmósfera en la Comunidad Autónoma Andaluza. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, 2007. p 4.2-4.11.

[3] Capó Martí, Miguel. Principios de ecotoxicología. Diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente. McGraw-Hill, 2002.

[4] Domenech, Xavier. Química atmosférica. El origen y los efectos de la contaminación. Mirabuena Ediciones, 1995.

[5] Evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono. Real Decreto 1073/2002, 2002.

[6] Cassar, L. Photocatalysis of cementitious materials: Clean building and clean air. Materials Research Society Bulletin 2004; 328-31.

[7] Chen, J.; Poon, C.S. Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. Building and Environment 2009; 44: 1899-1906.

[8] Lackhoff, M.; Prieto, X.; Nestle, N.; Dehn, F.; Niessner, R. Photocatalytic activity of semiconductor-modified cement - Influence of semiconductor type and cement ageing. Applied Catalysis B: Environmental 2003; 43: 205-16.

[9] Ramírez, A.M.; Demeestere, K.; De Belie, N.; Mäntylä, T.; Levänen, E. Titanium dioxide coated cementitious materials for air purifying purposes: Preparation, characterization and toluene removal potential. Building and Environment 2010; 45: 832-38.

[10] Hüsken, G.; Hunger, M.; Brouwers, H.J.H. Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification. Building and Environment 2009; 44: 2463-74.

[11] Chen, J.; Poon, C.S. Photocatalytic activity of titanium dioxide modified concrete materials-Influence of utilizing recycled glass cullets as aggregates. Journal of Environmental Management 2009; 90: 3436-42.

[12] Poon, C.S.; Cheung, E. NO removal efficiency of photocatalytic paving blocks prepared with recycled materials. Construction and Building Materials 2007; 21: 1746-53.

[13] Lanás, J.; Álvarez, J.I. Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behaviour. Cement and Concrete Research 2003; 33: 1867-76.