



Estructura de hormigón auto-limiante en el que se han introducido partículas de TiO_2 . Iglesia en Roma de Richard Meier, 2003.

Perspectivas de futuro

MATERIALES DEL FUTURO PARA EL FUTURO DEL CONTROL DE CALIDAD

Manuel Elices Calafat

EL MATERIAL IDEAL

LA NATURALEZA PUEDE ENSEÑARNOS MUCHO

Los edificios, carreteras, y puentes del siglo XX son mudos, sordos y ciegos, pero es probable que en el siglo XXI las estructuras se construyan con materiales que posean “sensores” integrados para detectar las agresiones del exterior, con “actuadores” que les permitan reaccionar para evitar una catástrofe o, todavía mejor, que sean capaces de “autorrepararse”.

Los materiales que estamos utilizando no se comportan como los materiales de los seres vivos; los materiales de las plantas poseen la capacidad de cambiar la forma frente a diversos estímulos (por ejemplo, algunas hojas pueden seguir la dirección del sol), reaccionan frente al calor o la humedad, y pueden cicatrizar cuando se dañan. Imaginemos cómo serían nuestras estructuras si dispusiéramos de estos materiales; adaptándose a las vibraciones y amortiguándolas, con la posibilidad de autorrepararse cuando se empezaran a fisurar o corroer, vigilando continuamente el estado tensional y avisándonos si nos acercamos a solicitudes no admisibles; capaces de almacenar información relacionada con su historia —como sucede con los anillos de crecimiento de los árboles o los otolitos de los peces— que

podemos leer para saber cómo van envejeciendo y deteriorándose. El potencial de estos materiales sería enorme.

Los materiales del futuro deberán acercarse a este ideal; incorporarán sensores, como el sistema nervioso de un organismo vivo, tendrán su procesador, imitando el cerebro, y dispondrán de actuadores, como el sistema muscular. Ahora, en los controles de calidad, los materiales llevan sensores adosados que permiten detectar la corrosión y otras agresiones ambientales. También se utilizan actuadores basados en materiales piezoelectrinos, o con memoria de forma, y microchips para el control de todos ellos. La gran diferencia es que estos sensores y actuadores no forman parte del material, son dispositivos externos. El objetivo es integrarlos dentro del material creando un material “inteligente”.

En esta breve incursión en el mundo de los futuros materiales y su vinculación con el control de calidad, conviene tratar por separado dos aspectos. En primer lugar, cómo optimizar los materiales tradicionales para que sean más fiables y duraderos y, así, reducir el coste del control de calidad; y, en segundo lugar, destacar los logros obtenidos en los laboratorios de investigación con los nuevos materiales —dotados de sensores y actuadores— que permitirán mejorar la fiabilidad de las obras y restringir el control de calidad ligado al mantenimiento. Estos dos temas serán el contenido de los dos capítulos siguientes.



Esta escultura de hormigón inteligente se ha fabricado con un cemento que elimina el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre de la atmósfera, mediante un proceso fotocatalítico. La escultura, inspirada en las formas del agua, tiene 9 metros de altura y se encuentra en un puente sobre el río Misisipi. (Cortesía de FIGG Bridge Engineers, Inc. y Tim Davis. Concrete Int., 2009).

MATERIALES CONVENCIONALES LUCES Y SOMBRA DE LOS MATERIALES TRADICIONALES

El hormigón, el acero y los plásticos —los materiales convencionales— están diseñados para desempeñar una sola función: la resistente. Desde sus orígenes, los esfuerzos de los ingenieros se han dirigido hacia la optimización de esta propiedad sin olvidar que los nuevos materiales deberían seguir siendo competitivos económicamente. También se han dado cuenta que los materiales —igual que los seres vivos— enferman y envejecen, y han tratado de mejorar su durabilidad sin menoscabo de su resistencia.

Mejorar la resistencia y la durabilidad han sido los dos objetivos que han guiado el desarrollo de los nuevos materiales convencionales, a los que han contri-

buido, en gran parte, los avances de la Ciencia de los Materiales durante la segunda mitad del siglo XX. Ya se sabe que las propiedades resistentes de un material no vienen dadas solamente por su límite elástico y por la carga de rotura. Hace falta conocer su tenacidad para evitar las roturas frágiles y con este propósito ya se fabrican hormigones y aceros que, aún teniendo la misma carga de rotura, son más tenaces. La durabilidad también ha dejado de ser un concepto vago y ya se diseñan materiales capaces de tolerar determinados ambientes agresivos, ser más resistentes a la fatiga, o a las altas temperaturas.

Todas estas iniciativas se repasan brevemente en los siguientes apartados en los que se destacan los logros y las carencias de los materiales convencionales. Pero, todavía, estos materiales necesitan un control externo durante toda su vida, que avise si enferman o envejecen y, si es necesario, que indique cómo deben repararse.

HORMIGONES

El hormigón es un material barato y accesible. Actualmente se consume diez veces más hormigón —alrededor de un metro cúbico por persona al año— que todos los otros materiales de construcción juntos. La materia prima es abundante; los cinco componentes más importantes del cemento —O, Si, Ca, Al y Fe— forman el 99% de la corteza terrestre. Otro aspecto, que también contribuye al éxito del hormigón, es la asombrosa capacidad del cemento —un polvo muy fino— para transformarse en un sólido rígido a temperatura ambiente y solamente añadiéndole agua.

A pesar del gran consumo, la utilización del hormigón se basa, en buena parte, en la experiencia obtenida con ensayos macroscópicos, porque el conocimiento de los procesos físico-químicos a nivel microscópico es, todavía, bastante limitado. El hormigón es un material muy complejo, en el que intervienen docenas de componentes que reaccionan entre sí y, desde el momento que los ingredientes se mezclan con agua, forma estructuras complejas que van cambiando con los años. El desconocimiento de los detalles de estos procesos es el mayor impedimento para mejorar las prestaciones de este material.

En 1987, un informe de la Academia de Ciencias de los Estados Unidos constataba que 253.000 puentes de hormigón de este país necesitaban repararse. Un porcentaje no despreciable de ellos tenía menos de 20 años y se estimaba que, a partir de esta fecha, cada año se sumarían 35.000 puentes más. Otras instituciones han publicado informes similares relacionados con el deterioro prematuro del hormigón en aparcamientos, túneles, traviesas de ferrocarril y en estructuras junto al mar (Koch et al. 2002). Estos datos indican que el hormigón tiene problemas de durabilidad que todavía no se han resuelto satisfactoriamente. Las principales causas del deterioro del hormigón se cree que son las reacciones álcali-árido, el ataque de los sulfatos, ciclos de hielo-deshielo, y la corrosión de las armaduras embebidas en él. Vigilar y controlar el envejecimiento de las obras de hormigón es una actividad ligada al control de calidad. En la actualidad la auscultación se hace desde el exterior y las medidas oportunas para el mantenimiento, también. Con el fin de reducir, en lo posible, estas intervenciones se ha intentado fabricar hormigones dotados de mayor salud —algunas de estas iniciativas se resumen en este apartado— pero lo más eficaz sería que el propio hormigón nos avisara de sus achaques y sólo tuviéra-

mos que intervenir para repararlo o, mejor aún, que el propio hormigón fuera capaz de autorrepararse. Estos intentos para fabricar un hormigón inteligente todavía permanecen en los laboratorios y se comentan en el siguiente capítulo.

Durante algún tiempo, se creía que un hormigón muy resistente era sinónimo de un hormigón durable. Esta afirmación tenía su lógica. Para que un hormigón alcanzara una gran resistencia a los 28 días, con relaciones agua cemento de 0,40 ó 0,45, hacía falta una gran cantidad de cemento. Hace cuarenta o cincuenta años, los cementos no se molían tan finamente como ahora y a los 28 días no se había hidratado todo el cemento. Con el paso de los años, si se daban las condiciones adecuadas, el cemento acababa hidratándose y al ensayar estos hormigones se medían resistencias muy superiores a las especificadas.

En las últimas décadas se han fabricado cementos que endurecen rápidamente y permiten desencofrar antes. El endurecimiento rápido se consigue con cementos más finos y con mayores proporciones de las fases más reactivas: SC₃ y AC₃. Al usar menos cemento y ser más reactivo, a los 28 días está prácticamente todo hidratado y la resistencia del hormigón permanece estacionaria, o aumenta mucho más lentamente que en los hormigones antiguos, quedando menos cemento sin hidratar en reserva. Al ser estos hormigones más porosos pueden envejecer más en ambientes agresivos.

La utilización de superplastificantes ha permitido trabajar con relaciones agua/cemento alrededor de 0,20. Con estos valores tan bajos puede suceder que no se hidrate todo el cemento, aún cuando se alcancen las resistencias deseadas a los 28 días. Esta reserva potencial puede ser beneficiosa, como ocurre con los hormigones de hace medio siglo. Recientemente se han hecho ensayos con hormigones de este tipo y se ha comprobado que, si la resistencia a compresión a los 28 días es superior a 50 MPa, son muy impermeables al agua, al aire y a los cloruros, augurándose una buena durabilidad.

Otra familia de hormigones de altas prestaciones nace de la incorporación al cemento de materiales muy finos: cenizas volantes, humo de sílice, puzolanas, etc., con la finalidad de aumentar la resistencia, disminuir la permeabilidad y aumentar la durabilidad. El hormigón más prometedor puede ser el hormigón reforzado con fibras. Después de varios intentos con fibras de vidrio tratado, fibras de acero o fibras de plástico, ya se



En la actualidad se consume diez veces más hormigón que todos los otros materiales de construcción juntos. Embalse de Forata en Valencia.

están consiguiendo hormigones de altas prestaciones; durables, dúctiles, tenaces —con una resistencia apreciable a la tracción— y fácilmente moldeables.

En resumen, un hormigón con más resistencia no siempre es más durable; resistencia y durabilidad no son sinónimos. Al diseñar un hormigón de altas prestaciones es recomendable tener en cuenta, en primer lugar, el ambiente que lo va a rodear y después decidir su resistencia. Las normas más modernas ya empiezan a sintonizar con este planteamiento (ACI C318, 2002). Para aprovechar todo el potencial de estos hormigones más sofisticados es preciso controlar, además, su fabricación. De poco servirá, en cuanto a la durabilidad, tener un hormigón de estas características si durante el curado se han producido microfisuras por retracción y efectos térmicos, fenómenos que son más acusados con valores bajos de la relación agua/cemento.

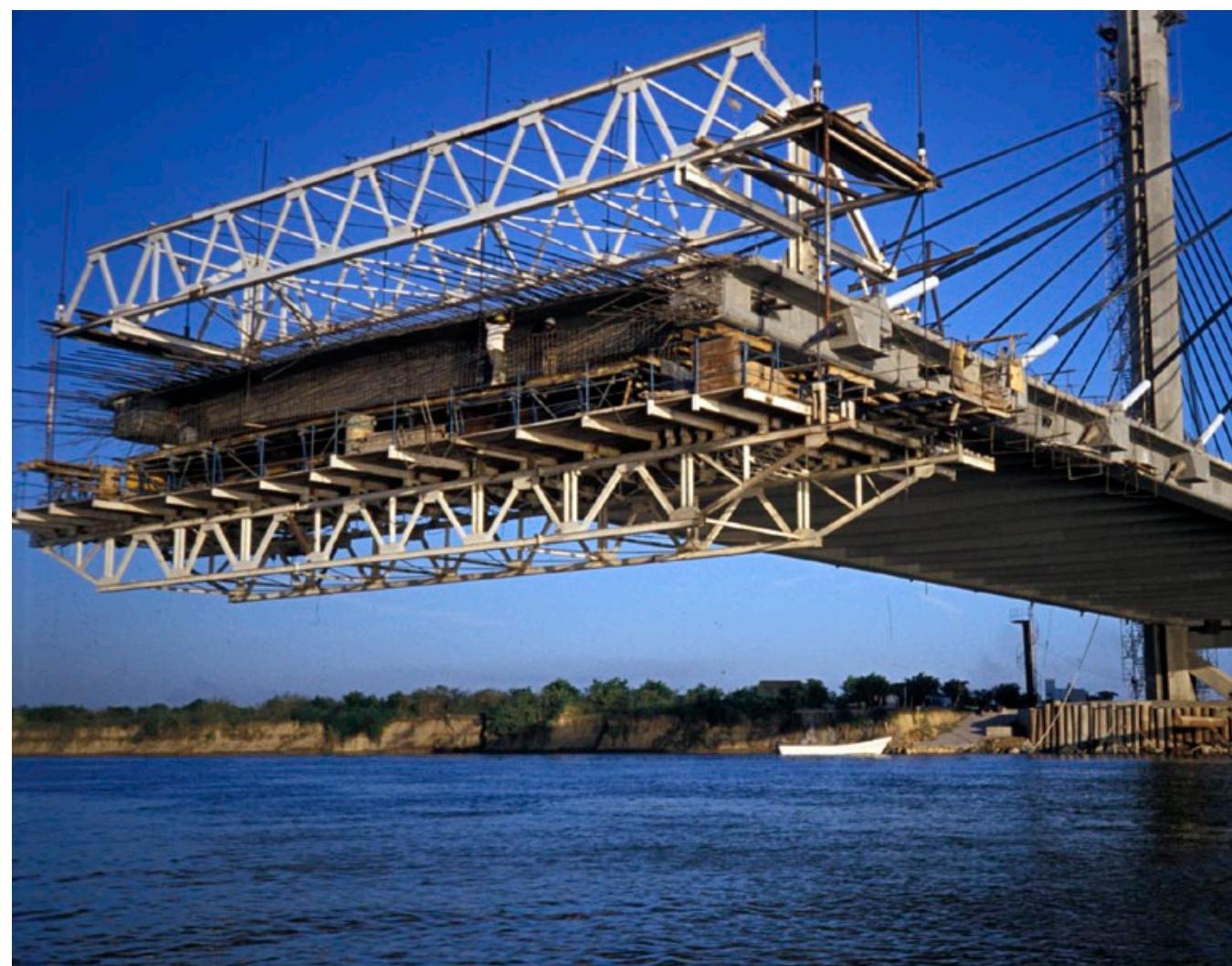
ACEROS

La durabilidad, las uniones y las roturas frágiles son algunos problemas que plantean los aceros y que todavía no se han resuelto satisfactoriamente. Por ahora, la seguridad de las estructuras se basa en el control y, cuando es necesario, en la reparación. Sería deseable que los aceros nos avisaran y se autorrepararan pero todavía no se ha conseguido. Por ahora, el desarrollo de nuevos aceros está orientado hacia una disminución del coste —para que sean más competitivos frente a otros materiales— y hacia un aumento de la resistencia, sin menoscabo de su ductilidad y tenacidad —para poder disminuir el peso de la estructura—. Estos objetivos, que están relacionados con aceros de grano muy fino, se consiguen siguiendo dos caminos: microaleando aceros con bajo contenido en carbono y mediante una fabricación con control termomecánico.

La tendencia para edificios —estructuras que soporan cargas estáticas— es la utilización de aceros con mayor límite elástico, para aprovechar las ventajas de un menor peso. Se pretende pasar de 350 MPa a 500 MPa, o valores mayores (se quiere comercializar aceros de 700 MPa de límite elástico), siempre que sean fácilmente soldables. La tendencia para puentes —donde la resistencia a la fatiga es un parámetro importante— no es hacia límites elásticos mucho más altos (350 MPa, como mínimo, es un valor aceptable) sino hacia valores altos de la tenacidad de fractura y de la ductilidad.

La corrosión es la causa principal del envejecimiento del acero. Para evitarla, decía E. Torroja; «el acero se defiende malamente con la pintura o se oculta vergonzosamente vistiéndose con galas ajenas». Estas son las dos soluciones adoptadas para las estructuras metálicas o de hormigón armado, pero en los últimos años el acero se ha defendido aliándose con otros elementos y gestando nuevas familias: los aceros galvanizados, los aceros de intemperie, y los inoxidables.

El acero galvanizado no se corroerá fácilmente. El recubrimiento de zinc actúa como una barrera protectora y como recubrimiento de sacrificio a medida que el zinc se oxida (corroe) lentamente. En consecuencia, la eficacia del recubrimiento depende del espesor. La norma ASTM A767.90, por ejemplo, especifica dos tipos de espesores; de 85 micras y de 150 micras. Parece ser que espesores mayores de 200 micras pueden disminuir la adherencia entre la barra y el hormigón. En estructuras pretensadas el galvanizado puede no ser una protección eficaz si el recubrimiento de zinc puede liberar



En las últimas décadas se han fabricado cements que endurecen rápidamente y permiten desencofrar antes. De esta manera se hace posible la construcción por voladizos sucesivos con ciclos cortos que permiten reducir el tiempo de construcción de estos puentes. Puente de Papaloapan (México) (Carlos Fernández Casado, S.L.) (Cortesía Prof. Miguel A. Astiz).

hidrógeno y éste fragilizar el tendón. Otro inconveniente del acero galvanizado es que no es soldable. Aún así, las armaduras galvanizadas han encontrado su nicho en la construcción porque consiguen retrasar la iniciación de la corrosión.

Los aceros con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica o aceros de intemperie, también llamados "weathering steels", se introdujeron en el mercado en 1933 en un intento de paliar este problema. Los elementos responsables de esta mejora son el cobre, fósforo, silicio, cromo, níquel y molibdeno. Cuando estos aceros se exponen a la atmósfera se forma, al cabo de unos meses, una delgada capa de óxido que los protege de una ulterior oxidación. Mientras esta capa se mantiene adherida, el acero está protegido. Son aceros más caros que los normales y suelen tener un límite elástico del orden de 400 MPa. En los últimos años han

salido al mercado aceros de este tipo con valores del límite elástico alrededor de 700 MPa.

Los aceros inoxidables no nos avisan cuando se inicia la corrosión pero son capaces de autorrepararse gracias a los átomos de cromo que migran hacia la superficie y cicatrizan las heridas. Su eficacia está probada pero su elevado precio limita bastante el uso, no obstante cuando se estiman los costes de reparación en ambientes agresivos esta opción puede resultar económica.

Las nuevas barras de acero inoxidable tienen características mecánicas muy parecidas. En general, pueden alcanzar los 520 MPa de límite elástico y los 690 MPa de tensión de rotura. Su ductilidad es muy buena, ya que superan deformaciones en rotura del 25% y las hace muy aptas para el uso en zonas de posible actividad sísmica.



El puente Akashi sufrió durante su construcción el sismo de Kobe (1995) que desplazó una de sus torres más de un metro sin que sufriera ningún daño por estar equipada con numerosos amortiguadores a lo largo de su altura.

PLÁSTICOS

En un simposio de la FIP, en Londres, durante la sesión inaugural, R. Lacroix comentaba que la ingeniería civil se diferencia de las otras ingenierías en que sólo usa dos materiales básicos, el acero y el hormigón, porque son baratos y agradecidos. Dos virtudes que desaconsejan la utilización de otros materiales alternativos.

Possiblemente esté en lo cierto, pero si ampliamos el horizonte nos daremos cuenta de que no podemos ignorar otros materiales. Los plásticos son otros materiales que se están abriendo camino, poco a poco, en la ingeniería civil y están ocupando ventajosamente algunos nichos donde los ambientes agresivos maltratan a los dos materiales tradicionales.

Los plásticos —nombre coloquial de muchos polímeros orgánicos— suelen ser muy resistentes a los ambientes agresivos para el hormigón y para el acero. En estos ambientes, los plásticos pueden usarse como una segunda piel para proteger al hormigón y al acero o bien sustituir a estos materiales. El mayor inconveniente que tienen es que no son baratos ni agradecidos. Conviene matizar esta segunda afirmación: si a los plásticos se les aplican los calificativos de los seres

vivos, diríamos que los plásticos se “cansan y envejecen”. Quizás no sea muy correcto decir que estos comportamientos sean una falta de agradecimiento, pero no dejan de ser inconvenientes importantes. La lucha contra el envejecimiento de los plásticos está consiguiendo éxitos notables a medida que se avanza en el campo de la Ciencia de los Materiales y se conocen mejor las relaciones entre su estructura y las propiedades reológicas.

Los plásticos más utilizados son: el polietileno (PE), en forma de láminas para envoltorios o como aislante y, cuando es más rígido, para tuberías o recipientes; el policloruro de vinilo (PVC), utilizado en la industria de la construcción, saneamiento, y envases; el polipropileno (PP) y el polietilenteréftalato (PET). Hace 50 años el consumo de estos materiales era muy reducido (un millón de toneladas en 1946). En la actualidad la suma de todos ellos se aproxima a la del acero (alrededor de mil millones de toneladas).

Quizás la aportación más genuina de los plásticos, como materiales para la ingeniería civil, sean las membranas; en particular, las cubiertas colgadas y los geotextiles.



Cubierta de plástico del estadio internacional Rey Fahd de Riad (Arabia Saudí).

Las tuberías de plástico, reforzado o no con fibras, pueden ser una solución competitiva cuando el ambiente exterior o el líquido que discurre por su interior es muy agresivo. Los plásticos también pueden proteger las tuberías tradicionales; las tuberías de fundición ya se fabrican con un revestimiento interior de plástico, y algunas tuberías de hormigón pretensado se protegen exteriormente con un mortero de resina epoxi.

Se ha comentado que una de las debilidades del acero es la corrosión. Los tendones de acero utilizados en las obras pretensadas pueden romper, bruscamente, por corrosión bajo tensión. Para evitar estos accidentes se han fabricado tendones de plástico —con fibras de aramida, por ejemplo— que son inmunes a la corrosión bajo tensión que afecta a los aceros y, además, tienen un módulo de elasticidad parecido al del acero. El mayor inconveniente de estos tendones, aparte de su alto costo, es la poca ductilidad en comparación con los de acero, limitación que influye en el diseño de los anclajes y en la capacidad para soportar esfuerzos transversales. Tampoco se tiene información fiable de su comportamiento a largo plazo.

Los plásticos han irrumpido en la ingeniería civil a través de los materiales compuestos. Esta familia de nue-

vos materiales tiene un brillante futuro. Los materiales compuestos basados en los plásticos pueden diseñarse para ofrecer una buena combinación de prestaciones; excelentes propiedades mecánicas (reforzándolos con fibras de carbono, o de vidrio E), gran resistencia a la corrosión (usando matrices de poliéster o resinas epoxi), poco peso, y, últimamente, bajo coste. Los plásticos reforzados con fibras empezaron a usarse en la década de 1940 en aplicaciones militares. Por sus buenas prestaciones (baja densidad, resistencia a los ataques químicos, no magnetizables, no conductores) poco a poco fueron entrando en la industria aeroespacial y aeronáutica en las décadas de 1960 y 1970. A partir de estas épocas, y a medida que fueron más asequibles, empezaron a utilizarse en la ingeniería civil para rehabilitación de edificios y estructuras semi-permanentes (ver, por ejemplo, Bakis et al. 2002).

Los plásticos reforzados con fibras se están utilizando en puentes, embarcaderos, muros de contención, depósitos, y en estructuras que deban trabajar en presencia de medios agresivos. Además de las propiedades anteriormente mencionadas, los plásticos reforzados con fibras poseen una buena capacidad para absorber energía y están muy indicados para estructuras que deban resistir acciones sísmicas.



La pasarela de Lérida, primer puente construido en España con materiales compuestos, proyectado por Pedelta, S.L.

Un obstáculo que dificulta las aplicaciones de los plásticos reforzados con fibras en las estructuras es la ausencia de criterios de diseño que sean sencillos y prácticos. A diferencia del acero o del hormigón, los plásticos reforzados con fibras son anisótropos y el análisis de su comportamiento mecánico es más complejo, por lo que no es fácil proporcionar manuales sencillos para su utilización y control de calidad.

MATERIALES DEL FUTURO. DEL LABORATORIO A LA OBRA

Las hojas de la flor de loto (*Nelumbo nucifera*) son de un blanco inmaculado, y la flor es un símbolo de pureza en la religión hindú. Las superficies de estas flores, y también de otras hojas, siempre están limpias, el agua resbala por ellas sin adherirse y arrastra consigo las partículas de suciedad. Este efecto de “autolimpieza”, o efecto “loto”, ha sido estudiado —se debe a la micro o nano estructura de la superficie— e imitado —ya hay varios vidrios comerciales que no se ensucian y recubrimientos para fachadas que se limpian solos después de cada lluvia.

El envejecimiento del hormigón puede acelerarse por biodegradación debido a hongos, algas y líquenes en

presencia de humedad. Estos organismos se pueden destruir recubriendo el hormigón con una capa de dióxido de titanio, que posee un fuerte poder oxidante gracias a los pares electrón-hueco que generan los rayos ultravioleta de la luz solar. Es más, parece ser que la incorporación de partículas de dióxido de titanio al hormigón favorece la eliminación de contaminantes del tipo NO_x . Ya se han hecho pruebas en calles con mucho tráfico y se ha comprobado que es eficaz.

Una empresa castellonense ha patentado un producto bactericida que se añade al esmalte de los materiales cerámicos y que también se activa con la luz. Es un producto ideal para hospitales, guarderías y lugares donde hay mucha concentración y tráfico de personas. Las pruebas realizadas indican que se pueden eliminar hasta un 60% de los microbios.

MATERIALES MULTIFUNCIONALES

En todos estos ejemplos, los materiales desempeñan varias funciones: resistente y autolimpiante, o resistente y bactericida. Se trata de materiales “multifuncionales” y se cree que en el futuro todos los materiales acabarán siéndolo, al igual que sucede con los materiales de los seres vivos.

Si nos ceñimos a los materiales relacionados con el control de calidad, lo que se pretende es evitar, en lo posible, la instrumentación en las obras y que sea el



La superficie de la flor de loto siempre está limpia. El agua resbala por ella sin adherirse y arrastra todas las impurezas.

propio material el que nos proporcione la información deseada. Para ello hacen falta materiales que cambien sus propiedades en respuesta a un estímulo externo, materiales que podríamos llamar “sensibles” porque son capaces de sentir acciones del exterior. Los materiales termocrómicos, termotrópicos, magnetoreológicos, electroreológicos, o los que poseen memoria de forma son ejemplos a considerar.

Los materiales “sensibles” nos informan sobre las deformaciones, la temperatura, la humedad, u otras magnitudes del elemento estructural en cuestión. Nos avisan, pero no actúan. Es preciso recoger esta información, analizarla y tomar decisiones al respecto, labor que todavía corresponde a un control externo. Lo ideal sería que el propio material también fuera capaz de actuar: de amortiguar vibraciones, cicatrizar sus grietas o detener la corrosión, por citar unos ejemplos. Este tipo de materiales, llamados a veces “inteligentes”, deben ser capaces de transformar la energía de una forma en otra, como sucede, por ejemplo, con los materiales piezoelectrónicos, termoelectrónicos, fotoluminiscentes o fotovoltaicos.

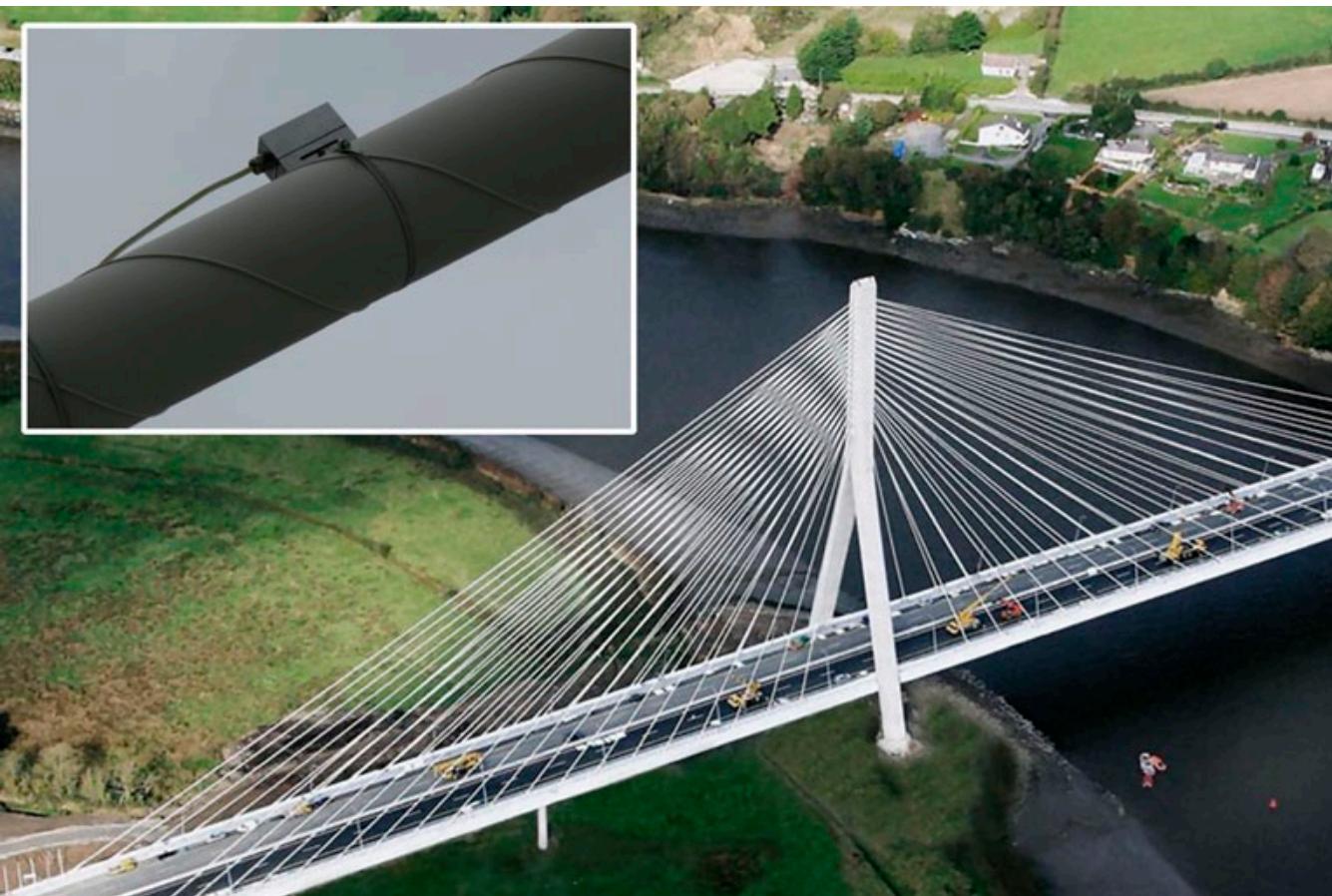
Los dos apartados siguientes se dedican a comentar brevemente ejemplos de los dos tipos de materiales: los “sensibles” y los “inteligentes”. Los primeros, más sencillos, ya se han utilizado en algunas obras singulares. Aquí no se han incluido las fibras ópticas por considerarlas sensores externos a los materiales estructurales aunque, en algunos casos, estén embebidos

dentro de los elementos estructurales. Los materiales del segundo grupo son más sofisticados y están, todavía, en su infancia. Entre ellos, los más espectaculares son aquéllos capaces de “autorrepararse”. El desarrollo de este tipo de materiales inteligentes ha sido impulsado por la industria aeronáutica y aeroespacial pero cabe esperar que, con el tiempo, acaben utilizándose en la ingeniería civil.

MATERIALES SENSIBLES

Los hormigones reforzados con fibras de carbono tienen la propiedad de ser conductores de la electricidad y de que su conductividad varía con el estado tensional. Un material estructural que pueda sentir sus propias deformaciones —sin necesidad de extensómetros adosados o embebidos— es una gran ventaja para utilizarlo en estructuras que se controlen ellas mismas.

Las fibras de carbono, además de conferir conductividad eléctrica al hormigón, son piezoresistentes; su resistencia eléctrica varía con su deformación, tanto en tracción como en compresión, y el efecto se nota con deformaciones muy pequeñas, lo que permite hacer medidas incluso cuando el hormigón trabaja en régimen elástico-lineal. Parece ser que las fibras usuales dan mejores resultados que las nanofibras, ya que estas últimas se apelmazan con más facilidad. El tamaño adecuado de las fibras es alrededor de 5 mm, con diámetros de 15 micras. La cantidad



El puente atirantado de Waterford (Irlanda) tiene varios tirantes instrumentados para controlar las vibraciones producidas por el viento. (Proyecto de Carlos Fernández Casado, S.L.) (Cortesía Prof. Miguel A. Astiz).

de fibras puede ser del orden del 0,5% del contenido en cemento; valores próximos al 1% están cerca del límite de percolación, para el que las fibras entran en contacto y la resistividad del hormigón decrece bruscamente.

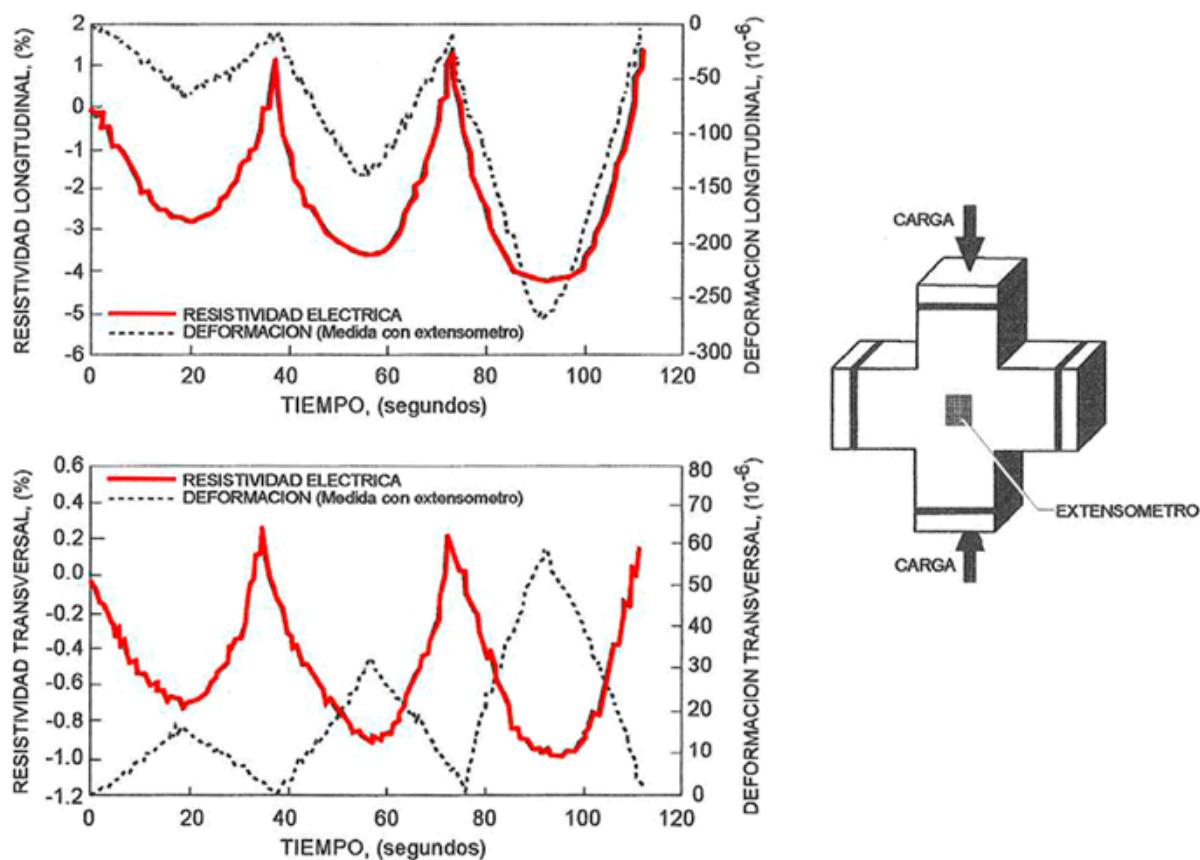
En la figura se muestran los resultados obtenidos con un mortero de cemento y fibras de carbono (Wen, Chung. 2005) cuando se someten a una solicitación variable. En ella se indica la variación de la resistividad junto con los valores de la deformación (medida con un extensómetro), tanto para deformaciones longitudinales como transversales, y puede apreciarse que las medidas de la resistividad reproducen muy bien las que proporcionaría un sensor externo colocado sobre la probeta. Estos hormigones, además de informarnos de su estado tensional, pueden ser de utilidad para monitorizar el tráfico, la variación del peso de un recinto, controlar vibraciones, o la seguridad de una estructura.

Con los aceros ocurre algo parecido si se utilizan las propiedades magnéticas de algunos de sus componentes, ya que se pueden medir los cambios de la magnetización cuando varía la tensión o la temperatura (Jaro-

sevic. 1999). Los materiales ferromagnéticos contienen dominios magnéticos microscópicos que, si están orientados al azar, no exhiben magnetismo a nivel macroscópico, pero bajo la acción de un campo magnético externo los pequeños dominios pueden orientarse, alinearse, y generar un campo magnético macroscópico. La movilidad de los dominios está muy influída por el tipo de material, por su estado tensional, y por la temperatura. Una vez calibrado el tipo de acero, las variaciones de su bucle de histéresis magnética proporciona información sobre su estado tensional.

Esta técnica, con materiales apropiados, se ha utilizado para el control de tendones en puentes, reactores nucleares, anclajes y otras estructuras pretensadas. La etapa más delicada es la de la calibración del tendón de acero, por la influencia en la magnetización de su microestructura y su historia termomecánica. Se están investigando nuevos aceros con un comportamiento de los dominios magnéticos más predictivo, con objeto de facilitar la calibración.

Los plásticos también se van incorporando a la nueva familia de los materiales sensibles a través de pintu-



Las deformaciones de un mortero reforzado con fibras de carbono se pueden conocer midiendo su resistividad eléctrica, sin necesidad de instalar extensómetros (S. Wen y D. Cheng, 2005).

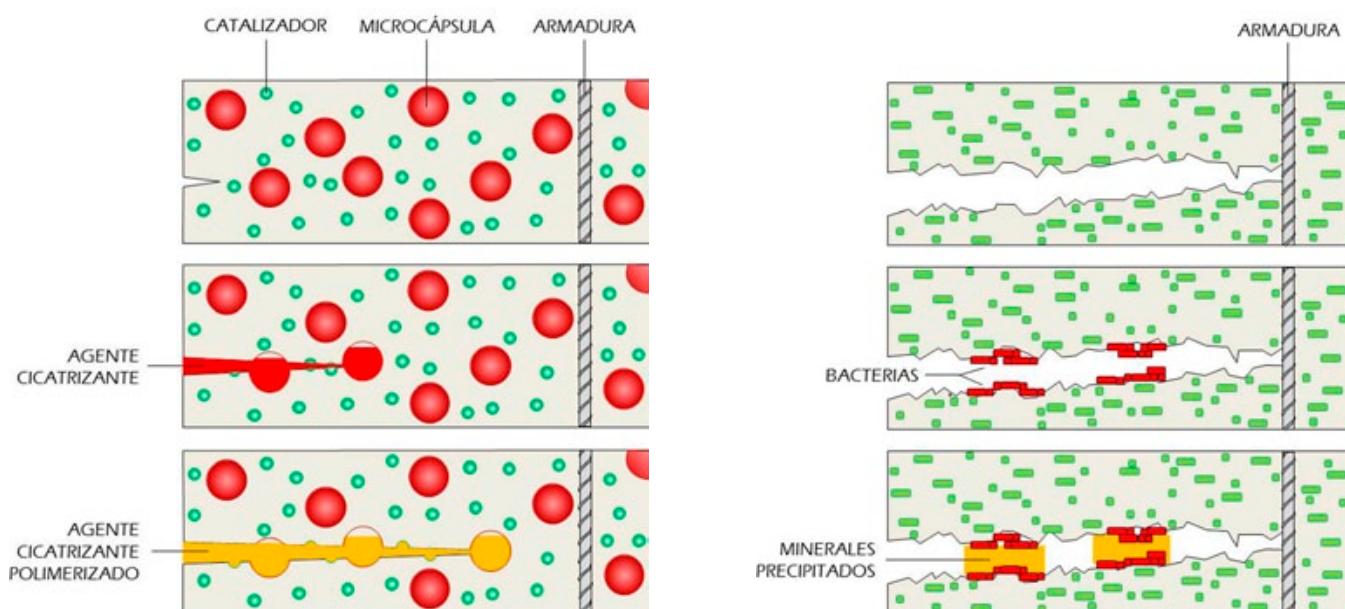
ras y recubrimientos funcionalizados. Se han fabricado pinturas con un comportamiento parecido al de los aceros antes mencionados pero, como los plásticos no son magnéticos, hace falta incorporarles materiales que sean magnetoestrictivos —que crean un campo magnético cuando se deformen— en forma de finas partículas, por ejemplo, Terfenol® (White et al. 1996). El polímero con estas partículas embebidas ya es un “material sensible” a las deformaciones y genera un campo magnético que se puede medir desde el exterior. Con esta técnica, se puede controlar el comportamiento de la piel de algunos materiales y detectar las zonas donde se produzca una concentración de tensiones o la aparición de fisuras.

Los plásticos también se pueden funcionalizar con materiales que sean piezoeléctricos, termocrómicos, o fotocrómicos, en función de la magnitud que se desee controlar. Los inconvenientes de estos materiales son, como siempre, el coste y el envejecimiento, que es más acusado en los plásticos que en los hormigones y aceros. La experiencia sobre la durabilidad de estos nuevos materiales todavía es limitada, por los motivos anteriormente mencionados.

MATERIALES INTELIGENTES

La llegada de los materiales inteligentes arrinconará los sistemas de control de calidad convencionales, pero aún falta mucho para ello. En términos generales, un material inteligente es un material capaz de sentir y de actuar en consecuencia; en otras palabras, son los materiales sensibles —citados anteriormente— dotados de actuadores que pueden responder a los estímulos de los sensores.

Los cables capaces de “autotensarse” son un primer ejemplo. En las fotografías de puentes tomadas después de un seísmo se observa, a veces, secciones del tablero que han deslizado entre sí, como las cartas de una baraja. ¡Qué pena que no hubieran permanecido unidas por cables capaces de deformarse durante el seísmo y, después, recuperar su forma para devolver las piezas a su lugar! Pues bien, ya existen cables con “memoria de forma” capaces de realizar esta proeza, por lo menos a nivel de laboratorio, donde se han ensayado tramos de tablero sometidos a un seísmo simulado (Johnson et al. 2008). El material utilizado en los cables se basa en la conocida aleación de níquel y tita-



Hormigones que cicatrizan mediante substancias capaces de llenar las fisuras y polimerizar después.

nio; el nitinol —nombre que proviene de Níquel-Titánio Naval Ordnance Laboratory—, una aleación desarrollada con fines militares en 1965.

Otro ejemplo son los materiales capaces de “autoamortiguarse” al disipar la energía mecánica en forma de calor (Janke et al. 2005). Además de los materiales con memoria de forma, ya citados, los materiales piezoelectricos ofrecen interesantes aplicaciones. Los materiales electroestriktivos, o magnetoestriktivos, son aquéllos que se deforman en presencia de una campo eléctrico o magnético exterior. La energía se disipa usando la interacción electromecánica; cuando se deforma un material electroestriktivo, por ejemplo, el campo eléctrico inducido por la energía mecánica genera una corriente eléctrica que al circular por una resistencia externa disipa la energía en forma de calor.

Pero los más espectaculares son los que se “autorreparan”. Cuando los españoles observaron por primera vez a los aztecas jugando con pelotas de caucho, seguramente debieron asombrarse al ver que si cortaban una pelota por la mitad se podía reconstruir simplemente presionando las dos mitades, sin necesidad de adhesivos o de calor, y recuperaba toda su elasticidad. Toda-vía hoy este fenómeno tiene algo de mágico, pero ya existen en los laboratorios materiales capaces de auto-

Hormigones que cicatrizan mediante la proliferación de microorganismos capaces de segregar carbonato cálcico en las fisuras.

cicatrizar. Veamos brevemente, para terminar, ejemplos en las tres familias que estamos considerando; hormigones, metales y polímeros.

Los hormigones pueden autocicatrizar si se incorpora suficiente cemento para que quede una reserva sin hidratar y se permite que la humedad penetre por las microfisuras, reaccione con el cemento, y selle las grietas. En estas circunstancias el principal inconveniente radica en poder controlar la apertura de las fisuras; si se abren mucho, el hormigón no es capaz de cicatrizar. Para evitarlo se han fabricado hormigones en los que se han incluido microfibra poliméricas que, en cierto modo, cosen las fisuras y limitan su abertura por debajo de 30 micras, donde ya es posible cerrarlas si queda cemento adecuado y llega humedad. Este tipo de hormigones ya se ha utilizado en Japón: en tableros de puentes para mejorar la resistencia a la fatiga, en amortiguadores de vibraciones en edificios de hormigón armado, en reparación de presas y, en general, para reparar superficies de hormigón (Kunieda, Rokugo, 2006).

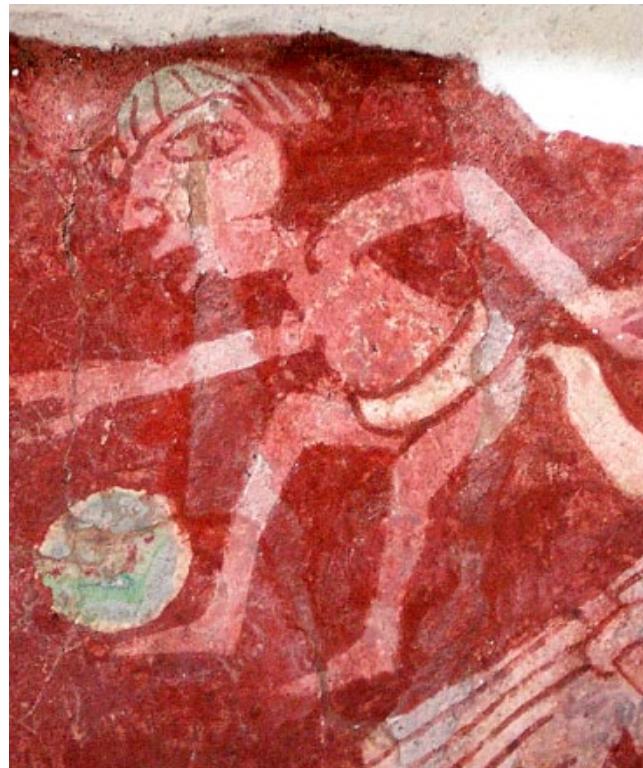
Se han ideado otros sistemas más sofisticados para cicatrizar hormigones a base de sustancias capaces de llenar las fisuras y polimerizar después. El proceso se realiza en tres etapas: encapsulando la sustancia, situando sensores que avisen cuando es el momento oportuno,

y disparando un sistema que la libera y hace que polimerice en el interior de la grieta. Con este fin, se han fabricado materiales en los que se han embebido fibras de vidrio llenas con el monómero. Cuando una fisura rasga la fibra, se libera el monómero que, en presencia de un catalizador, polimeriza y cierra la fisura (Li et al. 1998). Pero el método más ingenioso, por ahora, consiste en inyectar microorganismos que inducen la precipitación de carbonato cálcico en las grietas. En unos experimentos se han utilizado bacterias del género *Bacillus*, tolerantes a los álcalis, y se han añadido al hormigón aminoácidos para alimentarlas. Las esporas permanecen dormidas en la matriz del hormigón —hay indicios que permiten suponer que pueden permanecer inactivas durante más de 200 años— hasta que se producen fisuras y penetra agua a través de ellas. Al empezar a proliferar las bacterias, metabolizan el alimento y precipitan carbonato cálcico que puede sellar la fisura e impedir su progreso (Ramachandran et al. 2001).

Las heridas más frecuentes que sufren los metales las produce la corrosión y, por consiguiente, la autocicatrización en los metales suele ser sinónimo de protección contra la corrosión. Es bien conocido que ciertos metales, como el aluminio o el titanio, son capaces de autoprotegerse frente a la corrosión produciendo una piel protectora —una capa pasivada— que impide que la corrosión progrese. Los aceros se las han ingeniado aliándose con el cromo, como ya se indicó, generando la familia de aceros inoxidables, aunque últimamente se está restringiendo el uso del cromo por sus efectos cancerígenos.

El siguiente ejemplo es de un material activo, o inteligente, capaz de liberar inhibidores para frenar la corrosión cuando haga falta (Andreeva et al. 2008). En realidad se trata de una piel protectora capaz de cicatrizar las heridas. La idea consiste en recubrir la superficie del metal con varias capas muy finas —alrededor de 10 nanómetros— de polielectrolitos e inhibidores de corrosión, con el fin de formar un material compuesto inteligente, que libera inhibidores de corrosión cuando es estimulado por agentes corrosivos. Además, gracias a la movilidad de los electrolitos de las diversas capas, mantiene los valores del pH dentro de un intervalo de seguridad y permite que se sellen las microfisuras. Estas pieles inteligentes ya han encontrado aplicaciones en la industria aeronáutica y es de esperar que también acaben utilizándose en otras áreas.

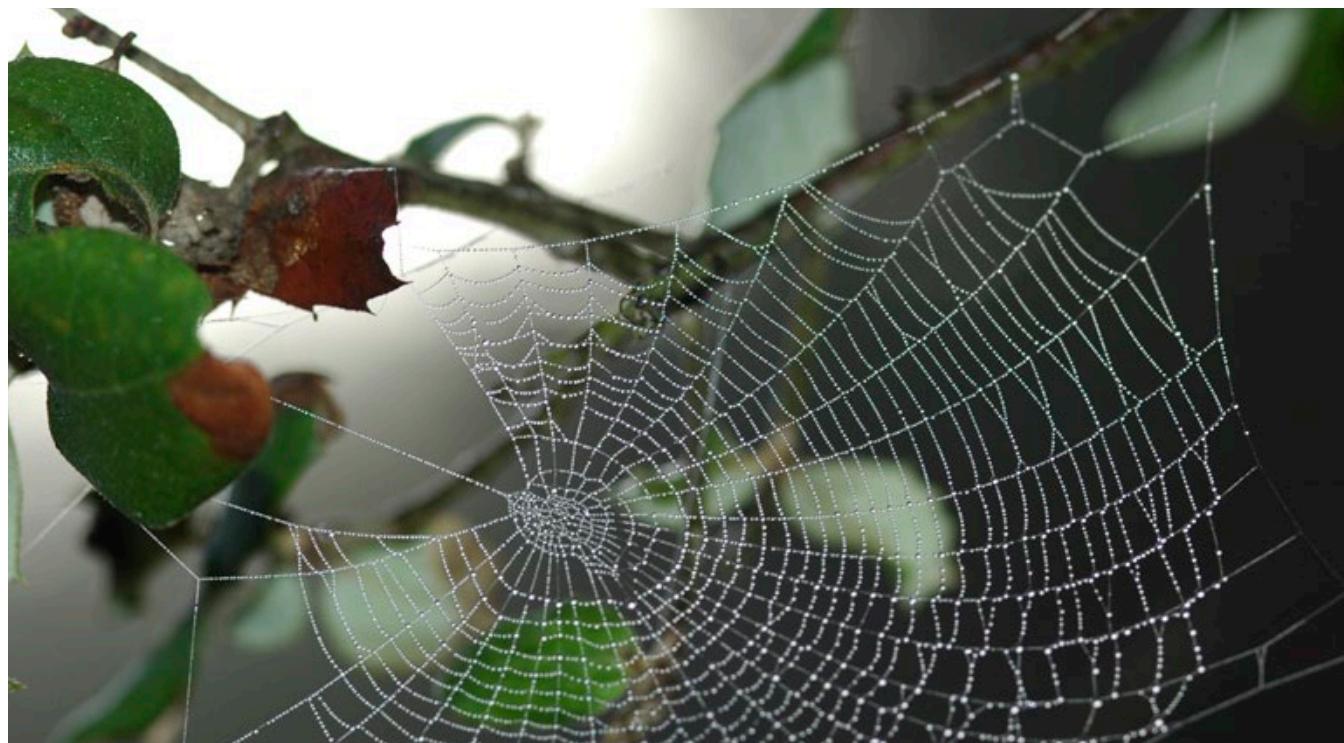
Ya se han propuesto membranas inteligentes con la propiedad de autorrepararse. Las primeras aplicacio-



Las pelotas de caucho, usadas en la antigüedad por los Aztecas, se autocicatrizan y recuperan toda su elasticidad. Mural Tepantitla en el complejo de Teotihuacan.

nes se han realizado en estructuras hinchables, capaces de soportar algunos pinchazos (Speck et al. 2006). El material está inspirado en cómo reparan los daños algunas plantas (en particular, la vid *Aristolochia macrophylla*) y consiste en adosar en la parte interior de la membrana de plástico una capa de espuma de poliuretano que puede cerrar las heridas, con la ayuda de la presión interior.

En el campo de los materiales compuestos y, en particular en el de los compuestos de matriz polimérica, también se está intentado desarrollar materiales capaces de autorrepararse. El diseño de estos materiales se basa en las mismas ideas anteriormente comentadas para los hormigones; mezclar en la matriz polimérica el catalizador y microcápsulas que contengan el monómero. Si se produce una fisura, se rompen las microcápsulas que encuentra en su camino, se libera el monómero, entra en contacto con el catalizador y se inicia la polimerización que, eventualmente, acaba sellando la grieta (Dry 1996, White et al. 2001). El inconveniente de estos materiales es que no pueden soportar otra agresión en el mismo lugar, porque ya han agotado el monómero. Se están investigando materiales en los que se instaura una red de microvascularización —imitando a los seres vivos— capaz de suministrar de nuevo el monómero pero, de momento,



Las excepcionales propiedades de los hilos de seda de las arañas y las características redundantes de su red postensada hacen que la Naturaleza siempre sea una fuente de inspiración para los materiales y las estructuras del futuro.

estos experimentos están en una fase muy preliminar (véase p.e. Toohey, 2007).

Entre los materiales inteligentes cuya función principal no es estructural, se conocen varios polímeros que se autorreparan muy bien y que pueden servir de base para pinturas y recubrimientos protectores de los materiales estructurales. Dos ejemplos ayudarán a ilustrar este concepto: el primero es el de los “ionómeros” —polímeros con enlaces covalentes entre los elementos de la cadena y en los que las distintas cadenas están unidas mediante enlaces iónicos—. Estos materiales se regeneran cuando sufren un impacto; si un proyectil atraviesa la película polimérica, ésta se regenera como si se tratara de una lámina de agua (Varley et al. 2007). Como este proceso es debido a la propia estructura del polímero y no depende de la presencia de otros agentes externos, puede repetirse tantas veces como sea necesario. DuPont ha comercializado este producto con el nombre de Surlyn®. Otro hallazgo reciente es el de los polímeros con una “estructura supramolecular estabilizada con enlaces de hidrógeno” (Cordier et al. 2008). Estos polímeros son tan deformables como los elastómeros, pero en contraste con ellos cuando se cortan, o rompen, se pueden soldar fácilmente volviendo a poner en contacto las dos superficies. El proceso se realiza a temperatura ambiente, en poco tiempo (minutos), recuperándose todas las propiedades mecánicas, en particular su capacidad de deformación.

PERSPECTIVAS FUTURAS. EL FUTURO ES IMPREDECIBLE

El 20 de julio de 1989 el presidente de Estados Unidos, George Bush, dijo solemnemente que los norteamericanos volverían a la Luna; «this time to stay». No faltaron visionarios que inmediatamente se pusieron a trabajar diseñando materiales para las futuras bases lunares. A ser posible, estos materiales debían ser “inteligentes” para evitar el costoso control durante su vida útil y la posibilidad de una rotura, que acarrearía consecuencias fatales. Los intentos en esta dirección, han quedado plasmados en varios informes financiados por la NASA. En el campo de la ingeniería civil, el hormigón es un buen candidato para las bases lunares y, ya en 1991, se celebró el primer simposio ACI/NASA para evaluar las posibilidades de un “hormigón lunar”. De momento, los viajes a la Luna llevan un cierto retraso y el hormigón lunar debe esperar, pero el esfuerzo realizado ha sido rentable (ver, por ejemplo, Kaden 1991).

Para imaginarnos cómo serán los materiales del futuro, podemos apoyarnos en cómo evolucionarán los materiales del presente, y la biología nos puede proporcionar dos pistas:



El viaducto de Millau (Francia) es el puente atirantado más largo del mundo y un ejemplo de colaboración entre arquitectos (Norman Foster) e ingenieros (Michel Virlogeux) para conseguir una obra que es exponente de la tecnología de nuestro tiempo.

- La **competencia** entre especies hará que sobrevivan las más adecuadas. Los materiales que, cumpliendo las mismas funciones, resulten más económicos se desarrollarán mejor. Los materiales exóticos ocuparán nichos muy especiales, donde no tengan competidores.
- Las **amenazas externas** —como el cambio climático, por ejemplo— serán otras fuerzas que dirijan el futuro de la evolución. Los materiales que puedan adaptarse a las exigencias del mercado serán los que sobrevivan. Imaginemos que la Administración exige un férreo control de calidad y mantenimiento de las obras, y que el coste de la instrumentación es superior al de los materiales “inteligentes”. En estas circunstancias la “amenaza exterior” —el férreo control de calidad— favorecerá el desarrollo y la evolución de esta familia de materiales que, actualmente, son curiosidades de laboratorio.

Los materiales estructurales actuales, provistos de sensores y/o de actuadores, son sólo un primer paso en el camino hacia las estructuras inteligentes con las que se edificarán las ciudades del futuro. Si en las estructuras instalamos sensores solamente capaces de detectar —pero incapaces de interpretar lo que detectan— lo que tendremos serán estructuras tontas y caras en vez de eficaces e inteligentes. Los materiales estructurales

tradicionales, como el acero, el hormigón o los polímeros, no tienen por qué ser mudos, ciegos o sordos.

En el futuro se concebirán estructuras que sientan —que detecten— los cambios internos y externos, de la misma manera que los seres vivos, y que además sean capaces de interpretar el significado de sus sensaciones y obrar en consecuencia. Las estructuras del futuro, fabricadas con materiales inteligentes, podrán sentir el dolor producido por las agresiones externas o por el envejecimiento progresivo y, si no son capaces de resolver por sí mismos sus problemas, por lo menos gritarán cuando necesiten ayuda. ■

BIBLIOGRAFÍA

- ACI Comité 318, *Building code requirements for reinforced concrete*, Farmington Hills, MI (2002).
- Adzima B.J., Kloxin C.J., Bowman C.N. *Externally triggered healing of a thermoreversible covalent network via self-limited hysteresis heating*. *Adv Mater* (2010) 22, 2784-2787.
- Andreeva D.V., Fix D., Möhwald H., Shchukin D.G. *Self-healing anticorrosion coatings base on pH-sensitive polyelectrolyte-inhibitor sandwichlike nanostructures*, *Adv. Mater.* (2008) 20, 2789-2794.
- ASTM A767.90, *Standard specification for zinc coated (galvanized) steel bars for concrete reinforcement*, West Conshohocken, PA (1990).
- Bakis C.E. et al., *Fiber-reinforced polymer composites for construction*, *J. of Composites for Construction* (2002) 6, 73-87.
- Cordier P., Tournilhac F., Soulie C., Leibler L., *Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular assembly*, *Nature* (2008) 451, 977-980.
- Dry C., *Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials*, *Composite Structures* (1996) 35, 263-269.
- Duffó G.S., Farina S.B. *Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures*. *Construction and Building Materials* (2009) 23, 2746-2751.
- Dwairi H.M., Wagner M.C., Kowalsky M.J., Zia P. *Behavior of instrumented prestressed high performance concrete bridge girders*. *Construction and Building Materials* (2010) 24, 2294-2311.
- Ghosh B., Urban M.W. *Self-repairing oxetane-substituted chitosan polyurethane networks*. *Science* (2009) 323, 1458-1460.
- Ghosh B., Biswas M., Chattopadhyay B.D., Mandal S. *Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar*. *Cement & Concrete Composites* (2009) 31, 93-98.
- Green Concrete. *ACI Magazine* Vol. 31, No. 2 (2009).
- Hager M.D., Greil P., Leyens C., Zwaag S. van der, Schubert U.S. *Self-healing materials*. *Adv Mater* (2010) 22, 5424-5430.
- Hansen C.J., Wu W., Toohey K.S., Sottos N.R. *Self-healing materials with interpenetrating microvascular networks*. *Adv Mater* (2009) 21, 4143-4147.
- Janke L., Czderski C., Motavalli M., Ruth J., *Applications of shape memory alloys in civil engineering structures*, *Materials and Structures* (2005) 38, 578-592.
- Jarosevic A., *Magnetoelastic method of stress measurement in steel*, *Smart Structures*. NATO Science Series (1999) Vol. 65, 107-114.
- Johnson R. et al., *Large scale testing of nitinol shape memory alloy devices for retrofitting of bridges*, *Smart Mater. Struct.* (2008) 17, 1-10 (035018).
- Kaden R.A. *Lunar concrete ACI SP-125* (1991). Koch G.H. et al., *Corrosion costs and preventive strategies in the United States*, *Materials Performance* (2002) 6, Suppl., 1-11.
- Kunieda M., Rokugo K., *Recent progress on HPFRCC in Japan*, *J. Adv. Concrete Technology* (2006) 4, 19-33.
- Li V.C., Lim, Y.M., Chan Y., *Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite*, *Composites* (1998) 29B, 819-827.
- Murphy E.B., Wudl F. *The world of smart healable materials*. *Progress in Polymer Science* (2010) 35, 223-251.
- Park J.H., Braun P.V. *Coaxial electrospinning of self-healing coatings*. *Adv Mater* (2010) 22, 496-499.
- Qian S., Zhou J., Rooij M.R. de, Schlangen E., Ye G., Breugel K van. *Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials*. *Cement & Concrete Composites* (2009) 31, 613-621.
- Ramachandran S.K. et al., *Remediation of concrete using micro-organisms*, *ACI Materials J.* (2001) 98(1), 3-9.
- Sánchez F., Sobolev K. *Nanotechnology in concrete – A review*. *Construction and Building Materials* (2010) 24, 2060-2071.
- *Self-healing materials*. Heron, Vol. 56 No. 1 y 2 (2011).
- Siddique R., Chahal N.K. *Effect of ureolytic bacteria on concrete properties*. *Construction and Building Materials* (2011) 25, 3791-3801.
- Speck T. et al., *Self healing processes in nature and engineering: self-repairing biomimetic membranes for pneumatic structures*, *Design and Nature III*. WIT Press (2006), 105-114. Toohey K.S. et al., *Self-healing materials with microvascular networks* *Nature Mater.* (2007) 6, 581-585.

- Tittelboom K. van, Belie N. de, Muynck W. de, Verstraete W. *Use of bacteria to repair cracks in concrete.* Cement and Concrete Research (2010) 40, 157-166.
- Varley R.J., van der Zwaag, Evaluation of self healing capability of Surlyn 8940, Delft Centre for Materials report (2007).
- Vidya S., Allouche E.N. *Strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymers concrete.* Materials and Structures (2011) 44, 1467-1475.
- Voyiadjis G.Z., Shojaei A., Li G. *A thermodynamic consistent damage and healing model for self healing materials.* International Journal of Plasticity (2011) 27, 1025-1044.
- Wang J., Tittelboom K. van, Belie N. de, Verstraete W. *Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete.* Construction and Building Materials (2012) 26, 532-540.
- Wen S., Chung D.D.L., *Strain-sensing characteristics of carbon fiber-reinforced cement,* ACI Materials J. (2005) 102(4), 244-248.
- White S.R. et al., *Autonomic healing of polymers composites,* Nature (2001) 409, 794-797.
- White S.R., Albers R.G., Quattrone R.F., *Tagging of composite materials with Terfenol-D magnetostrictive particles for structural health monitoring.*
- White S.R., Geubelle P.H. *Get ready for repair-and-go.* Nature Nanotechnology (2010) 5, 247-248.
- White S.R., Blaiszik B.J., Kramer S.L.B., Olugebefola S.C. *Self-healing polymers and composites.* American Scientist (2011) 99, 392-399.
- Wiktor V., Jonkers H.M. *Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete.* Cement & Concrete Composites (2011) 33, 763-770.
- Wojtecki R.J., Meador M.A., Rowan S.J. *Using the dynamic bond to access macroscopically responsive structurally dynamic polymers.* Nature Materials (2011) 10, 14-27.
- Yang Z., Hollar J., He X., Shi X. *A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules.* Cement & Concrete Composites (2011) 33, 506-512.