

# ESPAÑA SIGLO XXI

Salustiano del Campo y José Félix Tezanos

DIRECTORES

## CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Carlos Sánchez del Río \_ Emilio Muñoz \_ Enrique Alarcón

EDITORES

B I B L I O T E C A N U E V A

4

## Ciencia e ingeniería de los materiales en la España del siglo XXI

MANUEL ELICES CALAFAT

### 1. INTRODUCCIÓN

Difícilmente se encontrará una actividad humana donde los materiales no tengan un cierto protagonismo; desde la flamante estación orbital internacional hasta el humilde receptor de radio de bolsillo, desde los trenes de levitación magnética hasta el coche utilitario o desde un sofisticado equipo de tomografía por emisión de positrones hasta un sencillo aparato de rayos X, los materiales nos facilitan la vivienda, la energía, el transporte, las comunicaciones, la salud y el bienestar.

Se ha dicho que el bienestar económico y social de un país depende de su nivel de ingeniería; no hay duda de que la ingeniería de materiales tiene un gran protagonismo en las industrias del automóvil, aeroespacial, electrónica, en el sector de la energía y, recientemente, en las Ciencias de la Salud. También parece claro que la velocidad de crecimiento de sectores clave en la economía está limitada por el progreso conseguido en la ciencia e ingeniería de los materiales. Esta joven disciplina es indispensable para potenciar la capacidad industrial y la innovación tecnológica (M. Elices, 1998).

El objetivo de este capítulo es mostrar algunos ejemplos del vasto campo de la ciencia e ingeniería de los materiales, tratando de equilibrar su protagonismo dentro de las tres grandes familias; los materiales *estructurales*, los materiales *funcionales* y los materiales *biológicos*. En paralelo, también se pretende exponer algunos desarrollos realizados por empresas españolas durante los últimos treinta años, indicando cifras de producción, tanto en valores absolutos como en relación con su entorno europeo o mundial.

Estos propósitos no han sido fáciles de materializar; las limitaciones de espacio han obligado a una selección de temas, forzosamente subjetiva, por lo que algunas áreas han quedado excluidas. Por otro lado, la información sobre la producción también es fragmentaria porque está muy atomizada y, en ocasiones, no fácilmente asequible debido al dinamismo de las empresas.

## 2. MATERIALES ESTRUCTURALES

Los materiales cuya función principal es la resistente suelen llamarse *estructurales*. En este apartado se comentan varios ejemplos de materiales estructurales que han tenido especial relevancia en el desarrollo tecnológico español durante los últimos años. La presentación se ha hecho agrupándolos según las tres familias tradicionales; materiales *metálicos*, materiales *cerámicos* y materiales *poliméricos*. También se reseñan algunos progresos en el novedoso y prometedor campo de los materiales *compuestos*. Los materiales estructurales de origen *biológico* (M. Elices, 2000) no se han considerado en este resumen.

La ciencia e ingeniería de los materiales ha alzado la madurez necesaria para poder controlar y modificar las propiedades más características de los materiales estructurales; la resistencia, la tenacidad, la fluencia, la relajación, o la durabilidad. Estos logros se pueden conseguir a través de un control muy preciso de la estructura de los materiales a nivel micro y nanométrico.

Al diseñar y fabricar materiales más resistentes se pueden construir componentes estructurales capaces de soportar mayores cargas con la misma cantidad de material (J. C. Williams, E. A. Starke, 2003). Los aereogeneradores, por ejemplo, si se fabrican con materiales con mayor carga de rotura y más tenaces podrán soportar cargas del viento que en circunstancias normales —es decir, con los materiales usuales— obligarían a parar los rotores. Una mejora en la resistencia a deformarse con altas temperaturas siempre es una ventaja en los componentes de los generadores térmicos de potencia, ya que la posibilidad de elevar la temperatura de trabajo repercute en un mayor rendimiento. Los materiales en los que se ha mejorado su resistencia a la corrosión tendrán una vida más prolongada en ambientes agresivos y, en consecuencia, ahorrarán energía durante su ciclo vital.

### 2.1. *Materiales metálicos*

Los materiales metálicos son los que han tenido una mayor influencia en nuestro desarrollo tecnológico. Esta afirmación no es desmesurada; su maleabilidad y resistencia, junto con su conductividad eléctrica y térmica y la facilidad de aleación los hacen únicos. La metalurgia aun siendo un arte de la antigüedad, se ha convertido en una ciencia moderna gracias al progreso, en los últimos años, de la química y de la física.

Hoy en día, la ciencia e ingeniería de los materiales metálicos debe proporcionar aleaciones capaces de satisfacer los más diversos requisitos; soportar las altas temperaturas de los turborreactores y las bajísimas temperaturas de los imanes superconductores, la irradiación en los reactores nucleares, las agresiones medioambientales de las plataformas petrolíferas, poder almacenar hidrógeno en depósitos de combustible, o permitir su procesado hasta las ínfimas dimensiones que demanda la nanotecnología. Todos estos requisitos hacen inviables los antiguos procedimientos empíricos y obligan al metalúrgico a tener unos conocimientos más profundos de cómo se comportan los metales; debe saber cómo se relacionan la estructura y propiedades, y el papel fundamental que tienen las imperfecciones.



Las características de muchos metales, como su ductilidad, facilidad de aleación y alta conductividad eléctrica, son debidas a su estructura cristalina —un denso empaquetamiento de iones positivos, sumergido en un mar de electrones— y a la presencia de defectos, en particular de dislocaciones. En los metales que cristalizan en estructuras cúbicas con las caras centradas, las dislocaciones se pueden mover con relativa facilidad a cualquier temperatura y ello facilita mucho su deformación. Cuando cristalizan en estructuras cúbicas simplemente centradas, la maleabilidad sólo se consigue por encima de la temperatura de transición dúctil-frágil.

### 2.1.1. «Aceros»

La mayoría de los metales que nos ofrece la naturaleza están en forma de compuestos metálicos que es preciso fundir, como primer paso para su explotación industrial. La preponderancia del *hierro* es debida a la riqueza y abundancia de sus menas y a la variedad de propiedades que se pueden conseguir aleándolo con carbono. El acero, por su resistencia y bajo coste, continuará liderando el mercado de los materiales estructurales a pesar del inconveniente de corroerse, porque el extra-coste de la pintura o el galvanizado suele resultar ventajoso.

Desde mediados del siglo XIX, cuando se inició el despegue de la industria siderúrgica, no han cesado los avances en el diseño de nuevas aleaciones férreas. Algunas familias de aceros desarrollados durante los últimos treinta años merecen destacarse: Los aceros HSLA (acrónimo de High-Strength Low Alloy), con un contenido en C del 0,15% y distintas cantidades de Ti, V o Nb, permitieron reducir el peso de las carrocerías de los automóviles en un 35%, al incrementar su límite elástico desde 300 MPa hasta 550 MPa. Los aceros TRIP (acrónimo de Transformation Induced Plasticity) con una estructura de ferrita, bainita y austenita, que proporciona una gran ductilidad y una capacidad de endurecimiento por transformación martensítica durante el proceso de deformación, permiten conformar piezas de geometría compleja y aumentar la seguridad en las estructuras destinadas al transporte, porque durante un impacto el acero puede endurecerse antes de romper. Cada vez más, la industria del transporte exige aceros con más resistencia, más ductilidad, y mayor durabilidad (tanto frente a los ambientes agresivos como a la fatiga). Las nuevas familias de aceros TWIP (TWinning Induced Plasticity), TMT (optimized by Thermo Mechanical Treatments) o aceros microaleados, capaces de conseguir resistencias superiores a los 2000 MPa con una ductilidad aceptable, tratan de dar respuestas a los retos planteados por el competitivo mercado del transporte.

La siderurgia integral española en los años 70 se repartía entre tres grandes empresas: Ensidesa, Altos Hornos de Vizcaya (AHV) y Altos Hornos del Mediterráneo (AHM) (radicadas mayoritariamente en Asturias, Vizcaya y Valencia, respectivamente). Hasta 1988 operaban en España siete hornos altos (2 en Avilés, 2 en Gijón de ENSIDESA y 3 en Bilbao de AHV) que habían sido construidos entre 1957 (HA-1, Avilés) y 1983 (fecha de reconstrucción del HA-2A, Bilbao). A comienzos de los 90 se inicia un proceso de reconversión que ha sido sumamente largo y costoso, y que terminó con un proceso de privatización y la creación de Aceralia (previamente consti-



tuida como Corporación Siderúrgica Integral). Tras dicho proceso la siderurgia integral española quedaba prácticamente localizada en Asturias. A finales de los 90 se realizó la integración de tres grandes grupos siderúrgicos europeos en ARCELOR, que es la primera empresa mundial y cuyas actividades más importantes están en España. ARCELOR es la suma de ACERALIA (España), ARBED (Benelux), NORSIDER (Francia) y otras empresas europeas. Su producción anual es de 44 millones de toneladas.

La producción mundial de acero en 1970 fue de 595 millones de toneladas. En 2005 esta cifra se elevó hasta los 1.130 millones de toneladas, lo que da una idea de la evolución constante de este negocio. España es el quinto país europeo en producción de acero y el decimocuarto en el *ranking* mundial. El ejercicio 2006 ha constituido un año de récords históricos para la siderurgia española, con aumentos significativos en la producción de laminados en caliente y productos recubiertos. El acero obtenido por colada continua en Europa representa el 96% del total.

En este sector, la investigación y desarrollo se realiza en universidades (Oviedo, Bilbao, Madrid, Barcelona, ...), institutos del CSIC (CENIM) y centros tecnológicos (CEIT, INASMET, ...). Podría pensarse que en la industria siderúrgica hay poco margen para la innovación, pero no es así si se tiene en cuenta que hace diez años no existía el 50% de los aceros que hay actualmente en el mercado.

#### 2.1.2. «Aleaciones de aluminio»

El *aluminio*, después del hierro, es el segundo metal más utilizado; en 1995 se produjeron más de 20 millones de toneladas de aluminio. España produjo 360.000 Tm, una cantidad parecida a la de Francia y algo superior a la del Reino Unido, que produjo 238.000 Tm.

Hasta finales de 1880 el aluminio era tan escaso que se consideraba un material precioso y su coste era similar al de la plata. Se utilizó para joyería y para objetos de alto valor añadido, como anteojos para teatro y vajillas; parece ser que Napoleón III poseía una de ellas. En 1886 se descubrió un proceso más económico para producir aluminio, basado en la electrolisis, que ha permitido pasar de una decena de toneladas anuales, a principios del siglo xx, a varias decenas de millones de toneladas en la actualidad.

Las aleaciones de aluminio, por su baja densidad, su resistencia a la corrosión y sus buenas propiedades mecánicas y eléctricas, son muy atractivas para los sectores del transporte, construcción, envases y eléctrico. Los cuatro absorben el 75% de la producción y de su evolución depende el futuro de la industria del aluminio.

El 27 de abril de 2005, el gigante Airbus A380 despegó majestuosamente del aeropuerto de Toulouse en su vuelo inaugural. El 61% de su estructura estaba hecha de aleaciones de aluminio. Hicieron falta siete años para desarrollar, cualificar, y producir una nueva familia de aleaciones de aluminio para las estructuras de las alas y del fuselaje. En la definición de las especificaciones intervinieron Francia, Alemania, el Reino Unido y España.

En el sector de la *construcción* las aleaciones de aluminio ofrecen ventajas por su ligereza y resistencia a la corrosión, en particular en la carpintería metálica, cerra-

mientos, colectores solares, e intercambiadores de calor. En el campo de los *envases*, las latas para bebidas absorben los dos tercios de la producción. Además, las ventajas económicas de su reciclado hacen que este material resulte bastante atractivo (el reciclado consume solamente el 5% de la energía necesaria para la producción del aluminio inicial). En el sector *eléctrico*, la utilización del aluminio como conductor está ganando posiciones. El uso del cobre triplica al del aluminio pero mientras el kilo de cobre cueste más del doble cabe pensar que el consumo del aluminio irá en aumento. En las líneas de alto voltaje los cables de aluminio reforzados con acero ya han sustituido al cobre y las ventajas del precio y menor peso no hacen pensar que en el futuro cambie esta tendencia.

En España se inició la fabricación del aluminio en 1913 por Aluminio Español, S. A., en Huesca. En 1948, el INI pone en funcionamiento la Empresa Nacional del Aluminio (ENDASA) y Aluminio de Galicia (ALUGASA); la primera con diversas plantas de laminación y extrusión y la segunda para producir la aleación madre.

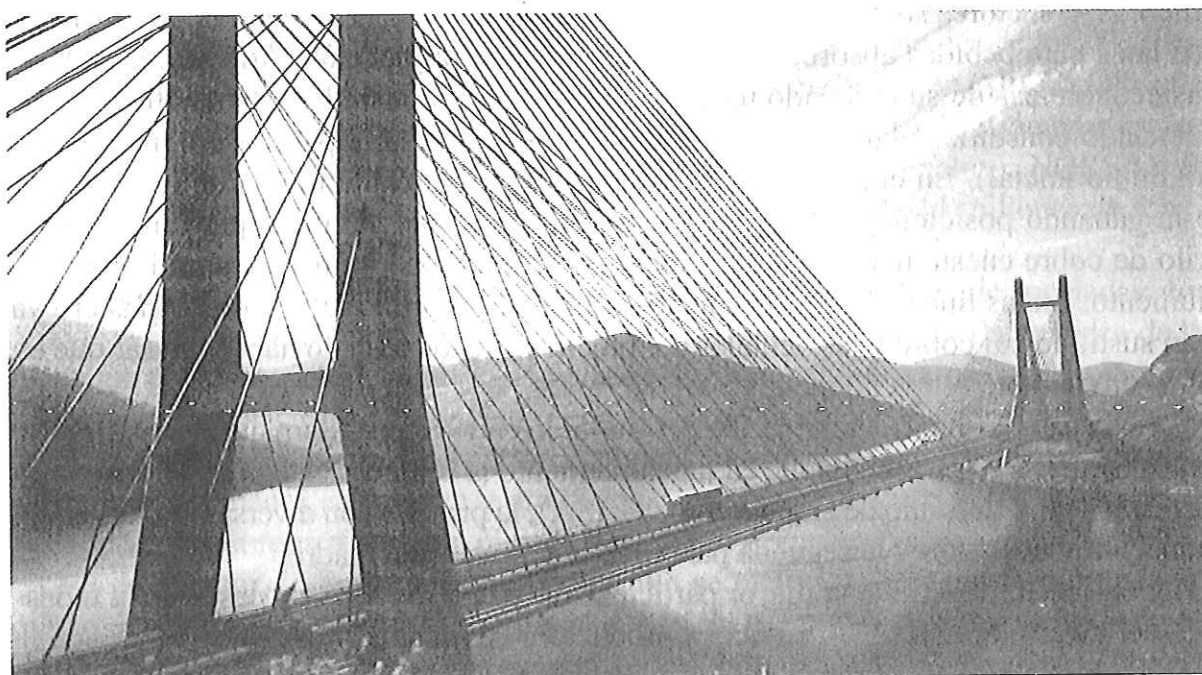
Con objeto de tener una mayor participación en los diversos procesos de la industria del aluminio, ENDASA, principal productora de metal, se fusiona en 1969 con la principal transformadora de aluminio en España, ALCAN Aluminio Ibérico, dando lugar a la nueva ENDASA.

En 1986 nace INESPAL (Industria Española del Aluminio) como consecuencia de la fusión de ENDASA y ALUGASA. INESPAL tiene al Instituto Nacional de Industria como principal accionista y a la compañía canadiense ALCAN como referente industrial.

Con objeto de promover el uso del aluminio, desarrollar nuevos productos, mejorar los procesos, garantizar la calidad de los productos y dar apoyo técnico a las fábricas y clientes INESPAL contaba con un centro de Investigación y Desarrollo en Alicante dotado de avanzados laboratorios y plantas piloto así como de un área de Ingeniería y Productos Especiales capaz de producir prototipos en sectores tales como transporte, defensa, electroquímica, petroquímica, eléctrico, etc.

En 1998 la empresa INESPAL es absorbida por la multinacional ALCOA pasando a formar parte de Alcoa Europe. La empresa emplea en España a casi 5.000 personas y cuenta con doce centros de producción. Actualmente ALCOA es la única empresa de España con capacidad de producir alúmina y aluminio primario, con una producción superior a las 350.000 toneladas/año y con una capacidad de fabricación de 230.000 toneladas/año de material laminado lo que la convierte en la mayor productora de aluminio transformado. El resto de la producción de aluminio en España está muy fragmentada en pequeñas fábricas que se dedican a la transformación del aluminio (principalmente extrusión). El centro de Investigación y Desarrollo de Alicante (CINDAL) es reconocido por ALCOA como Centro de Tecnología para toda ALCOA Europe dando apoyo técnico a las distintas fábricas europeas en el desarrollo de nuevos materiales y mejora de los procesos.

La producción actual de aluminio en España es insuficiente para el mercado lo que obliga a tener que realizar importaciones de metal que según datos de la Asociación Europea del Aluminio puede cifrarse, aproximadamente, en 320.000 toneladas/año de aluminio primario, 150.000 toneladas/año de material laminado, 60.000 toneladas/año de material extruido y 50.000 toneladas/año de cable.



El acero y el hormigón —materiales estructurales por derecho propio— han permitido la realización del puente Ingeniero Carlos Fernández Casado en Barrios de Luna (León) que fue récord mundial de su clase durante los años 1983-1991

## 2.2. *Materiales cerámicos*

Los orígenes de los materiales cerámicos se pierden en la antigüedad. Aunque muchas de las técnicas utilizadas para su fabricación y procesamiento las desarrollaran artesanos hace varios milenios, la tecnología de los materiales cerámicos sigue viva y activa, proporcionándonos materiales con propiedades extraordinarias (C. B. Carter, M. G. Norton, 2007). Sirvan de ejemplo las cerámicas capaces de resistir las altas temperaturas que deben soportar los morros y los bordes de ataque de los transbordadores espaciales y algunos componentes de los cohetes, las cerámicas con propiedades magnéticas utilizadas en los ordenadores, los nuevos nitruros y carburos con una dureza extraordinaria y una gran resistencia a la abrasión que los hace idóneos para herramientas de corte, o los tamices moleculares capaces de separar moléculas de distintos tamaños.

Las propiedades mecánicas y electrónicas de los materiales cerámicos derivan de la combinación de los enlaces covalente e iónico de sus componentes. Muchas cerámicas están compuestas por silicio y oxígeno, agrupados en configuraciones tetraédricas capaces de formar cadenas, placas o estructuras tridimensionales, responsables del variado y rico comportamiento de estos materiales. Al estar saturadas con oxígeno, a muchas cerámicas les cuesta oxidarse, lo que las hace muy resistentes a la corrosión. El carácter direccional de los enlaces covalentes dificulta bastante el movimiento de las dislocaciones y, en consecuencia, son duras y frágiles.

Para clasificar los materiales cerámicos podemos basarnos en la forma de su obtención; aquellos que se extraen en canteras y minas, como los mármoles o las arcillas,



los que se fabrican por reacción química, como los hormigones, y los que se producen mediante tratamientos térmicos, como los ladrillos y la cerámica tradicional.

España es un país destacado en la producción de materiales cerámicos de los llamados *tradicionales*; ladrillos y tejas, cerámica de mesa, cerámica sanitaria, porcelana artística, pavimentos cerámicos, aisladores cerámicos y ladrillos refractarios. La producción de este sector ha alcanzado en los últimos años un elevado nivel de automatización y su volumen de facturación significa casi el 2% del PIB. Al tratarse de procesos que requieren tratamientos térmicos a elevadas temperaturas ( $>1100^{\circ}\text{C}$ ), la industria cerámica se caracteriza por unos altos consumos de energía y un estricto control de los niveles de contaminación ambiental. Por esta razón, actualmente una parte importante de la innovación tecnológica en este sector está orientada a minimizar los niveles de consumo de energía y de contaminación.

Los materiales cerámicos *modernos* se han desarrollado en España en los últimos 25 años. El descubrimiento, a mediados de 1970, de los mecanismos de refuerzo de matrices cerámicas mediante la incorporación de determinados elementos microestructurales (por ejemplo, partículas de circonia parcialmente estabilizada que pueden experimentar transformaciones de fase de naturaleza martensítica, similar a la que se produce en los aceros) ha abierto el camino a los materiales cerámicos hacia aplicaciones estructurales antes impensables en la industria del automóvil y textil, en componentes de motores, válvulas, boquillas para la extrusión de metales, etc. En la actualidad, varias compañías españolas fabrican materiales cerámicos avanzados (Lomba Camiña S. A., Tolsa, Antolín, Cerámica Industrial Montgatina S. A., Keratec S. A., Keramat S. A., ...) gracias, en parte, al soporte de grupos de investigación en universidades (Madrid, Sevilla, Santiago de Compostela, ...) y centros de investigación (Instituto de Cerámica y Vidrio).

### 2.2.1. «Hormigones»

Cada año, más de 11.000 millones de toneladas de *hormigón* se consumen en el mundo. El dato indica que este material cerámico artificial es el material manufacturado más utilizado en el planeta. El uso de materiales pétreos cementados con cal y yeso está documentado en restos arqueológicos de más de 7.000 años de antigüedad, la civilización egipcia lo empleó y los romanos mejoraron esta tecnología al utilizar cenizas volcánicas. Estos hormigones se utilizaron en infraestructuras de acueductos y en grandes estructuras, como el anfiteatro de Pompeya (75 a.C.). Una mejora esencial en los cementos utilizados se produjo en 1756, cuando John Smeaton se dio cuenta de que al calcinar calizas que contenían arcilla se producían cales que endurecían bajo el agua y las utilizó para fabricar el hormigón con el que se edificó el faro de Eddystone. Así nació el moderno cemento Pórtland, cuya composición y técnicas de fabricación han mejorado continuamente durante los siglos XIX y XX. En la actualidad, los objetivos prioritarios de los fabricantes de cemento son la reducción del consumo energético y de la contaminación ambiental (P. Aitcin, 2000).

En España durante el año 2005 se han consumido más de 60 millones de  $\text{m}^3$  de hormigón, es decir, más de un  $\text{m}^3$  por habitante y año. En cuanto al cemento, el consumo durante el año 2005 ha sido superior a 51 millones de toneladas, lo que supone más de

una tonelada por habitante y año, habiendo superado en más de dos veces el consumo de finales de los años 80. Estas cifras dan una idea de la importancia que tienen tanto el hormigón como sus componentes en comparación con otros materiales industrializados, y la repercusión que presentan sus avances tecnológicos en la economía nacional.

La evolución del hormigón en nuestro país durante los últimos treinta años ha sido importante, en particular; en la mejora de sus propiedades, en el desarrollo de una construcción más eficiente, y en la incorporación de criterios medioambientales en su fabricación. Veamos estos tres aspectos con un poco más de detalle:

La *mejora de prestaciones* ha venido de la mano del desarrollo de hormigones de *alta resistencia* que a finales de los años 80 superaron la resistencia de 100 MPa, y en la actualidad alcanzan los 200 MPa en hormigones impregnados con polímeros. También los hormigones *reforzados con fibras* han evolucionado: las fibras de acero proporcionan un buen comportamiento frente a impacto y buena ductilidad. La fibra de vidrio permite obtener buenos cerramientos de fachadas con piezas de menor espesor y peso. La fibra de polipropileno mejora el comportamiento del hormigón frente al fuego, especialmente en túneles. Igualmente deben mencionarse los hormigones para *aplicaciones específicas*: hormigones pesados para protección nuclear y de radiaciones  $\gamma$ , hormigones para instalaciones criogénicas, y hormigones altamente impermeables a sustancias agresivas.

Desde el punto de vista de una *construcción más eficiente* los avances también han sido importantes, en particular el desarrollo de los hormigones autocompactantes. Estos hormigones se caracterizan por tener una alta fluidez y una adecuada viscosidad que impide la segregación de sus componentes, lo que permite la puesta en obra con menos mano de obra, sin necesidad de vibrado para compactación y plazos de ejecución menores. Conviene destacar el desarrollo de hormigones ligeros para forjados autportantes, que disminuyen el plazo de ejecución y reducen los elementos auxiliares de construcción. Actualmente se ponen en obra hormigones ligeros bombeados a alturas superiores a 200 m sin problemas de segregación o pérdida de docilidad. La incorporación de aditivos de última generación ha sido fundamental para este propósito. Sirva de ejemplo el reciente desarrollo de aditivos que proporcionan al hormigón capacidad auto-limpiante, evitando la formación de pátinas o el crecimiento de líquenes y hongos.

La incorporación de los *criterios medioambientales en la fabricación* de hormigones también ha supuesto un importante avance, ya que la producción de una tonelada de cemento Pórtland conlleva la emisión de más de 850 kg de  $\text{CO}_2$ . En este campo la incorporación de adiciones al cemento ha permitido reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$ , reutilizar residuos industriales evitando su acumulación en vertederos y adecuar las propiedades del cemento a usos específicos (cemento de bajo calor de hidratación, resistente a los sulfatos, de endurecimiento lento, etc.). Las adiciones del cemento que cumplen esta triple función son las cenizas volantes provenientes de centrales térmicas, el humo de sílice (polvo de  $\text{SiO}_2$ ) y las escorias siderúrgicas; son materiales conglomerantes que producen compuestos hidratados similares a los del cemento Pórtland, que provienen del residuo de otras industrias y que, por tanto, al sustituir parcialmente al *clinker* de cemento Pórtland reducen la contaminación y el coste de producción. En el caso de las cenizas volantes se obtienen hormigones menos permeables y con bajo ca-

lor de hidratación. El empleo de humo de sílice es casi imprescindible para obtener hormigones de alta resistencia.

Los principales fabricantes de cemento en España son: Cementos Alfa, Cementos Molins, Cementos Portland Valderrivas, Cemex España, Holcim, Lafarge Asland y Uniland Cementera. El mercado del hormigón está muy atomizado, en España hay más de 2.400 plantas de hormigón preparado y de ellas tan sólo 350 tienen el sello de calidad AENOR.

El organismo de referencia del cemento es el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y, en relación con el hormigón, la Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP). El centro de investigación más destacado es el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), fundado a mediados del pasado siglo. Otros centros donde se realiza investigación sobre cemento y hormigón son el CEDEX (Ministerio de Fomento) y en varios departamentos universitarios de las Escuelas de Ingenieros de Caminos.

### 2.3. *Materiales poliméricos*

Los materiales poliméricos debieron ser los primeros que usaron los humanos; es muy posible que antes de que aprendieran a tallar la piedra utilizaran pieles para protegerse, fibras, y utensilios de madera. No obstante, hubo que esperar hasta mediados del siglo pasado para empezar a entender las relaciones entre estructura y propiedades de estos complejos materiales. Como su nombre indica, el término polímero deriva de las palabras griegas *poli* (muchas) y *meros* (partes). Estas partes, llamadas *monómeros*, pueden ser pequeñas o grandes moléculas conectadas entre sí por enlaces covalentes. El análisis de estas grandes moléculas ha necesitado la ayuda de una instrumentación muy sofisticada y por ello la ciencia de los materiales poliméricos es todavía una disciplina relativamente joven (M. A. Ramos, 2007).

El primer polímero sintético —la baquelita— fue obtenido en 1905 por el químico belga Leo Baekeland, gracias al cual ganó fama, fortuna y la portada de la revista *Time*. Otro polímero famoso, el nilón, una poliamida, fue inventado por Wallace Carothers en 1934 en los laboratorios de Du Pont. El estirado en frío del polímero produce la reorientación de las cadenas de poliamida y aumenta considerablemente su resistencia a la tracción. Por este procedimiento se obtuvieron fibras finas y muy resistentes con las que se podían fabricar cuerdas y tejidos. Du Pont nunca tuvo una patente de la composición del nilón; sólo patentó el proceso de estirado en frío. Este proceso, descubierto accidentalmente, dio lugar al producto más importante que Du Pont ha puesto en el mercado.

Hoy en día, a la mayoría de los polímeros comerciales se les conoce de forma coloquial con el nombre de *plásticos*, uno de estos adjetivos que se han transformado en sustantivo. En rigor, el término plasticidad debería aplicarse solamente a las deformaciones irreversibles (que no se recuperan una vez retirada la carga que las produce; en este sentido, la mayoría de los metales pueden plastificarse) pero el término se ha distorsionado y se aplica a la facilidad con que se pueden conformar los distintos objetos y ha resultado atractivo para designar los productos fabricados con polímeros que, además, suelen ser ligeros, baratos y duraderos. Los *elastómeros* forman otra subfamilia

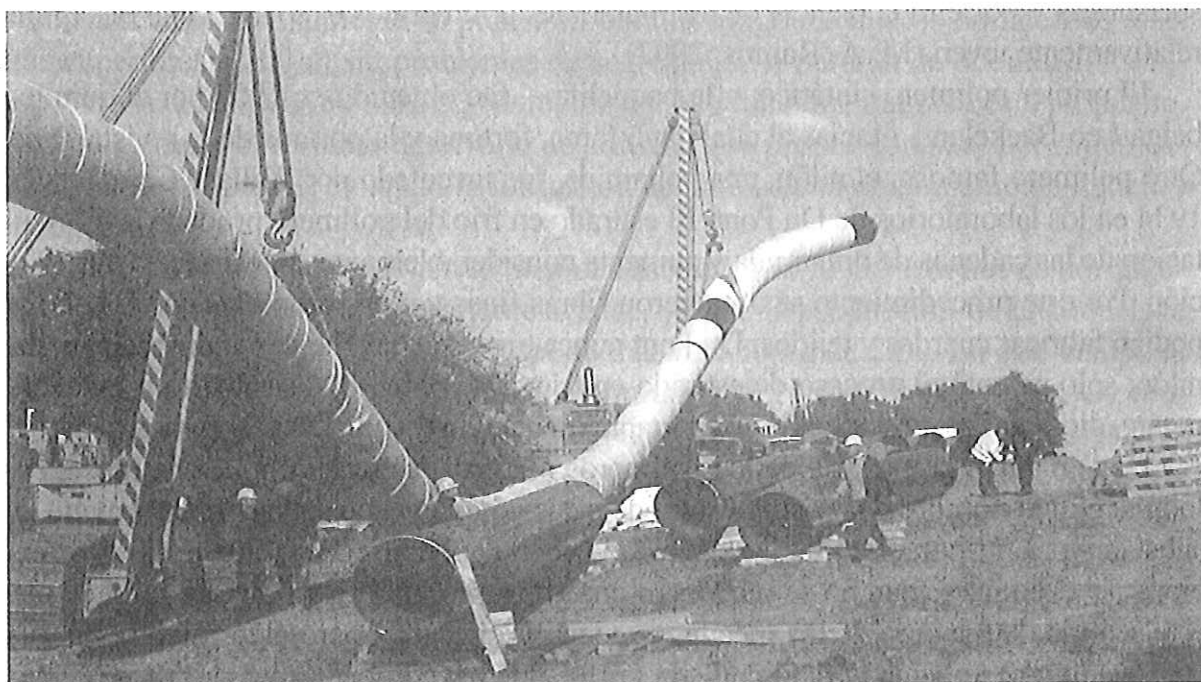


con características específicas dentro de los materiales poliméricos. De nuevo el término elástico, que tiene un significado muy preciso en la mecánica de medios continuos, se utiliza aquí para indicar que el polímero puede soportar grandes deformaciones y recuperarse cuando cesa la carga aplicada; las bandas de caucho que se venden en las papelerías son un buen ejemplo de este tipo de materiales. La tercera gran subfamilia que conviene considerar aquí es la de las *fibras*; el nilón, el rayón, o el poliéster son las materias primas de la industria textil.

### 2.3.1. «Plásticos»

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 polícloruro de vinilo (PVC), utilizado en la industria de la construcción, saneamiento, y envases; el polipropileno (PP) y el polietilentereftalato (PET). Hace 50 años el consumo de estos materiales era muy reducido (1 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).

La Seda de Barcelona se constituyó en el año 1925 para la fabricación de fibras de rayón viscosa a partir de la celulosa. El grupo Solvay empezó en 1956 la fabricación de PVC en Torrelavega. En los años 60 junto a la primera refinería de Puertollano se constituyó una pequeña planta para producir olefinas que surtían a Alcudia, Calatrava, Montoro y Paular. En 1981 se crea el Instituto Nacional de Hidrocarburos (INH) y en 1986 se crea Repsol, con el INH como accionista único, mientras que en 1989 comienza la privatización que finaliza en 1997. El gran impulso a la fabricación de plásticos



Los plásticos —como materiales estructurales— tienen un protagonismo creciente en las industrias de la construcción y del transporte

en España tiene lugar a finales de los 60 en el complejo petroquímico de Tarragona donde las grandes multinacionales instalan la mayoría de sus plantas de síntesis.

En España, en 1947 se creó una unidad de plásticos dentro del Instituto de Química Orgánica del CSIC que en 1952 se organizó como Departamento independiente, en 1967 como Instituto de Plásticos y Caucho y en 1987 como Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP) contando hoy con más de 100 investigadores. Durante más de 30 años fue el único grupo español dedicado a la investigación en el campo de los polímeros, lo cual le llevó a asumir funciones importantes, aunque no estrictamente propias de un centro de investigación, tales como enseñanza, normalización, publicaciones y organización de Ferias y Congresos. Este instituto ha sido el germen de centros de investigación en Tarrasa, Barcelona, el País Vasco y otras universidades de España. Entre las líneas de investigación de estos centros merecen destacarse: los polímeros de condensación con estructuras cíclicas y sus aplicaciones en electrónica y en membranas semipermeables —gracias a sus excelentes propiedades mecánicas y térmicas—, polímeros con actividad biológica, y polímeros electroactivos y fotosensitivos. A nivel empresarial caben destacar dos desarrollos de interés: uno, derivado de la aplicación de la fotoquímica de polímeros al diseño de láminas para usos agrícolas con propiedades especiales, realizado por Repsol S. A. con la colaboración de centros estatales (filmes térmicos opacos al IR, conversores UV-V en poliolefinas y otros) y el otro, sobre plásticos reforzados con fibras de alto módulo desarrollados por las empresas EADS-CASA y GAMESA.

La producción de plásticos en España durante el año 2005 fue de 4 millones de toneladas y el consumo ascendió a 4,5 millones de toneladas. El 48% va destinado al mercado del envase y embalaje. El consumo aparente de plásticos en España, por habitante y año, ha crecido desde 0,3 kg en 1965, a 23 kg en 1975, llegando a los 102,5 kg en 2005. España es el quinto consumidor europeo de plásticos y su producción es el 9% de la europea. Este sector integra más de 4.000 empresas que dan trabajo a unas 100.000 personas, siendo su facturación cerca de 14.000 millones de euros (2,1% PIB).

La producción de las tres principales áreas geográficas (Tratado de Libre Comercio, Unión Europea y Japón) en 2005 fue de 113 millones de toneladas, de las que el 41% correspondieron a la Unión Europea. La industria plástica europea, incluida la transformación y la producción de maquinaria, representa, tanto directa como indirectamente, un millón y medio de empleos en Europa y el valor añadido bruto ascendió en 2005 a 165.000 millones de euros, lo que supone el 3,0% del generado por la industria.

Los plásticos a los que se ha hecho referencia hasta ahora se destinan a funciones estructurales y acaparan el 90% de la producción industrial, pero en el horizonte ya asoman polímeros de nueva generación, destinados a tener un importante protagonismo entre los materiales funcionales y los biomateriales. La mayoría todavía están en los laboratorios de las universidades y centros de investigación, son materiales con un alto valor añadido en busca de aplicaciones muy especializadas. No suplantarán a los plásticos de consumo pero irán a lugares que no alcanzan los polímeros tradicionales; se utilizarán en microelectrónica o en biomedicina y, de alguna forma, acabarán formando parte de nuestras vidas.

### 2.3.2. «Elastómeros»

Los *elastómeros* naturales ya eran conocidos por los mayas; lo llamaban *caochu* —parece ser que la palabra proviene de *caa* que significa madera y *o-chu*, lágrima— y se obtenía a partir del látex exudado por el árbol *Hevea brasiliensis* —es decir, de las lágrimas de su madera— y lo utilizaban para fabricar pelotas para sus juegos y botas impermeables. En 1839, Charles Goodyear descubrió el vulcanizado del caucho natural, iniciando una nueva era en la saga de los elastómeros. Para sustituir el caucho natural se desarrollaron polímeros sintéticos a base de diolefinas, butadieno o isopreno principalmente. El poliisopreno (IR) o caucho natural sintético —el látex de la *Hevea* puede contener hasta un 50% de poliisopreno— se empezó a producir industrialmente en 1954, gracias al desarrollo de catalizadores estereoespecíficos. Los cauchos de polibutadieno (BR) se empezaron a fabricar industrialmente en 1929 y ocupan el segundo lugar, en cuanto a volumen de consumo, entre los cauchos sintéticos. El 90% de estos cauchos se destina a la fabricación de neumáticos. La producción global de caucho se estima en unos 20 millones de toneladas (8,5 millones del natural y 12 millones del sintético).

La primera industria de caucho en España fue fundada por José Gasso i Martí en 1869 y se dedicaba a la fabricación artesanal de objetos de goma para buques y ferrocarriles. En 1917 se constituyó NEUMÁTICOS NACIONAL en Manresa como primer fabricante de neumáticos. La primera planta de Pirelli se constituyó en 1924 en Villanueva y Geltrú, fabricando cable eléctrico. Posteriormente en la década de los 30 se instalaron otros fabricantes como Bridgestone y Michelin. El crecimiento y modernización de esta industria empezó a mediados de la década de los 60. En el año 2005 el consumo aparente de caucho en España fue de 15 kg por habitante.

### 2.3.3. «Fibras»

Los humanos han utilizado *fibras* naturales para fabricar tejidos desde hace miles de años. En algunos restos de cerámica, datados hace más de 27.000 años, parece ser que se han detectado huellas de tejidos (O. Soffer y otros, 2000). De ser así, nuestros antepasados empezaron a tejer mucho antes de domesticar los animales y las plantas. La lana debió de ser uno de los primeros polímeros utilizados para tejer. En Irak se han encontrado inscripciones, datadas hacia 4200 a.C., confirmando un activo comercio con lana. La crianza y domesticación de las ovejas parece ser que se inició en Asia Central y se extendió a otras regiones del mundo porque las ovejas se adaptan con facilidad a los diversos climas. Se dice que los fenicios trajeron a España, desde Asia Menor, los antecesores de las merinas que actualmente, como es bien sabido, se han extendido por todo el mundo. El cáñamo, lino y algodón son otras fibras que se utilizaron varios miles de años antes de nuestra era. Según una leyenda china, una princesa descubrió por accidente —2.650 años a.C.— cómo se podía obtener un delicado, lustroso e iridiscente hilo de un capullo de un gusano de seda. A partir de este momento, los chinos se las ingeniarón para trabajar los capullos de los gusanos de



seda consiguiendo fibras más largas y brillantes que cualquier otra fibra natural. La historia también nos dice que el descubrimiento de la primera fibra sintética, el nilón, en 1934, fue casual.

Las fibras naturales se suelen clasificar por su origen: las fibras de origen *vegetal* suelen ser polímeros de carbohidratos o, dicho de otra forma, de base celulósica. Las plantas la fabrican a partir de agua y  $\text{CO}_2$ , mediante fotosíntesis. Las fibras se extraen a partir de los tallos, hojas, semillas y frutos de las plantas. Las fibras de origen *animal* suelen ser polímeros de aminoácidos, es decir, proteínas. Además de la lana y sus variedades, cachemir, alpaca, angora, etc., están las fibras de seda de los gusanos de seda y, últimamente, han despertado un cierto interés los hilos de seda de las arañas. Las fibras de origen *mineral* suelen ser polímeros de silicatos. Los más conocidos son los asbestos —palabra que proviene del griego y significa incombustible—. En la actualidad, los asbestos no se utilizan por los riesgos que entraña su inhalación.

El diseño y la fabricación de fibras sintéticas durante la segunda mitad del pasado siglo ha permitido el desarrollo de una importante industria textil, donde las tradicionales fibras naturales se han ido arrinconando por las ventajas económicas y funcionales que ofrecían las fibras sintéticas. Los avances que se están produciendo en la Ciencia de Materiales y en Biotecnología permiten entrever nuevos enfoques en el diseño y fabricación de fibras gracias a la nanotecnología, la síntesis apoyada en procesos biológicos y el autoensamblaje. Resulta irónico que en este milenio las fibras miren de nuevo a la naturaleza —en parte debido al desarrollo de la biotecnología—, cuando en el pasado siglo han tenido su época dorada por darle la espalda a las fibras naturales.

La producción global de fibras en 2006 se estima en 74,9 millones de toneladas, repartidas de la siguiente manera: fibras *naturales* 27,4 millones de toneladas (algodón 26,3 millones de toneladas, lana 1,1 millones de toneladas), fibras *sintéticas* 41,2 millones de toneladas (poliéster 27,7 millones de toneladas, poliamida 4,1 millones de toneladas, polipropileno 3,1 millones de toneladas, acrílicas 2,5 millones de toneladas, celulósicas 3,4 millones de toneladas), otras fibras 6,3 millones de toneladas.

Las empresas españolas integradas en la asociación de productores de fibras sintéticas (PROFIBRA) generan alrededor de 900 millones de euros en facturación, con más de 4.000 empleos directos. En el mundo hay más de 1.500 empresas productoras de fibras, de las cuales casi el 2% están ubicadas en España; el 67% de su producción se exporta a países de la UE.

## 2.4. *Materiales compuestos*

Un análisis detallado de los materiales citados en los anteriores apartados nos mostraría que muy pocos de ellos son materiales que podríamos llamar simples; formados por un solo componente. Los aceros, aunque el hierro sea el principal componente, deben muchas de sus propiedades a la presencia de carbono, sílice, manganeso y otros elementos. Lo mismo sucede con los polímeros y muchos materiales cerámicos. En el fondo, casi todos son materiales compuestos. En este apartado se reserva el calificativo «compuesto» para aquellos materiales formados por una matriz reforzada con fibras o

partículas; la matriz puede ser polimérica, metálica o cerámica. La naturaleza nos ofrece muchos ejemplos de materiales compuestos —con frecuencia muy sofisticados porque se trata de materiales con estructuras jerarquizadas— en los que suele ser difícil distinguir dónde acaba el material compuesto y dónde empieza la estructura. Entre estos dos límites —el material, más o menos simple, y el material jerarquizado— se sitúan los materiales compuestos tradicionales de este apartado.

Como en anteriores ocasiones, las raíces de los materiales compuestos se hunden en la historia de la humanidad. Los arcos que utilizaron los persas contra los griegos en la batalla de Maratón (490 a.C.) fueron contruidos con un *material compuesto* bastante complejo; el anverso, la cara traccionada, estaba formado por tendones animales trenzados mientras que el reverso, la cara comprimida, era de asta. A diferencia de los arcos de madera, se trataba de un material muy resistente y al que le afectaba poco la humedad, la temperatura y el paso del tiempo. Muchos años antes, los egipcios habían inventado un material compuesto de matriz cerámica; el ladrillo de arcilla reforzado con fibras de paja.

En la actualidad, seguimos fabricando materiales compuestos tratando de combinar las mejores prestaciones de cada componente. Los conocimientos alcanzados con la ciencia de los materiales ya nos permiten, en muchos casos, diseñar y fabricar materiales compuestos a la carta (M. F. Ashby, Y. J. M. Bréchet, 2003). El arco diseñado empíricamente por los persas ha evolucionado hasta las modernas pértigas que usan los atletas olímpicos: antes, con pértigas de bambú o de aluminio, el récord de altura conseguido por los deportistas parecía estancado, ahora, gracias a las fibras de vidrio embebidas en una matriz polimérica, es posible diseñar pértigas suficientemente rígidas y a la vez elásticas —modificando el tipo y la cantidad de fibra— para que se adapten a las características de cada atleta. El récord que en 1960 estaba en 4,70 m, en 1994 Sergei Bubka lo situó en 6,14 m con las nuevas pértigas. Los humildes tubos de paja, utilizados para reforzar materiales frágiles, serán sustituidos, posiblemente, por otros cilindros más delicados, los nanotubos de carbono. Aunque en ambos casos se ha vuelto a utilizar el mismo material —el carbono— el camino recorrido en este ciclo ha sido muy largo.

Las fibras son la base de los modernos materiales compuestos porque el material en esta forma es mucho más *resistente* y *rígido* (M. Elices, J. Llorca, 2002). En el caso del vidrio, ello se debe a que las fibras tienen muchos menos defectos. La gran resistencia de las fibras poliméricas, como el Kevlar, se debe al alineamiento de las cadenas del polímero, en contraposición a la distribución aleatoria y desordenada de su estado natural. Los materiales cristalinos, como el grafito, también se ordenan según el eje de la fibra, y ello contribuye a aumentar su rigidez y resistencia. Los *whiskers*, que son minúsculos monocristales alargados, son muy resistentes porque la densidad de dislocaciones de un monocristal muy fino es mucho menor que la del correspondiente policristal.

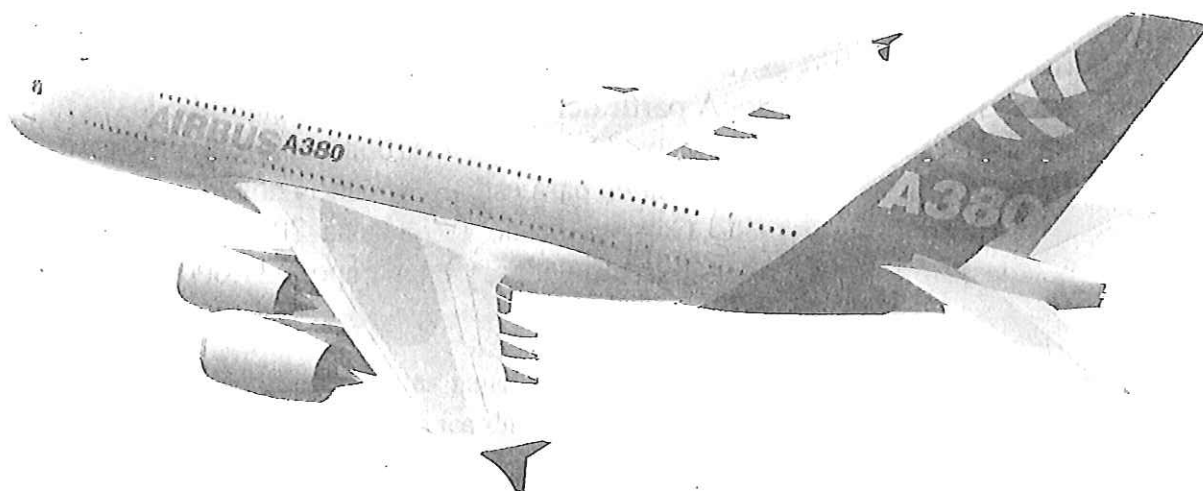
Otras propiedades que suelen requerirse a las fibras de altas prestaciones son valores altos de la conductividad térmica y resistividad eléctrica.

Las fibras, por sí solas, resisten bien las sollicitaciones de tracción y flexión, pero pandean cuando se someten a esfuerzos de compresión. Si el componente estructural ha de resistir esfuerzos de tracción y compresión, hace falta rellenar los huecos entre las fibras con un material capaz de transmitir y repartir las tensiones entre ellas; éste es el papel de la matriz. Las matrices, además, protegen a las delicadas fibras de las agresio-

nes ambientales. La simbiosis entre matriz y fibras se manifiesta muy claramente en la tenacidad de fractura; la capacidad que tiene un material para soportar fisuras cuando está sometido a esfuerzos. Los valores más altos de la tenacidad de fractura se han logrado en materiales compuestos reforzados con fibras.

La producción a gran escala de materiales compuestos reforzados con fibras comienza a finales de la década de los años 70 del pasado siglo cuando la marina inglesa inicia la fabricación de dragaminas de la clase *Hunt*. El requisito de estos barcos era que su casco no fuera magnetizable ni conductor de la corriente eléctrica. La madera, utilizada hasta entonces, no proporcionaba la resistencia necesaria frente a las explosiones y su mantenimiento resultaba oneroso. Los plásticos reforzados con fibras de vidrio ofrecieron una solución satisfactoria. En junio de 1978 se botó el primer dragaminas con casco de poliéster reforzado con fibras de vidrio tipo E. El barco tenía 60 m de eslora, 10 m de manga, desplazaba 625 toneladas y su vida estimada era de 60 años. Para su construcción se utilizaron 300 toneladas de poliéster reforzado con fibras. Casi simultáneamente, Dunlop Sports Com., sacaba al mercado raquetas de tenis de materiales poliméricos reforzados con fibras que eran tres veces más resistentes que las tradicionales de madera.

El despegue definitivo del sector de los materiales compuestos se debe a la industria aeroespacial, en la que prima la resistencia específica (por unidad de masa). El peso de la estructura puede reducirse si se consiguen materiales que tengan una mayor resistencia específica y una mayor rigidez específica. Esta reducción de peso en estructuras móviles se traduce en una mayor eficiencia, al ahorrar energía y costes. Los materiales compuestos con matriz polimérica (epoxi, poliéster...) y fibras de altas prestaciones (carbono, Kevlar...) cumplen estos requisitos y se han ganado un papel protagonista en la industria aeronáutica y del automóvil.



En el nuevo AIRBUS 380 tanto la caja central del ala como el fuselaje posterior están fabricados con materiales compuestos



Airbus comenzó a utilizar materiales compuestos (polímeros reforzados con fibras de carbono) en los años 70 para los estabilizadores verticales, en los años 80 los incorporó en los estabilizadores horizontales y en los años 90 en los mamparos de presión. En el nuevo Airbus A380 tanto la caja central del ala como el fuselaje posterior están fabricados con materiales compuestos. El nuevo modelo que fabricará Boeing, el B787, será el primero que tenga la mayoría de su estructura primaria hecha de material compuesto; las aleaciones de aluminio sólo participarán en un 20%. Un dato curioso, en un coche de fórmula-1 el 85% de estructura está fabricada con materiales compuestos, principalmente polímeros reforzados con fibras de carbono.

Frente a las ventajas que ofrecen los materiales compuestos, hay dos inconvenientes que frenan sus aplicaciones; el coste de las materias primas y la fabricación de las piezas, porque suelen tener un componente manual muy importante y generan tiempos de producción muy elevados. Aun así, se están abriendo camino en las industrias del automóvil, química y eléctrica. La industria del ocio, además de las raquetas, ofrece palos de golf, cañas de pescar, esquís, arcos, canoas, piscinas y un sin fin de objetos en los que el coste no es el factor decisivo en su adquisición.

En España, el grupo Aries, fundado en 1965 para la industria naval, crea en 1986 Aries Complex con el propósito de diseñar y fabricar materiales compuestos destinados, en su mayoría, al sector aeronáutico (tanto para estructuras primarias como secundarias) y espacial. Se trata de materiales compuestos que utilizan fibras de carbono (también de Kevlar y vidrio) embebidas en matrices de resina epoxi, poliéster o poliimida. La factoría instalada en Madrid está centrada en procesos con un componente manual importante, mientras que la filial de Valladolid está orientada hacia procesos automatizados; como el laminado (o encintado) automático (ATL). La facturación anual en materiales compuestos de Aries Complex es del orden de 30 millones de euros.

Gamesa es otra empresa española que fabrica materiales compuestos a partir de plásticos reforzados con fibras. Gamesa es el segundo fabricante mundial de aerogeneradores. Desde su creación en 1994 hasta el año 2007 Gamesa ha producido equipos por el equivalente a 13 GW de potencia instalada. Las primeras palas de aerogeneradores se fabricaron con matriz de poliéster y con impregnación manual. A medida que aumentaron los requerimientos estructurales de las palas se utilizaron preimpregnados con resina epoxi y fibra de vidrio. A partir del año 2000, para las palas de los aerogeneradores de 2 MW, empiezan a utilizarse las fibras de carbono con matrices de resina epoxi. Una idea del consumo de materiales para estos propósitos nos lo da el tonelaje de fibras y resina que ha utilizado Gamesa desde 1994 hasta 2007; fibra de vidrio 55.000 toneladas, fibra de carbono 9.000 toneladas, y resina epoxi 37.000 toneladas.

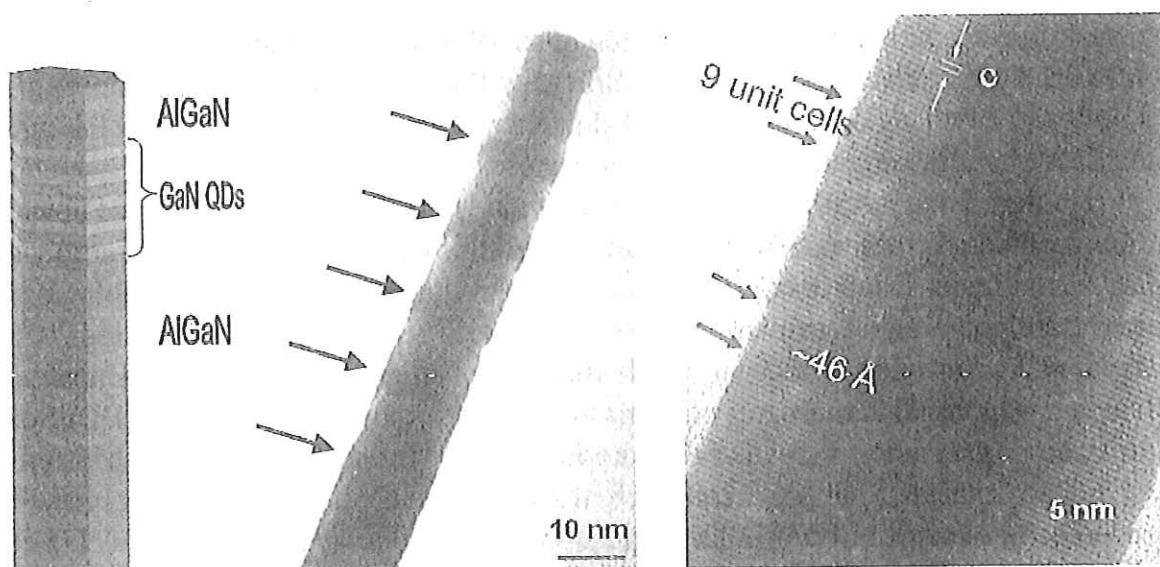
### 3. MATERIALES FUNCIONALES

Los materiales cuya función principal no es la resistente se suelen agrupar bajo el epígrafe de materiales *funcionales*. Por la propia definición —un tanto vaga— se trata de un grupo de materiales muy heterogéneo, pero dentro de él merecen destacarse los materiales destinados a la *industria electrónica* y los materiales relacionados con la *producción de energía*.

Los materiales utilizados en los dos campos mencionados han tenido un cierto protagonismo en la industria española durante los últimos treinta años y, por ello, debemos dedicarles una cierta atención: En la industria electrónica, el material más representativo ha sido el *silicio*. En la producción de energía, las células solares de *silicio* continúan dando relevancia a este material. Al no ser España un país productor de petróleo ni ser rentable la producción de carbón se ha prescindido de estos materiales en este apartado, aunque se ha considerado el *uranio* porque este material y su tecnología asociada han tenido un papel importante en el último cuarto de siglo.

Otros materiales muy significativos han quedado fuera de este apartado; en unos casos por falta de espacio —como los *catalizadores*— y en otros porque la actividad en I+D todavía se realiza, en buena parte, en universidades y centros de investigación como sucede, por ejemplo, con los materiales *superconductores* o con los *cris-tales líquidos*.

Otro grupo de materiales funcionales llamados, a veces, *materiales inteligentes* tampoco se incluyen en este apartado por las mismas razones anteriormente apuntadas. En realidad, se trata de materiales que responden a determinados estímulos; las ventanas inteligentes lo son porque sus vidrios son capaces de regular la transmisión de luz en función de la temperatura de la habitación, —se dificulta la entrada de la luz si un incremento de la temperatura obliga a poner en funcionamiento el sistema de refrigeración y, de esta forma, se ahorra energía—. Los materiales inteligentes, asociados a sensores y actuadores miniaturizados, están destinados a tener un futuro brillante.



Crecimiento de hetero-estructuras nano-columnares de nitruros del grupo III por epitaxia de haces moleculares. Se observan cinco discos cuánticos de GaN embebidos en una nanocolumna de AlGaIn. Asimismo, se observan interfases muy abruptas y las paredes atómicamente planas de la nano-estructura. (Cortesía del I.S.O.M.)

### 3.1. *Materiales para la industria electrónica*

El diseño de materiales *a medida* es el objetivo final de la Ciencia de Materiales. En el campo de la electrónica, la ingeniería de bandas (*band gap engineering*) nos ofrece un ejemplo de esta filosofía al permitir diseñar un material con una anchura de banda predeterminada; las super-redes son estructuras periódicas formadas por muchos pozos cuánticos separados por barreras. Variando la anchura de los pozos o la altura de las barreras, o graduando la cantidad de impurezas en los pozos (modulación de dopaje), se pueden conseguir dispositivos que respondan con más rapidez, modificar la masa efectiva de los portadores de carga, o emitir radiación de una determinada longitud de onda. En una palabra, fabricar materiales electrónicos y optoelectrónicos «a medida» (P. Harrison, 2000).

#### 3.1.1. «Materiales semiconductores»

Desde los años 70, el material electrónico por excelencia en España ha sido el *silicio* por su enorme trascendencia y aplicaciones revolucionarias en el ámbito de los Circuitos Integrados (IC) y en la energía solar fotovoltaica. Si bien, en España no se ha seguido una línea de producción de circuitos integrados, salvo intentos con duración limitada (ATT-Lucent Technologies, Piher Electrónica), otras áreas como la energía solar fotovoltaica o el «Smart Power Design» han arraigado con fuerza. Ejemplos históricos de empresas empeñadas en la producción de dispositivos electrónicos y optoelectrónicos, que iniciaron su andadura en los años 70, son Fagor-Electrotecnia, Tecosa y Femsa en dispositivos rectificadores de Silicio, y Piher en transistores y diodos emisores de luz (LED) de GaAsP, siendo este el primer caso de utilización comercial en España de materiales semiconductores compuestos.

En la década de los 80, muchas de las actividades empresariales citadas se abandonaron por diversos motivos; desde la falta de mercados y competitividad, a la imposibilidad de mantener las necesarias, crecientes y elevadas inversiones en tecnología. En todo caso, el material electrónico básico siguió siendo el *silicio*. A finales de los 90, por motivos de reconversión y decisiones de multinacionales, la empresa ATT-Lucent desaparece y sus instalaciones son ocupadas en 2002 por British Petroleum (BP) Solar, afianzándose más aún la actividad en materia de energía solar fotovoltaica basada en silicio. Cabe destacar, también, el trabajo realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada (CIDA) en la fabricación y desarrollo de materiales IV-VI (SePb, TePb) para dispositivos detectores en IR durante más de 15 años.

De este modo se llega a las fechas actuales en las que el *silicio* sigue siendo el material dominante, aunque se abren perspectivas de utilización de semiconductores compuestos (arseniuros) y en particular los nitruros del grupo III muy prometedores en aspectos tales como la generación de luz blanca. Estos materiales sustituirán a los actuales tubos fluorescentes, por tener un mejor rendimiento y vida media. Estos esfuerzos se llevan acabo, de momento, en foros académicos de investigación.



Además de la investigación desarrollada en las empresas citadas anteriormente y en el CIDA, en España existen diferentes grupos de investigación ligados a Universidades y Centros Tecnológicos dedicados al crecimiento de materiales semiconductores y su utilización en dispositivos de nueva generación. Las áreas de aplicación de estos nuevos materiales, en general compuestos, es muy amplia y abarca la generación de luz blanca eficiente (nitruros-III), la optimización de células solares con multiunión en cascada (arseniuros, II-VI y IV-VI), la fabricación de transistores de potencia para telefonía móvil y aplicaciones militares (nitruros-III), el desarrollo de sistemas eficientes (temperatura ambiente) de visión nocturna (arseniuros, antimoniuros, nitruros diluidos), detectores de radiación ultra violeta (nitruros-III), emisores láser para almacenamiento de información (nitruros-III) y un largo etcétera. Como se ha indicado, estas actividades recaen fundamentalmente en Institutos de Investigación, generalmente ligados a las Universidades (ISOM, IES), CSIC, y Centros Tecnológicos. (Una revisión de las propiedades de los materiales semiconductores puede consultarse en el libro de P. Y. Yu y M. Cardona, 1996).

### 3.1.2. «Materiales fotónicos»

La red de comunicaciones actual —las autopistas de la información— soportan un tráfico en continuo aumento; millones de mensajes deben circular por sus arterias sin interferirse y deben viajar distancias enormes sin deteriorarse. Las redes, como Internet, crecen continuamente y, por si fuera poco, la avalancha de datos de vídeo digital (que requiere una capacidad de transmisión de datos alrededor de quinientas veces más que una llamada telefónica) pone en peligro su estabilidad. En 1970, la industria electrónica podía satisfacer la demanda de las comunicaciones a grandes distancias. En la actualidad, la transmisión de la información por medios electrónicos está llegando al límite de sus capacidades y necesitará una nueva tecnología basada en nuevos materiales (V. V. Mitin y otros, 1999). La fotónica ya existe, pero en una forma comparable a la electrónica de los primeros años. En la fotónica la corriente de electrones está reemplazada por luz; en vez de electrones que discurren por un hilo de cobre, la información la acarrearán los fotones —las «partículas» de luz— que circulan por fibras de un vidrio especial o de un plástico. Estos cables pueden transmitir miles de veces más información que los cables eléctricos con un consumo de potencia mucho menor. La próxima revolución en las tecnologías de la información prescindirá de los transistores convencionales y usará la luz para transportar y amplificar la información. Este cambio será posible gracias al desarrollo de *materiales fotónicos* que producirán, guiarán, detectarán y procesarán la luz.

Los primeros diodos electroluminiscentes (LED) datan de 1961 y los diodos láser de 1962. La base de estos dispositivos reside en los semiconductores con banda prohibida de carácter directo, como el arseniuro de galio, el fosfuro de indio, o el nitruro de galio. La primera aplicación comercial de los LED fue en las pantallas de relojes, calculadoras e instrumentos científicos. En la actualidad se utilizan hasta en pantallas gigantes. La producción anual de LED inorgánicos en el mundo es de 50.000 millones de unidades, con un valor estimado de unos 5.000 millones de euros. La mitad de ellos se destinan a la iluminación. Su principal ventaja frente a las fuentes de luz convenciona-

les es su alto rendimiento y larga vida. Los diodos láser son componentes esenciales en las comunicaciones por fibra óptica y en los dispositivos de lectura de discos, como los CD y DVD. Recientemente se han incorporado al mercado los diodos láser de nitruro de galio que permiten almacenar más información en un disco óptico, al trabajar con una longitud de onda más corta (azul, en vez del rojo del arseniuro de galio).

### 3.1.3. «Materiales magnéticos»

El desarrollo de las tecnologías de la información está produciendo tal cantidad de datos que a duras penas podemos almacenarlos; cada vez hacen falta memorias con más capacidad y más pequeñas. Estas demandas están forzando a las memorias basadas en *materiales magnéticos* hacia los límites de sus posibilidades y estimulan la introducción de nuevos materiales que se apoyen en la optrónica o en la espintrónica (D. C. Jiles, 2003). Las tecnologías de la comunicación han creado demandas sin precedentes en la capacidad de las redes, pero este acontecimiento no es comparable con lo que se avecina con las demandas en la capacidad de almacenamiento. Algunos de los proyectos más ambiciosos de la humanidad, como desentrañar el código genético de los humanos y otras especies, analizar los datos que proporcionará el nuevo acelerador de partículas del CERN, los intentos de simular el origen y evolución de las galaxias o el aparentemente más humilde deseo de simular la deformación plástica y fractura de un pequeño trozo de metal, se enfrentan con limitaciones, no sólo de velocidad de transmisión de datos sino también con problemas de capacidad para almacenar la información generada.

El crecimiento de la capacidad de almacenar datos ha sido espectacular durante los últimos cincuenta años. En 1956, la capacidad de un disco magnético era alrededor de 300 bits por  $\text{cm}^2$  y el coste de almacenar un MB alrededor de 1.500 euros. En 2003, la capacidad creció hasta 10.000 millones de bits por  $\text{cm}^2$  y el coste del MB se abarató por debajo de la mitad del céntimo de euro. Estas cifras se deben, en gran parte, al desarrollo de nuevos materiales para las cabezas lectoras de los discos. El Premio Nobel de Física de 2007 se concedió a Peter Grünberg y a Albert Fert por el descubrimiento (en 1998) de la magnetorresistencia gigante, un efecto que ha permitido reducir drásticamente el tamaño de los dispositivos de almacenamiento magnético. Las primitivas cabezas lectoras contenían materiales magnéticos ensamblados manualmente. Las actuales están compuestas por capas metálicas, aislantes, ferromagnéticas y antiferromagnéticas, fabricadas utilizando la tecnología planar de los semiconductores. Estos sensores representan el comienzo de una nueva tecnología, llamada *espintrónica*, donde el espín —y no la carga eléctrica— es el elemento unitario (bit) capaz de almacenar la información digital.

### 3.2. *Materiales para la producción de energía*

El nexo entre los materiales y la producción de energía es indudable. Al abaratar los costos, los materiales pueden hacer comercialmente viable un proceso de producción de energía; por ejemplo, la energía fotovoltaica. Pero el papel de los materiales en este

sector puede ser más trascendental, pueden *frenar* o *impedir* el desarrollo de algunas fuentes de energía —la obtenida por fisión o fusión nuclear— al no disponer de los materiales idóneos. La industria nuclear podría ser una solución más atractiva si se hubieran resuelto algunos problemas relacionados con los materiales; como la corrosión bajo tensión y la fragilización por la radiación. Las fuentes energéticas alternativas que propugnan los ecologistas también ven su éxito comprometido al no saber diseñar materiales más eficientes y más baratos. La Ciencia e Ingeniería de los Materiales tiene, y tendrá, un gran protagonismo en el campo de la energía.

Es muy probable que se avecine una crisis energética porque las necesidades mundiales de energía irán en aumento en los próximos años. Paradójicamente, disponemos de una fuente casi inagotable que no sabemos aprovechar bien. Recibimos alrededor de diez mil veces más energía de la que consumimos diariamente, por lo que no se trata de un problema de *recursos* sino de *conversión*; no sabemos convertir de forma eficiente esta energía que nos regala el Sol, la estrella de nuestro sistema planetario.

La búsqueda de materiales para la energía se ha dirigido hacia el interior de la Tierra en vez de mirar hacia el Sol, rastreando combustibles fósiles donde, desde hace millones de años, se ha concentrado la luz solar o extrayendo uranio para que el calor liberado por la fisión nuclear mueva las turbinas de vapor. La ventaja de estos materiales es la relativa facilidad con que se pueden conseguir y utilizar, pero no debe olvidarse que las reservas de carbón, petróleo o gas, que tardaron millones de años en formarse, se pueden agotar en unas cuantas generaciones.

Los combustibles fósiles tienen el inconveniente de la contaminación atmosférica y contribuir al aumento del dióxido de carbono en la atmósfera. Los combustibles nucleares tienen otros inconvenientes, el almacenamiento de los residuos radioactivos es uno de ellos. Esta situación obliga a buscar materiales que permitan obtener energía limpia; las células solares y las células de combustible son dos caminos prometedores. En esta dirección se han hecho progresos en I+D en España durante las últimas décadas. De nuevo, por limitaciones de espacio, sólo se hace referencia a los materiales utilizados en células solares y a los materiales para combustible nuclear.

### 3.2.1. «Materiales para células solares»

El sol nos proporciona energía por tierra, mar y aire. Las plantas verdes tienen sus propias células solares, llamadas cloroplastos, que transforman la energía solar en energía química, que se almacena en forma de carbohidratos. Estas células solares no son muy eficientes —transforman menos del 1% de la luz que incide sobre ellas— pero, dada la abundancia de la energía solar, esto no es un problema serio. La radiación solar influye en la circulación de las masas de agua fría y caliente en los mares y océanos, y en el movimiento de las masas de aire frío y caliente en nuestros cielos. Esta energía, al estar diluida, puede pasar desapercibida pero utilizándola de forma eficiente podría paliar gran parte de nuestras necesidades.

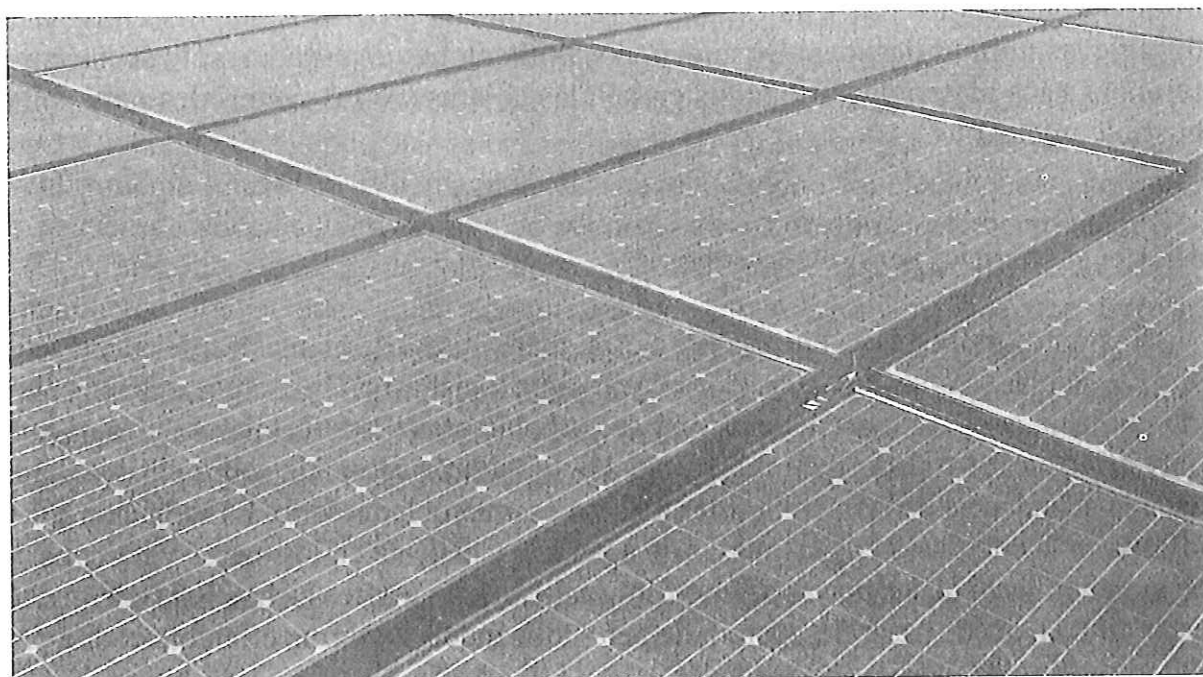
La forma más simple de utilizar la energía solar es atraparla directamente; mediante espejos que la concentran en hornos solares o bien a través de colectores que calien-



tan el agua para usos domésticos. Otra forma, muy interesante, es transformarla directamente en energía eléctrica. Esta tecnología ha experimentado un gran crecimiento en las últimas tres décadas gracias al desarrollo de nuevos materiales y técnicas de procesamiento que han permitido que las células solares pasaran de ser unos artefactos caros, poco eficientes y para usos muy específicos (la industria aeroespacial, por ejemplo) a ser unos dispositivos de uso cotidiano en los parquímetros o en las calculadoras de bolsillo (E. Cartlidge, 2007). En la actualidad, ya están operativas plantas importantes que generan energía basada en células solares y pequeños sistemas urbanos que suministran energía a la red eléctrica.

Los materiales utilizados para fabricar las células solares que se basan en el efecto fotovoltaico son semiconductores y, entre ellos, el más destacado es el *silicio*. Hay varios motivos para ello; el primero es la abundancia de la materia prima y el segundo —hasta hace poco tiempo— es que podía apoyarse en los métodos sofisticados de producción desarrollados por la industria de la microelectrónica y hasta podía beneficiarse de los subproductos generados por ella, ya que no necesitaba silicio de tanta pureza, con un 98% le era suficiente. Desde un punto de vista más básico, el silicio ofrece la capacidad para absorber la energía solar en la región del espectro donde ésta es más intensa; desde el infrarrojo próximo (alrededor de 1200 nm) hasta el violeta (alrededor de 350 nm).

Las primeras células fotovoltaicas de silicio se fabricaron en 1954, en los laboratorios Bell, y tenían un rendimiento del 6%. Desde entonces el rendimiento ha aumentado hasta el 24% para el silicio policristalino, valor que ya está muy cerca del límite teórico para este material, que es del 30%. Uno de los obstáculos encontrados con las células de silicio cristalino es que para que se genere un par electrón-hueco cuando se absorbe un fotón, no basta con que el fotón posea la energía necesaria (el ancho entre las ban-



Los materiales utilizados para fabricar células solares que se basan en el efecto fotovoltaico son semiconductores y, entre ellos, el más destacado es el silicio

das de valencia y conducción, el *gap* en términos coloquiales) sino que, además, debe alterarse adecuadamente el momento del electrón fotoexcitado (lo que se conoce como conservación del momento en una *transición indirecta* entre las bandas de valencia y conducción). Los fotones pueden generar electrones de mayor energía, pero no modificar sustancialmente su momento, éste debe modificarse por interacción con las vibraciones de la red cristalina (fonones). La intervención de estos dos procesos hace la transición más improbable que si fuera una transición directa. Para aumentar esta probabilidad se recurre a aumentar el espesor de la heterounión —del orden de la décima de milímetro— con el consiguiente aumento de material y precio.

Una solución prometedora para abaratar el coste de las células solares de silicio es utilizar como material base silicio amorfo. La variedad que es interesante es la que contiene hidrógeno (a.Si:H). La característica esencial de este material para la tecnología fotovoltaica es que se comporta como un semiconductor que permitiera una transición directa, es decir; los electrones pueden absorber la energía de los fotones sin necesidad de que, simultáneamente, cambien su momento. Esto significa que la absorción es mucho más rápida y, en vez de utilizar obleas de silicio de décimas de milímetro, se pueden usar películas (filmes) cien veces más delgadas; del orden de una micra o menos. El resultado es un abaratamiento del producto; se consume mucho menos material y se pueden utilizar técnicas de fabricación más económicas, como los haces de iones o la deposición química en fase vapor. La eficiencia de estas células, en general, es menor que la de las cristalinas y suele estar alrededor del 12%. Desde 1980, las técnicas de deposición química en fase vapor han permitido fabricar aleaciones de silicio amorfo en las que se puede optimizar la absorción de fotones de una determinada longitud de onda. Con estos materiales se pueden fabricar células solares con características espectrales diferentes y apilándolas convenientemente sacar el máximo rendimiento a la radiación solar. En 1990, un avión alimentado con células solares de silicio amorfo cruzó el cielo de los Estados Unidos, desde San Diego, en California, hasta Kitty Hawk, en Carolina del Norte, un vuelo que, al contrario del de Ícaro, fue posible gracias al sol.

Al silicio le salen rivales continuamente pero, hasta ahora, no pueden competir en precio con él: Ya en 1974, un grupo en ATT Bell Laboratories presentó células solares basadas en  $\text{CuInSe}_2$  cristalino, que funcionan por transición directa y con una eficacia del 12%, llegando al 18% en pruebas de laboratorio. Otro material en liza es el  $\text{CdTe}$ , también de transición directa, que en pruebas de laboratorio ha llegado a eficacias del 16% y en células comerciales el 8%. Con  $\text{GaAs}$  y otros semiconductores del grupo III-V, que también funcionan por transición directa y además se pueden fabricar en capas delgadas, se han alcanzado rendimientos del 30%.

Los semiconductores orgánicos amenazan a los dispositivos comentados anteriormente porque pueden ser más baratos. En comparación con el silicio poseen coeficientes de absorción óptica más elevados, lo que permite fabricar células solares más finas y su flexibilidad permitirá utilizar técnicas de fabricación más convencionales. En cualquier caso, el objetivo que debe perseguirse con las células solares de cualquier tipo no es aumentar su rendimiento, que tiene unos límites, sino conseguir igualar el coste de la energía producida con el de la energía convencional. Si, además, se tiene en cuenta el beneficio de la producción de energía limpia, difícil de cuantificar, mucho mejor.

En España la producción de silicio para células solares ha arraigado con fuerza, siendo ejemplos de esta actividad el Instituto de Energía Solar de la UPM, la empresa pionera en paneles solares Isofotón, y el Centro Nacional de Microelectrónica en Barcelona.

En la región mediterránea se podrían producir 90 millones de kWh anuales por km<sup>2</sup> de superficie cubierta de células fotovoltaicas y antes del año 2010, con los rendimientos previstos, se alcanzarán los 150 millones de kWh por km<sup>2</sup>.

El objetivo del Gobierno era tener instalados 143,7 MWp (megavatios pico) en el año 2010, de ellos 135 MWp nuevos, de los que 61 MWp deberían instalarse antes de 2006 (el 15% en instalaciones aisladas y el 85% en instalaciones conectadas a la red). Entre 1998 y 2001 se instalaron en España sólo 6,9 MWp, mientras en Alemania tenían 87,5 MWp. Incluso los Países Bajos, con poco sol y superficie, tenía más potencia instalada (12,2 MWp). El precio del kWh fotovoltaico, con las primas, asciende a 0,397 euros (máximo) y a 0,217 euros (mínimo), frente a 0,72 y 0,35 en Austria, 0,48 en Alemania y 0,39 y 0,23 en Portugal. En España se fabricaron 50,85 MWp de células fotovoltaicas en 2002 (el 36% de la producción europea), destinados en casi un 90% a la exportación. Los dos mayores fabricantes son Isofotón y BP Solar, aunque en el sector operan 182 empresas que emplean a más de 4.000 personas. Los precios de los módulos fotovoltaicos se han reducido mucho, desde 7,76 euros/Wp en 1990 a 3,3 euros/Wp en 2000. En España, con una radiación solar diaria superior en casi todo el territorio a 4 kWh por m<sup>2</sup>, el potencial es grande. Sólo en los tejados de las viviendas españolas se podrían producir anualmente 180 TWh. En el mundo, según el informe *Solar Generation* de la Asociación de la Industria Fotovoltaica Europea y Greenpeace, se debería llegar a 276 TWh en el año 2020, con unas inversiones anuales de 75.000 millones de euros.

BP Solar ha anunciado recientemente sus planes para comenzar la construcción de dos megaplantas de células, una de ellas en su sede europea en Tres Cantos, Madrid. Con la primera fase del plan de expansión en Madrid se aumentará la capacidad anual de 55 MW a aproximadamente 300 MW. Esta nueva línea de producción de células solares fotovoltaicas va a utilizar una tecnología de vanguardia para serigrafía (*screen print*), tecnología que, en su mayor parte, es propiedad de BP Solar. Asimismo, la completa automatización del manejo de las obleas va a permitir el empleo de las obleas más finas del sector, garantizando al mismo tiempo la mayor calidad posible. Con intención de ser operativa antes de verano de 2007, esta planta es una de las mayores instalaciones de Europa.

Isofotón comenzó la construcción de su nueva fábrica en el año 2003 en el Parque Tecnológico de Andalucía, adelantándose con este proyecto al desarrollo y crecimiento de un sector emergente como el de la energía solar. El objetivo de las instalaciones es multiplicar la capacidad productiva para hacer frente a la demanda actual y futura del mercado y, a la vez, reafirmar el liderazgo nacional y la competitividad en los mercados internacionales de la empresa. La nueva fábrica —claro ejemplo del compromiso de Isofotón con el desarrollo económico, empresarial y tecnológico español— empezó a funcionar durante el 2005, si bien no ha estado plenamente operativa hasta el verano de 2006, en que se instalaron las nuevas líneas automáticas del proceso de producción de energía solar térmica. Veinticinco años después de su inicio Isofotón es una empresa im-



plantada en más de 50 países, a los que exporta el 80% de su producción, siendo la novena empresa en el *ranking* mundial de fabricantes del sector, y la segunda en el ámbito europeo.

### 3.2.2. «Materiales para reactores nucleares»

Los materiales utilizados para la producción de energía en las centrales nucleares son el uranio y el torio, presentes en la naturaleza, y el plutonio que se produce en reactores nucleares mediante reacciones de captura de neutrones con el uranio.

El uranio en su estado natural es una mezcla de tres isótopos; el uranio 235 ( $^{235}\text{U}$ ), con una proporción del 0,71%, el uranio 234 ( $^{234}\text{U}$ ) con una proporción del 0,0055% y el resto es uranio 238 ( $^{238}\text{U}$ ). Es relativamente abundante en la naturaleza, unas 800 veces más que el oro, 40 más que la plata y tanto como el plomo. El torio ( $^{232}\text{Th}$ ) es tres o cuatro veces más abundante que el uranio pero al no ser fisiónable su empleo en reactores nucleares es semejante al del uranio 238. El plutonio no se encuentra en la naturaleza porque sus isótopos tienen vidas medias inferiores a la edad de la Tierra.

Estos materiales se utilizan para producir energía mediante reacciones nucleares de fisión. El uso del término combustible nuclear es un término ya establecido pero es un abuso del lenguaje porque, en un reactor nuclear, la reacción energética es una fisión y no una combustión. La obtención, procesado y fabricación de elementos de combustible es una tecnología que ha tenido un desarrollo importante en España durante las tres últimas décadas y, por lo tanto, merece que se le dedique a este material una atención especial.

Los minerales de uranio son numerosos, pues se conocen alrededor de 150. Pueden encontrarse en forma primaria (pechblenda y uraninita), en forma de óxidos, o combinados con otros elementos. Los yacimientos de uranio están situados en zonas muy localizadas de la Tierra; las mayores reservas están en Australia, Kazajstán y Canadá. En Europa los mayores yacimientos están en Francia y, después, en España. Los recursos mundiales de uranio se estiman entre 2 y 3,3 millones de toneladas. En 2004, la producción de concentrados en el mundo se estimó en 47.510 toneladas de  $\text{U}_3\text{O}_8$ . España, hasta 2002, produjo 7.216 toneladas de  $\text{U}_3\text{O}_8$ .

En el proceso de fabricación del combustible se produce un *concentrado* con contenidos superiores al 70% de  $\text{U}_3\text{O}_8$ , conocido como «torta amarilla», por su color. El material puede sufrir otro proceso, el del *enriquecimiento*, que consiste en aumentar la proporción de átomos de  $^{235}\text{U}$ , pasando de un 0,71% a un valor superior al 1%. Cuando se aumenta el contenido de  $^{235}\text{U}$  en un reactor térmico, la energía que se obtiene por tonelada de uranio es mayor que cuando se usa uranio natural. Además, para la misma potencia térmica, el tamaño del núcleo del reactor es menor en un reactor con uranio enriquecido que en uno con uranio natural. Todo ello hace que los reactores con uranio enriquecido sean más económicos y que el coste del kWh en ellos sea menor.

El tipo de material utilizado en los diversos reactores figura en el Cuadro 1.1.

La separación de los isótopos U-238 y U-235 es muy compleja debido a las masas tan similares que poseen; se han desarrollado varios métodos, algunos de los cuales se han usado desde hace casi cuarenta años, y otros son de reciente creación. Todos tienen

CUADRO 1.1.—*Material utilizado en los diferentes reactores*

Reactor de grafito-gas (GCR)	uranio natural
Reactor avanzado de gas (AGR)	uranio ligeramente enriquecido ( $\approx 1\%$ )
Reactor agua pesada (HWR)	uranio natural o enriquecido ( $1 \div 2\%$ )
Reactor agua ligera (LWR)	uranio enriquecido ( $1 \div 3\%$ )
Reactor rápido (FBR)	uranio enriquecido (muy enriquecido)
Reactor investigación	uranio enriquecido ( $< 20\%$ )

en común que emplean el único compuesto gaseoso estable a temperatura cercana a la ambiente: Hexafluoruro de uranio,  $\text{UF}_6$ .

La fabricación de elementos combustibles depende del tipo de reactor para el que vayan a ser usados: Para reactores de agua que emplean uranio enriquecido, el primer paso es transformar el  $\text{UF}_6$  en polvo de óxido de uranio ( $\text{UO}_2$ ), después se fabrican pastillas por sinterización y, finalmente, se monta la barra de combustible apilando las pastillas en tubos de zircaloy (aleación con base de circonio). En los reactores de grafito-gas el combustible es uranio metálico aleado con otros componentes en pequeñas proporciones, embutido en una vaina de magnox (aleación con base de magnesio). Merecen citarse aquí los estudios realizados en la Junta de Energía Nuclear (JEN) sobre la preparación de pastillas de óxido de uranio y de carburo de uranio y, en colaboración con Westinghouse, las investigaciones en una celda caliente sobre el comportamiento de elementos combustibles sometidos a altas dosis de irradiación.

Como ya se ha indicado, la tecnología asociada al uranio ha tenido un cierto protagonismo en España en la última mitad de siglo xx y sus hitos relacionados con el material merecen ser citados. En 1972 se creó la Empresa Nacional del Uranio S. A. (Enusa) con objeto de explotar los yacimientos de uranio de la zona de Salamanca. En noviembre del siguiente año, un acuerdo del Consejo de Ministros encomendó a Enusa el conjunto de actividades industriales y de aprovisionamiento del ciclo del combustible, desde la prospección minera hasta el tratamiento de los combustibles irradiados y el almacenamiento de los residuos radiactivos, incluida la gestión y adquisición en el extranjero de materiales fisiónables o de servicios de enriquecimiento y fabricación. Posteriormente, en 1984 se creó la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S. A. (Enresa) a la que le encomendaron las actividades ligadas a la parte final del ciclo del combustible, por lo que las actividades de Enusa han quedado limitadas sólo a la primera parte de dicho ciclo.

Por lo que se refiere a la obtención de *concentrados* de uranio, la Junta de Energía Nuclear (JEN) construyó una fábrica de concentrados en Andújar (Jaén) y desde 1976 Enusa explotó en Saelices el Chico (Salamanca) una planta de concentrados, proyectada y construida con tecnología de la JEN, donde el mineral se trataba mediante lixiviación estática. Su producción aumentó desde 127 t de  $\text{U}_3\text{O}_8$  en 1976 hasta 220 t de  $\text{U}_3\text{O}_8$

en 1986. En la zona de Don Benito (Badajoz) construyó otra planta experimental, la «Lobo G» que también fue explotada por ENUSA. Su producción era de 30 t anuales de  $U_3O_8$ . Puesto que la producción española era insuficiente para atender las necesidades de nuestras centrales, ENUSA firmó en el pasado diversos contratos de suministro a largo plazo con diversos países productores de uranio. Además de ello tomó una participación del 10% en la Compagnie Minière d'Akouta (Cominak), en Níger.

En lo referente a los servicios de *enriquecimiento*, España consideró que eran excesivos el esfuerzo y el coste que requeriría el desarrollo de una tecnología propia. Por ello, durante un primer período, España recurrió al arriendo en los Estados Unidos del material enriquecido, ya que ésta era la única fórmula viable por aquel entonces. Posteriormente, Enusa firmó también contratos de enriquecimiento con Techsnabexport, de la Unión Soviética. Al crearse la multinacional europea Eurodif, que en 1979 puso en marcha sus instalaciones de Tricastin (Francia), Enusa participó con el 11% en el capital de la empresa.

Los *elementos combustibles* de las primeras centrales nucleares españolas se adquirieron en el extranjero; aun así la JEN fabricó los elementos combustibles del reactor de investigación de la Moncloa, en Madrid, y reprocesó dos de las cargas del reactor. ENUSA, poco después de fundarse, firmó con los suministradores americanos de las calderas nucleares españolas (Westinghouse, para reactores PWR, y General Electric, para reactores BWR) unos acuerdos de licencia para fabricar los correspondientes elementos combustibles, e inició la construcción de una fábrica en Juzbado (Salamanca). Aunque inicialmente se proyectó que la fábrica tendría una capacidad de producción de 700 toneladas anuales, su capacidad actual es sólo de 200 Tmaño, lo que está adaptado a las presentes necesidades españolas. Esta reducción en la capacidad ha hecho imposible, por falta de rentabilidad, que la conversión de hexafluoruro a óxido de uranio se realice en la fábrica, como se había pensado inicialmente. La fábrica empezó a servir las necesidades del mercado en el año 1985 (Enusa, 2002).

En 1995 se pone en marcha en la Fábrica de Juzbado la nueva línea de producción de barras de gadolinio y en 1996 Enusa y General Electric Nuclear Energy crean la compañía GE Enusa Nuclear Fuel, S. A. (Genusa) con el fin de operar en el mercado europeo el suministro de combustible nuclear del tipo BWR. En 2006 Enusa diseña, entrega y licencia sus primeros elementos de demostración de alto quemado.

En la fábrica de Juzbado, durante el año 2006, se han producido un total de 920 elementos combustibles, con una fabricación de 258,4 toneladas de uranio (169,6 toneladas para recargas PWR y 88,8 toneladas para recargas BWR). Desde que la fábrica entró en operación en el año 1985, se han producido 4.120 toneladas de uranio como elementos combustibles (Foro Nuclear, 2006).

#### 4. MATERIALES DE O PARA SERES VIVOS

Los materiales también tienen un gran protagonismo en la *Ciencia de la Salud*, un aspecto no tan conocido y poco valorado. Gracias al diseño de materiales muy específicos se han podido desarrollar técnicas de auscultación no invasivas e indoloras, administrar potentes fármacos con un riesgo mínimo, y realizar trasplantes no imaginables. La tomografía por emisión de positrones, capaz de medir simultáneamente en más de



60 secciones transversales con una resolución de 3 mm, debe parte de su éxito al tubo fotomultiplicador fabricado con unos materiales que poseen una extraordinaria sensibilidad para detectar la luz. Otros materiales harán realidad la tomografía acústica eliminando, por ejemplo, las molestas colonoscopias. La seguridad y eficacia de un fármaco se puede mejorar si se encapsula y se libera en el sitio adecuado. Para llevar a cabo esta estrategia deben diseñarse materiales capaces de transportar la droga y descargarla al llegar al blanco; disolviéndose, hinchándose para que se difunda, o degradándose. Los materiales para implantes que se han utilizado hasta hace poco eran materiales inertes. Desde hace unos años se diseñan materiales que son bioactivos, que cooperan con los tejidos vivos, que no los ignoran. El objetivo final es conseguir que crezcan —no que se transplanten— los nuevos órganos, gracias a un feliz maridaje entre la Biología Molecular y la Ciencia de los Materiales (M. Elices, 1999).

Los términos *biomaterial* y *material biológico* deberían ser sinónimos. Aparentemente, la posición del término *bio* —delante o detrás de la palabra *material*— no debería afectar al significado, pero los miembros de la Sociedad Europea de Biomateriales decidieron, en septiembre de 1991, reservar la palabra biomaterial exclusivamente para aquellos «materiales utilizados para evaluar, tratar, corregir o reemplazar cualquier tejido, órgano o función en el cuerpo humano». El término material biológico se sigue utilizando para cualquier material que proceda de un ser vivo.

#### 4.1. *Materiales biológicos*

Los materiales biológicos son el resultado de un largo proceso evolutivo y nos muestran las historias que han tenido un final feliz después de 3.500 millones de años de investigación y desarrollo por parte de nuestro planeta. En este tiempo la naturaleza ha conseguido materiales con propiedades extraordinarias y ha desarrollado técnicas sofisticadas de fabricación, más allá de lo que es capaz la actual tecnología.

La humanidad lleva muchos años beneficiándose de estos materiales. La madera debió utilizarse en las mismas épocas en que los humanos empezaron a tallar las piedras, pero al ser perecedera no le ha prestado su nombre a ninguna de sus edades. Los huesos, sin duda, también se usaron en una edad temprana como instrumentos y como componentes estructurales (los colmillos del mamut, por ejemplo). El progreso tecnológico no se ha asociado a los materiales biológicos de la misma forma que a los materiales inorgánicos, quizá por la relativa facilidad de su obtención y procesado; millones de años de evolución se han encargado de ello. Pero conviene no olvidar que debemos mejorar el hierro si queremos transformarlo en acero, y que a la madera pocas mejoras hemos de hacerle.

La característica más atractiva de los materiales biológicos es, posiblemente, su potencial para servir de modelo para el diseño de futuros materiales. Son una fuente de ideas si somos capaces de interpretar cómo la naturaleza se las ha ingeniado para resolver sus problemas. Dos ejemplos pueden bastar para ilustrar brevemente estas ideas; las fibras de altas prestaciones, inspiradas en las fibras de seda y las cerámicas tenaces inspiradas en las conchas de los moluscos. Este apartado se cierra con una mención a la madera y al humilde corcho, del que España es uno de los principales productores mundiales.

El interés por los hilos de seda de las arañas, o de los gusanos de seda (la industria textil consume, cada año, 400.000 toneladas de capullos de gusano de seda), no radica solamente en sus excelentes propiedades mecánicas, sino en su potencial como modelos para diseño de materiales de altas prestaciones. Es muy probable que la aparición del nilón, en los años 30, se debiera a un intento de «copiar» los enlaces peptídicos de las proteínas de la seda, aunque la historia nos dice que fue un descubrimiento casual. Las fibras de Kevlar, aparecidas a finales de los 60, también están basadas en un polímero con uniones peptídicas, pero con monómeros mucho más rígidos.

Las técnicas convencionales de la ingeniería química, con las que se fabrican las sedas artificiales, permiten un buen control de las estructuras primarias y secundarias de los polímeros. Las técnicas de biosíntesis que usan las arañas y los gusanos de seda van más allá —además de controlar la secuencia, composición, y conformado de los biopolímeros— permiten realizar estructuras complejas mediante un proceso continuo que va desde la síntesis del polímero hasta el auto-ensamblaje.

Durante el hilado natural se consigue un buen alineamiento de los polímeros, proceso difícil de conseguir industrialmente —el gran éxito de las fibras de polietileno de altas prestaciones se alcanzó cuando se supo mejorar la alineación de las cadenas—. No basta con copiar la composición del material, las técnicas de procesado también son importantes y conviene imitarlas. Cuando el biomimetismo se haga a escala molecular disminuirán las diferencias entre el arte de manufacturar natural y artificial.

Las conchas de los moluscos son unos materiales biológicos muy interesantes porque nos proporcionan pistas para diseñar y fabricar nuevos materiales de altas prestaciones. Son materiales compuestos de matriz orgánica; en general, entre el 95 y el 99% es carbonato cálcico (en forma de aragonito o de calcita, según el tipo de molusco) y el resto, del 1 al 5%, una matriz proteínica. Sorprendentemente, es esta pequeña proporción de «pegamento» orgánico la que confiere al nácar una resistencia a la fractura dos o tres órdenes de magnitud superior a la del aragonito o de la calcita.

Las conchas de los moluscos nos sugieren procedimientos para que materiales frágiles, como el aragonito, puedan transformarse en materiales tenaces, si sabemos introducir intercaras débiles en la dirección transversal a la de la propagación de la grieta. La idea básica no es nueva; en el diseño de materiales compuestos se utilizan fibras y partículas para reforzar matrices frágiles con el propósito de crear intercaras débiles que bloqueen, o desvíen, la trayectoria de las fisuras. La ventaja de la microestructura de las conchas de los moluscos es su sencillez y facilidad de fabricación. La microestructura de las conchas ha inspirado el diseño de blindajes contra proyectiles; las losetas hexagonales de material cerámico son la base del LAST® (Light Armor Systems Technology) comercializados por Foster-Miller Inc.

Imitando a los moluscos, hace unos años I. Clegg y su equipo (1990) mostraron que se podían producir materiales cerámicos tenaces por un procedimiento simple y barato: a partir de plaquitas de SiC recubiertas con grafito se ha conseguido aumentar la tenacidad de fractura desde 4 hasta 18 MPa m<sup>1/2</sup> y la energía de fractura de 30 a 6.000 Jm<sup>-2</sup>. En este nuevo material el SiC hace el papel del aragonito y el grafito el del pegamento proteínico. Imitando a los materiales biológicos se ha diseñado una segunda generación de cerámicas tenaces, las cerámicas monolíticas fibrosas (R. W. Trice y J. W. Halloran, 2000). Las excelentes propiedades de estos materiales cerámicos son

consecuencia del diseño, a escala de micras, de su estructura que, en esencia, consiste en pequeñas y resistentes células hexagonales unidas por un fino y débil pegamento. Las células de nitruro de silicio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  —en forma de fibras de 250 micras de diámetro— están unidas por un «mortero» de nitruro de boro BN, de 10 a 20 micras de espesor. El módulo de rotura de este material es de 510 MPa a temperatura ambiente y de 290 MPa a 1300°C.

La arquitectura de un material biológico —la humilde concha de un molusco o el preciado nácar de las perlas, según se mire— ha inspirado nuevos materiales cerámicos tenaces de altas prestaciones, pero la información contenida en el nácar no termina aquí. Las conchas de los moluscos tienen que funcionar como auténticas barreras protectoras para los invertebrados; tienen que resistir la acción de los depredadores, o tener la tenacidad necesaria para aguantar las embestidas de las olas cuando están en la zona intermareal. Además, tienen que simultanear su función resistente con otras más; facilitar el acceso de los nutrientes, eliminar los residuos, y permitir el crecimiento y la reproducción. A cualquier ingeniero, el diseño de un material con todas estas prestaciones le crearía grandes problemas. Los moluscos lo consiguen con materiales corrientes y agua, a temperatura ambiente y con presiones normales utilizando técnicas de ingeniería biomolecular.

#### 4.1.1. «Madera»

La *madera* es un material biológico que no podemos olvidar. La Edad de la Madera coexistió con la Edad de Piedra, pero no nos ha dejado restos que puedan fecharse. La madera debió alimentar al fuego de los primeros humanos, se utilizó para elaborar herramientas, sirvió para fabricar sus cabañas y para construir los barcos con que surcaron los mares. La madera ha estado siempre asociada al desarrollo de la tecnología mecánica; una polea de madera de morera, hallada en Nimrud (Mesopotamia) y datada alrededor de 800 a.C., puede considerarse como la pieza más antigua de esta tecnología. El molino hidráulico data de finales del siglo I a.C., y el uso de la energía hidráulica para aserrar la madera parece bastante posterior, del siglo XIII. La primera referencia al empleo de este tipo de sierras en España aparece en el libro de Ambrosio de Morales titulado *Antigüedades de las ciudades de España* (1575) donde se describe un aserradero en la villa de Trillo (Guadalajara) movido por las aguas del río Cifuentes.

La madera ha tenido un gran protagonismo en la construcción de edificios. En el tratado *De architectura*, Marco Vitrubio (25 a.C.) ya menciona las características y propiedades de la madera. La edificación de las grandes catedrales requirió ingentes cantidades de madera, tanto para el andamiaje como para las cimbras. La presencia de España en los territorios de ultramar favoreció el conocimiento, catalogación y descripción de las maderas de Iberoamérica y Filipinas. Las publicaciones del ingeniero militar Nicolás Valdés y de los ingenieros de montes Sebastián Vidal y Joaquín Cartellarnau, en la segunda mitad del siglo XIX, marcaron un hito en sus tiempos.

La madera, durante muchos años, ha dominado la construcción naval. El barco de Keops (2500 a.C.) descubierto en el interior de la gran pirámide es una muestra de la refina-



da tecnología naval egipcia; en el barco no había herrajes, los únicos elementos de unión eran los ensambles y las cuerdas utilizadas para postesar la estructura. La ausencia en Egipto de grandes troncos forzó a importar cedros de Líbano, justificando así la expansión hacia los territorios del noreste para asegurar el suministro. La construcción naval alcanzó su máximo desarrollo durante los siglos XV a XVIII, forzada por la fabricación y armado de navíos destinados a la guerra o al transporte de mercancías. La ingente cantidad de madera que necesitaba cada uno de aquellos edificios flotantes y la demanda prioritaria de robles fueron la causa del deterioro irreversible de estos árboles en Europa.

La explotación de la madera abarca desde su uso como combustible hasta su transformación en productos de consumo (L. García Esteban, 2001). Cabe distinguir entre la industria de la primera transformación (tableros, aserrado, preparación industrial de la madera) y la de segunda transformación (envases y embalajes, muebles, y carpintería).

El consumo de madera ha pasado de 1.500 millones de m<sup>3</sup> en 1930 a 3.400 millones en 1991. La mitad, considerada como madera en rollo industrial, se dedicó a construcción principalmente. La otra mitad fue consumida en su lugar de extracción como combustible. Se estima que para 2010 el consumo de madera podría alcanzar los 5.000 millones de m<sup>3</sup>.

Respecto a la producción, en España, en 2003, se cortaban 15 millones de m<sup>3</sup> de madera en rollo, de los que 7,5 se destinaban a trituración (tableros y pastas de celulosa) y 5,1 a la fabricación de madera aserrada y chapas de madera. El resto son leñas y apeas. Pero el consumo nacional de madera es mayor, del orden de los 18,4 millones de m<sup>3</sup>, y por eso en España se importan 3,4 millones de m<sup>3</sup>, fundamentalmente coníferas y frondosas boreales ya que de maderas tropicales apenas si se importan 100.000 m<sup>3</sup>/año.

Según datos de CONFEMADERA el sector de la madera y el mueble en España abarca un total de 38.267 empresas, de las que 20.995 se dedican a la fabricación de muebles y 17.312 a otros sectores de la madera. Respecto del empleo, es necesario señalar que el sector de la madera y el mueble ocupa a un total de 233.423 trabajadores, de los que 135.827 (58%) lo son en el sector del mueble. Es, por tanto, un sector de PYMES y micro-PYMES, cuyo mercado principal es la construcción, con fuerte concentración de empresas en determinadas Comunidades Autónomas (por ejemplo, en el sector de aserrío, el 28% de las empresas están radicadas en Galicia, el 15% en Castilla-León, el 10% en Cataluña y el 9% en el País Vasco). España es exportador de muebles pero importador de materias primas.

En España, a partir de la década de los 80, se ha trabajado intensamente en la caracterización físico-mecánica de nuestras maderas empleando para ello probetas de tamaño estructural. Los valores obtenidos para la madera de los pinos radiata, pinaster, silvestre y laricio así como los obtenidos para el *Eucalyptus globulus* han permitido no sólo su introducción en la norma europea EN 1912 sino que además hayan sido empleados para la redacción del documento DB-SE «Estructuras de Madera» del *Código Técnico de la Edificación*. Gracias a estos estudios, llevados a cabo mayoritariamente en los laboratorios del INIA y en la ETS de Ingenieros de Montes, las maderas nacionales han sido homologadas en Europa.

#### 4.1.2. «Corcho»

El *corcho* es un material biológico español que merece ser citado aquí. El corcho une a sus cualidades de imputrescibilidad, elasticidad y capacidad aislante, su condición de producto natural, renovable, reciclable y biodegradable. Propiedades que se añaden a los beneficios que reportan los alcornocales, fuente de biodiversidad y riqueza cultural (J. R. González Adrados, 2005).

Plinio, en el 70 d.C., ya menciona el uso del corcho para tapar vasijas. Esta solución ha sido muy apreciada en la producción de vinos de calidad. En 1667, el padre bodeguero de la abadía de Hautvillers, Dom Pérignon, conocedor de las características de este material, lo utilizaba como cierre hermético de sus botellas.

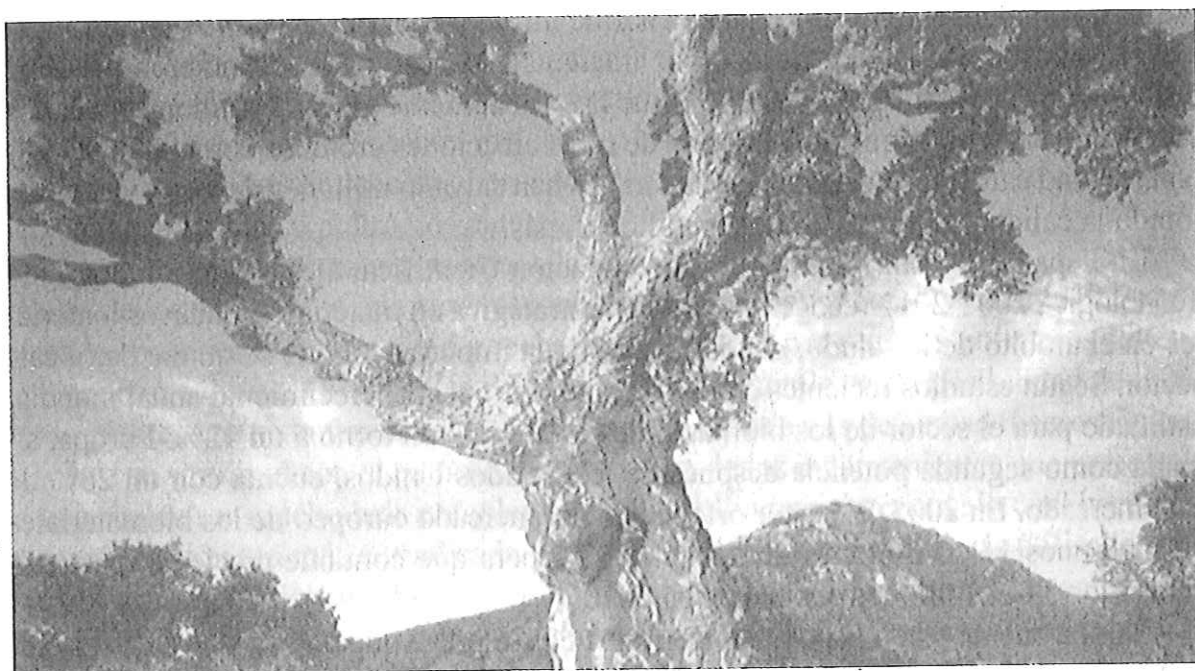
La fabricación de tapones para vinos es la base principal de la industria corchera en España y en el mundo. El tapón natural de una pieza supone tan sólo un 10% del total de corcho extraído del monte en forma de panas. El resto de la producción se destina a la fabricación de *aglomerado blanco* (corcho granulado con cola), producto usado como complemento en la fabricación del tapón de calidad, para la fabricación de revestimientos de suelos y paredes, y como protector-amortiguador de vibraciones en equipos industriales. Los *aglomerados negros*, cuya fabricación en España es actualmente muy reducida, se obtienen sometiendo a los gránulos de corcho a un proceso con autoclave que, al disminuir su densidad, acrecienta sus propiedades como aislantes térmicos y acústicos.

Los primeros datos sobre la industria de tapones en España se remontan a 1750. En Agullana (Gerona) se estableció la primera fábrica de tapones para botellas de vidrio, una técnica que posteriormente se extendió por las comarcas del Ampurdán y de La Selva. El auge de la industria taponera dio renombre al tapón español y su exportación creció rápidamente. La elevada demanda superó la oferta catalana y se recurrió a la materia prima extremeña y andaluza, favoreciendo la implantación de nuevas fábricas en estas regiones.

A principios del siglo xx, la aparición del *aglomerado negro* dio un empuje a la industria del corcho. Las primeras factorías importantes se ubicaron en Palafrugell (Gerona) en 1917, y en Sevilla en 1918. Esta industria está en vías de desaparición, en 2000 sólo se contabilizaba una fábrica. El *aglomerado blanco*, que surgió en 1923, le proporcionó otro impulso. Se inició en Palafrugell y hoy es el producto que sostiene la industria corchera.

La superficie de alcornocal en el mundo se estima en 2.300 millones de ha, de las cuales 475.000 ha (de ellas 365.000 ha en estado puro) están en España. La producción mundial de corcho asciende a 374.000 toneladas anuales, de las cuales el 23% corresponde a España y el 51% a Portugal. Andalucía (con más del 60%), Extremadura, Cataluña y Castilla-La Mancha son las Comunidades Autónomas con mayor producción. La producción de corcho ha ido descendiendo en los últimos años; en 1969 fue de 109.000 t y en 1996 de 90.025 t. Por el contrario, las cantidades de corcho natural y manufacturado que se exportan van en aumento. La fabricación de tapones con corcho natural se mantiene prácticamente constante, alrededor de 7.000 t anuales.

La labor de I+D en este sector se realiza en departamentos universitarios, principalmente en Cataluña y Extremadura, y tienen especial importancia los dos centros tecnológicos IPROCOR, en Mérida, y el Instituto Catalán del Corcho, en Palafrugell, así como el laboratorio de Productos Forestales del INIA dedicados a actividades de I+D.



El corcho es un material biológico que une a sus cualidades de imputrescibilidad, elasticidad y capacidad aislante, su condición de producto natural, renovable, reciclable y biodegradable

Entre los temas de investigación merecen destacarse la interacción corcho-vino, y la problemática derivada de la producción de sustancias no deseables.

#### 4.2. Biomateriales

Las raíces históricas de la ciencia de los biomateriales hay que buscarlas en los trabajos antiguos de los dentistas y cirujanos ortopédicos. Se puede encontrar información muy interesante de finales del siglo xix y comienzos del xx, pero es raro encontrar casos documentados de implantes funcionales de tiempos remotos. Por este motivo, el hallazgo de un implante dental funcional en una necrópolis Galo-Romana en Essone, Francia, fue un hecho relevante que se publicó en *Nature* (E. Crubézy y otros, 1998).

Se trata de un implante de hierro en la posición del segundo premolar de la mandíbula superior derecha. Corresponde a un hombre que falleció alrededor de los 30 años, en el siglo i o ii (d.C.). Lo interesante del hallazgo es que, al parecer, no hubo rechazo y el implante se integró con el hueso y debió ser funcional. Según la información disponible este proceso requiere un mínimo de tres a seis meses y, por lo que se pudo inferir del periostio, el sujeto disfrutó del implante más de un año.

Entre los cometidos de los biomateriales, *evaluar, curar o reemplazar tejidos y órganos*, es en el último donde se han depositado más esperanzas. Existe una gran demanda de biomateriales compatibles para reemplazar tejidos dañados y hacen falta biomateriales para facilitar la soldadura de los huesos o para sustituir partes que han degenerado. Sólo en los Estados Unidos se estima que en 2002 se utilizaron 448.000 prótesis de cadera, 452.000 prótesis de rodilla, 854.000 implantes dentales, 1.204.000 stents coronarios y 1.328.000 catéteres coronarios (J. Enderle y otros, 2005). La osteo-



porosis, por citar un ejemplo, tiene un enorme impacto sobre los gastos en todos los países. Los costes anuales en Europa por fracturas osteoporóticas ascendieron a 31.700 millones de euros en 2000 y se espera que la cifra aumente a 76.700 millones en 2050, cuantía únicamente comparable con la de otras afecciones crónicas como el asma y la enfermedad cardiovascular. Los biomateriales han salvado millones de vidas y han mejorado la calidad de vida de muchos millones más.

En España, el Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011 recoge una «acción estratégica en materiales y nuevos materiales en el ámbito de la salud», dando prueba de la importancia que se quiere dar a este sector. Según estudios recientes de la Comisión Europea, el crecimiento anual mundial estimado para el sector de los biomateriales está fijado en torno a un 12%. Europa, situada como segunda potencia después de los Estados Unidos, cuenta con un 28% de este mercado. En 2005, el sector ortopédico del mercado europeo de los biomateriales alcanzó unos 1.000 millones de dólares y se espera que continúe creciendo hasta alcanzar los 5.000 millones de dólares en 2010.

Europa cuenta con una población envejecida. Se prevé que más del 30% de sus ciudadanos tengan más de 60 años en 2025, con una esperanza de vida todavía mayor que la actual (80 años). Por ello se piensa que el mercado de los biomateriales seguirá creciendo. Sin embargo, debido a la también creciente carga que representan los costes del sistema sanitario, resulta primordial desarrollar mejores productos a precios más económicos. Como ejemplo pueden darse algunos datos: se implantan anualmente en Europa alrededor de 40.000 prótesis cardíacas y 275.000 prótesis de cadera (siendo de fabricación europea sólo el 15%), y el pronóstico es de un aumento del uso de prótesis del orden del 6% anual, con un incremento de los costes asociados del 10%. En España los gastos en implantes se sitúan alrededor de los 800 millones de euros.

La industria española todavía no tiene una gran capacidad de investigación para el desarrollo de nuevos biomateriales ni nuevos dispositivos protésicos. Sin embargo, desde el punto de vista de la investigación, España dispone de bastante buena salud dentro del entorno europeo, contando con un número creciente de investigadores de excelente nivel que trabaja en esta área multidisciplinar. La convergencia de científicos procedentes de campos tales como la física, las ingenierías, las ciencias biológicas y la medicina en centros de investigación de alto nivel permite ver el futuro del desarrollo científico y tecnológico de los biomateriales en España con cierto optimismo.

Antiguamente, al seleccionar biomateriales para implantes se intentaba que fueran inertes —que interaccionaran lo menos posible con el cuerpo— para no entorpecer el crecimiento y actividad natural de las células en contacto con el material. Este objetivo no fue realista, por inevitable, y en la actualidad ha sido sustituido por el diseño de materiales que interaccionen de forma adecuada con las células. Para los implantes óseos, por ejemplo, la tendencia actual es diseñar implantes que inciten la osificación y que después sean biodegradables, de forma que el biomaterial actúe como un andamio mientras se forma hueso y al final desaparezca cuando el hueso se haya regenerado.

Con el planteamiento actual hacen falta armaduras que proporcionen a las células implantadas un sustrato para que se adhieran y un soporte físico que guíe la formación de nuevos órganos. Las células transplantadas adheridas al andamio, proliferan, segregan sus propias matrices extracelulares, y estimulan la formación de nuevos tejidos.

Durante este proceso, el andamiaje se va degradando y puede llegar a desaparecer. El biomaterial de la armadura debe ser un material multifuncional; capaz de facilitar la adhesión de las células, estimular su crecimiento y permitir la diferenciación. También; biocompatible, poroso, resistente, maleable y biodegradable. Los materiales utilizados para estos propósitos pertenecen, hasta ahora, a dos grandes familias; polímeros sintéticos biodegradables y polímeros naturales derivados del colágeno.

Algunos polímeros naturales tienen la ventaja de parecerse mucho a las macromoléculas de los seres vivos que van a reconocer e interaccionar con el implante. En estos casos los problemas de toxicidad y rechazo, provocados por muchos polímeros sintéticos, podrían evitarse. Otra ventaja de los polímeros naturales es la posibilidad de diseñar implantes que sean funcionales a nivel molecular, además de a nivel macroscópico, debido a su similitud con el entorno receptor. Uno de los inconvenientes que presentan es que suelen ser mucho más complejos que los polímeros sintéticos, lo cual hace que su manipulación sea más complicada. Entre los polímeros naturales más utilizados deben destacarse el colágeno, los «glicosaminoglicones» y los compuestos de ambos.

Una propiedad interesante de los polímeros naturales es su capacidad de degradarse por las enzimas del receptor, una garantía de que el implante será metabolizado mediante un proceso fisiológico. Esto es una ventaja más que un inconveniente cuando el objetivo del implante es que realice su función sólo durante un determinado período de tiempo —por ejemplo, mientras crece un tejido, o si se utiliza para transportar un fármaco— además, también es posible modificar el tiempo de la degradación, mediante la formación de enlaces transversales u otras modificaciones químicas, con lo cual se tiene la posibilidad de controlar la vida del implante.

Bastantes materiales biológicos pueden utilizarse como biomateriales, es decir para *curar o reemplazar tejidos y órganos*. Dos materiales biológicos a los que nos hemos referido anteriormente ilustran esta idea:

La concha de los moluscos es un material biológico que se puede utilizar como biomaterial (Duplat D. y otros, 2007 y Vecchio K. S. y otros, 2007). El nácar del molusco *Pinctada maxima* se utilizó molido finamente y mezclado con sangre de ocho pacientes, mujeres entre 48 y 55 años, que padecían pérdida de hueso en el maxilar superior. La solución se inyectó en los tejidos afectados por la pérdida de hueso y éstos se biopsiaron después de seis meses. Los resultados indicaron que no hubo inflamación y que el nácar había sido aceptado por los tejidos, como si se tratara del hueso de los propios pacientes. Todavía más, los osteoblastos (células especializadas que segregan la matriz del hueso) se activaron y formaron tejido óseo sano en el implante. El nuevo tejido óseo permaneció soldado a las partículas de nácar sin ningún tejido intermedio, blando o fibroso. Los osteoclastos (células que participan en los procesos de absorción del tejido óseo) permanecieron activos alrededor del hueso pero no interaccionaron con el nácar. ¿Qué tienen en común el nácar y el hueso para que aquél engañe a nuestro sistema inmunitario? Los osteoblastos reconocen el nácar y no lo atacan, pero no sucede lo mismo con el aragonito fabricado en el laboratorio. Aunque el hueso y el nácar son muy distintos, algo deben compartir de la compleja maquinaria que controla su formación. Los experimentos citados sugieren que podrían ser las macromoléculas encargadas de transmitir la señal para iniciar o terminar la biomineralización.

La seda de las arañas y de los gusanos de seda nos ofrece otro ejemplo de material biológico que puede utilizarse como biomaterial (C. Vepari, D. L. Kaplan 2007). En 1957 el doctor Feng Youxian, cirujano del hospital Zhongshan en Shanghai, experimentó con injertos de seda. En Estados Unidos y en Europa se utilizaban implantes de Dacron para reemplazar arterias pero en China no se disponía de este biomaterial. El doctor Feng fabricó una arteria artificial con una manga de una camisa de seda y la implantó en un perro, con resultados satisfactorios. En 1959 se fabricaron prótesis de seda y se implantaron con éxito en más de 500 pacientes.

En la actualidad, a partir de soluciones de seda regenerada (de gusano de seda) se fabrican diversos tipos de biomateriales —geles, esponjas y películas— para usos médicos. Estas sedas se pueden modificar —actuando sobre las cadenas laterales de los aminoácidos— para alterar las propiedades de la superficie o para inmovilizar factores de crecimiento celular. A partir de cultivos celulares sobre andamios de seda ya se han conseguido formar diversos tejidos —hueso, cartílago o ligamento— tanto *in vitro* como *in vivo*. También se intenta imitar los hilos de seda de las arañas usando técnicas de biotecnología pero, de momento, se está en una fase muy preliminar.

Hasta un Rolls-Royce acaba parándose cuando alguna pieza deja de funcionar debido a una rotura o al desgaste. Lo mismo ocurre con el cuerpo humano, con los músculos, ligamentos y órganos que soportan el trabajo diario y las sobrecargas de las enfermedades y el envejecimiento. Por desgracia, la tecnología para fabricar repuestos humanos está mucho más atrasada que la de los automóviles. No obstante, los nuevos biomateriales —sean materiales biológicos o no— ya permiten realizar transplantes que hace pocos años no eran imaginables y posiblemente dentro de algunos años más se dispondrá de corazones, riñones y pulmones que apenas se desgasten y que, de vez en cuando, tengan que pasar alguna revisión.

Los biomateriales han pasado de ser materiales seleccionados entre los disponibles en el mercado, a ser materiales diseñados con precisión molecular con determinadas propiedades para una aplicación específica. La nanotecnología ha acelerado el desarrollo de nuevas técnicas tanto para la liberación de fármacos como para aumentar el control de su administración. Ya existen dispositivos a nivel micro y nano —fabricados usando técnicas utilizadas en la producción de circuitos integrados— que permiten controlar con precisión la liberación de fármacos (N. A. Peppas, 2006). En particular, el desarrollo de materiales capaces de interaccionar con su entorno permite utilizarlos para la administración inteligente de drogas, como dianas para dirigir los medicamentos, o como componentes de fármacos. La nanotecnología, aplicada al campo de los biomateriales, está proporcionando nuevos enfoques para el diseño de materiales que permitirán técnicas de diagnóstico y terapia que revolucionarán la actual asistencia sanitaria.

#### AGRADECIMIENTOS

La obtención de datos recientes sobre la producción de los materiales por las diversas industrias españolas no ha sido tarea fácil. Todo el mérito se debe a la amable y desinteresada colaboración de muchos especialistas a los que deseo expresar desde aquí



mi agradecimiento. Si se ha producido alguna inexactitud en las cifras indicadas, se ha debido a errores míos al ordenarlas.

En particular, deseo agradecer la ayuda recibida de: Enrique Calleja Pardo, Juan José de Damborenea, Pedro García Barreno, Juan Fernández Golfín, Jaime Carlos Gálvez Ruiz, Consuelo García Cordovilla, Javier Gil Sevillano, José Ramón González Adrados, Gustavo V. Guinea Tortuero, Luis Gutiérrez Jodra, Antonio Hernando, Antonio Martínez Benasat, José Luis Mateo López, José Serafín Moya Corral, Pedro Pagés, José Alberto Pardos Carrión, Rafael Pax, José Antonio Planell, José Manuel Prado Pozuelo y Manuel Rodríguez.

## BIBLIOGRAFÍA

- AÏTCIN, P. C., «Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow», *Cement and Concrete Research*, 30, 2000, págs. 1349-1359.
- ASHBY, M. F. y BRÉCHET, Y. J. M., «Designing hybrid materials», *Acta Materialia*, 51, 2003, págs. 5801-5821.
- CARTER, C. B. y NORTON, M. G., *Ceramic Materials. Science and Engineering*, Springer, 2007.
- CARTLIDGE, E., «Bright outlook for solar cells», *Physics World*, 2007, julio, págs. 20-24.
- CLEGG, W. J.; KENDALL, K.; ALFORD, N. M.; BUTTON, T. W. y BIRCHALL, J. D., «A simple way to make tough ceramics», *Nature*, 347, 1990, págs. 455-457.
- CRUBÉZY, E.; MURAIL, P.; GIRARD, L. y BERNADO, J. P., «False teeth of the Roman World», *Nature*, 391, 1998, pág. 29.
- DUPLAT, D.; GALLET, M.; BERLAND, S.; MARIE, A.; DUBOST, L.; ROUSSEAU, M.; KAMEL, S.; MILET, C.; BRAZIER, M.; LÓPEZ, E. y BÉDOUET, L., «The effect of molecules in mother-of-pearl on the decrease in bone resorption through the inhibition of osteoclast cathepsin K», *Biomaterials*, 28, 2007, págs. 4769-4778.
- ELICES, M., «De las cuerdas de cáñamo a los hilos de araña», *Horizontes Culturales. Las Fronteras de la Ciencia*, Espasa Calpe, Madrid, 1998, págs. 1-10.
- «Materiales biológicos y biomateriales», *Horizontes Culturales. Las Fronteras de la Ciencia*, Espasa Calpe, Madrid, 1999, págs. 113-125.
- *Structural Biological Materials: Design and Structure-Property Relationships*, Pergamon, Elsevier Science, 2000.
- ELICES, M. y LLORCA, J., *Fiber Fracture*, Elsevier, 2002.
- ENDERLE, J.; BLANCHARD, S. y BRONZINO, J., *Introduction to Biomedical Engineering*, Elsevier, 2005.
- ENUSA, *Diseño y Fabricación de Elementos Combustibles*, Enusa, 2002.
- FORO NUCLEAR, *Resultados y Perspectivas Nucleares*, Foro de la Industria Nuclear Española, 2006.
- GARCÍA ESTEBAN, L., «Los materiales forestales: Madera, papel y corcho», en F. J. Ayala-Carcedo (ed.), *Historia de la Tecnología en España*, vol. 1, 2001, págs. 291-300.
- GONZÁLEZ ADRADOS, J. R., «Investigación en el sector corchero», *Alcornocales, fábricas y comerciantes. Pasado, presente y futuro del negocio corchero*, Palafrugell, febrero de 2005, págs. 1-12.
- GRANQVIST, C. G.; AZENS, A.; HESZLER, P.; KISH, L. B. y OSTERLUND, L., «Nanomaterials for benign indoor environments: Electrochromics for "smart Windows", sensors for air quality, and photo-catalysts for air cleaning», *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, 2007, páginas 355-365.
- HARRISON, P., *Quantum Wells, Wires and Dots*, Wiley, 2000.

- JILES, D. C., «Recent advances and future directions in magnetic materials», *Acta Materialia*, 51, 2003, págs. 5907-5939.
- MITIN, V. V.; KOCHELAP, V. A. y STROSCIO, M. A., *Quantum Heterostructures*, Cambridge U. P., 1999.
- PEPPAS, N. A., «Intelligent biomaterials as pharmaceutical carriers in microfabricated and nanoscale devices», *MRS Bulletin*, 31, 2006, págs. 888-893.
- RAMOS CARPIO, M. A., *Ingeniería de los Materiales Poliméricos*, vols. 1 y 2, Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial, 2007.
- SOFFER, O.; ADOVASIO, J. M. y HYLAND, D. C., «The Venus figurines: Textiles, basketry, gender, and status in the upper paleolithic», *Current Anthropology*, 41, 2000, págs. 511-537.
- TRICE, R. W. y HALLORAN, J. W., «Elevated-temperature mechanical properties of silicon nitride/boron nitride fibrous monolithic ceramics», *J. Am. Ceram. Soc.*, 83, 2000, págs. 311-316.
- VECCHIO, K. S.; ZHANG, X.; MASSIE, J. B.; WANG, M. y KIM, C. W., «Conversion of bulk seashells to biocompatible hydroxiapatite for bone implants», *Acta Biomaterialia*, 3, 2007, págs. 910-918.
- VEPARI, C. y KAPLAN, D. L., «Silk as a biomaterial», *Prog. Polym. Sci.*, 32, 2007, págs. 991-1007.
- WILLIAMS, J. C. y STARKE, E. A., «Progress in structural materials for aerospace systems», *Acta Materialia*, 51, 2003, págs. 5775-5799.
- YU, P. Y. y CARDONA, M., *Fundamentals of Semiconductors*, Springer, 1996.
- ZÄCH, M.; HÄGGLUND, C.; CHAKAROV, D. y KASEMO, B., «Nanoscience and nanotechnology for advanced energy systems», *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 10, 2006, págs. 132-143.