

DE LAS CUERDAS DE CÁÑAMO A LOS HILOS DE ARAÑA. LA CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

MANUEL ELICES CALAFAT
Real Academia de Ciencias

INTRODUCCIÓN

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 y electrónica. 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. Por estos motivos, la Ciencia de los Materiales está presente en este *Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica*.

La tecnología de los materiales está asociada a la evolución de las sociedades y participa en todas las actividades humanas. Los materiales desempeñan un papel crítico en los avances tecnológicos, y la madurez conseguida en esta ciencia ya permite diseñar materiales a medida. Los materiales biológicos –fruto de 4.000 millones de años de I+D de la Naturaleza– son, hoy, una fuente de inspiración para diseñar nuevos materiales. Todos estos aspectos se comentan a continuación.

Relevancia de los materiales en la sociedad

Los historiadores han clasificado las primeras edades de la humanidad según el impacto tecnológico de los materiales utilizados; así han surgido las clásicas edades de *Piedra*, del *Bronce* y del *Hierro*. La clasificación puede extenderse y matizarse (figura 1).

No es difícil extender la clasificación hasta nuestros días. El siguiente período podría ser muy bien la Edad del *Hormigón*; los romanos ya se sirvieron de él para sus obras públicas y ahora es el material que más se consume –en volumen– en todo el mundo. El acero fue el siguiente material con una fuerte incidencia tecnológica y social, hizo su aparición en escena hace unos doscientos años. Después de la Edad del *Acero* podemos considerar que vino la Edad del *Silicio*. El silicio es el acero de la industria de los semiconductores. De la misma forma que el acero permitió

que la revolución industrial transformara el mundo desarrollado de su época, el silicio ha sido el soporte que ha permitido a la revolución de las tecnologías de la información transformar el mundo actual.

Las edades del *Acero* y del *Silicio* ilustran el hecho de que la Ciencia e Ingeniería de los Materiales es una disciplina importante que no sólo facilita el desarrollo de nuevos productos e industrias, sino que además puede tener una profunda repercusión en la sociedad. La Edad del *Silicio* se inició alrededor de 1950 y representará, seguramente, la última edad basada en un solo material. En estos momentos estamos entrando ya en la Edad de los *Nuevos Materiales* porque la madurez de la Ciencia de los Materiales ya nos permite *diseñar* el material que necesitamos en vez de tener que *seleccionar* el más idóneo que nos ofrezca la naturaleza.

La ordenación de las *edades* también se puede enriquecer si se tienen en cuenta ciertos matices entre ellas. La historia nos enseña que la humanidad, al principio, se adaptó a los materiales que la Naturaleza le ofrecía *seleccionando* el más apto para sus necesidades. Cuando no lo encontraba, lo *diseñaba* empíricamente al principio y científicamente después.

En las edades de *Piedra* y del *Hierro*, el hombre se limitó a *seleccionar* los materiales líticos o férreos más adecuados. Después, *diseñó empíricamente* materiales que la Naturaleza no le brindaba; aleó cobre con estaño y creó el *bronce*, mezcló piedras con argamasa y fabricó el *hormigón*, y la aleación del hierro con el carbono produjo el *acero*. En los últimos cincuenta años, sus conocimientos sobre la estructura de la materia le han permitido *diseñar científicamente* nuevos materiales. La tecnología de la microelectrónica se basa en una deliberada y científicamente justificada introducción de impurezas en cristales de *silicio* para diseñar semiconductores con unas propiedades adecuadas.

La ciencia de los materiales participa en todas las actividades humanas

Difícilmente se encontrará una actividad humana donde los materiales no tengan un cierto protagonismo; des-

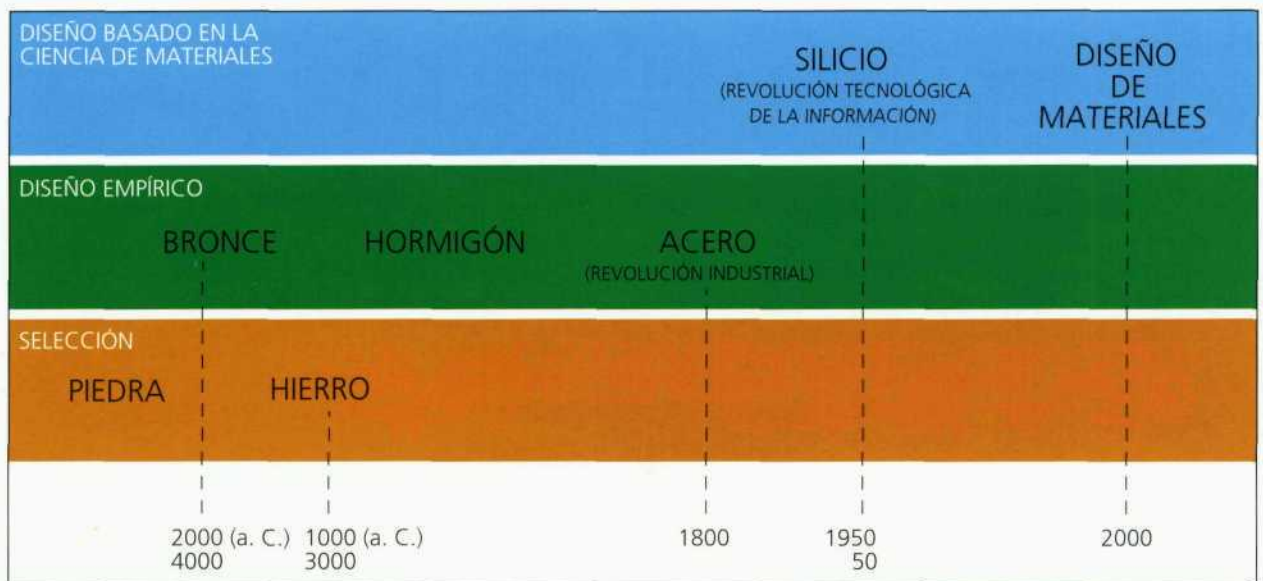


Fig. 1.— Edades de la humanidad: ampliación de las edades clásicas y matización según la selección o el tipo de diseño del material.

de la flamante estación orbital *ALFA* 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. Los siguientes ejemplos ilustran esta idea.

El primer cable telefónico que cruzó el Atlántico —el TAT 1— era de cobre, se componía solamente de unos pocos cientos de circuitos telefónicos y cada uno de ellos costaba dos millones de dólares. En 1995 se puso en funcionamiento el primer cable transatlántico formado con fibras ópticas. El diseño de nuevos materiales —sustituyendo el cobre por la fibra óptica— ha permitido aumentar la *eficacia* y disminuir el *coste*; el número de circuitos en un solo cable se ha multiplicado por mil, mientras que su coste es dos millones de veces menor.

El nexo entre los materiales y la producción de energía es indudable. De nuevo, 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. Parece ser que la demanda mundial de energía se multiplicará por tres en los próximos veinte años, mientras que las principales fuentes de producción eléctrica —los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo o el gas natural— deberán disminuir su contribución por las exigencias del Convenio del Cambio Climático. La industria nuclear podría ser una solución, que sería 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 Materiales tiene, y tendrá, un gran protagonismo en el campo de la energía. El progreso es constante; hace pocos años un avión alimentado solamente 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, donde los hermanos Wright volaron por primera vez en 1903—. Este vuelo, al revés de lo que le sucedió a Ícaro, fue posible gracias al Sol.

Los materiales también inciden en la *sanidad*, 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 transplantes inimaginables hasta el momento. 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 (figura 2). 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.

EL PAPEL CRÍTICO DE LOS MATERIALES

Los avances tecnológicos van, casi siempre, de la mano con el desarrollo de nuevos materiales y, otras veces, están frenados por no disponer de los materiales adecuados. Las tecnologías ligadas al transporte, a las comunicaciones, a la energía o a la salud, por citar algunas, nos ofrecen muchos ejemplos en este sentido. A continuación se comentan algunos casos extraídos del sector del transporte.

Materiales para el transporte

El 15 de octubre de 1997, durante un fresco amanecer en el desierto de Nevada, Andry Green —un piloto británico de aviones Tornado que gozaba de un permiso especial— fue el primer hombre que superó la barrera del sonido pilotando un coche. El bólido *Thrust SSC* (Super Sonic Car) superó rugiendo los 1.228 kilómetros por hora —1.017 Mach— en dos carreras. Fue el final triunfal después de seis años de esfuerzos del equipo *Thrust SSC* de Farnborough (Reino Unido), dirigido por el entusiasta Richard Noble, quien también batió un récord en su momento. Este éxito se debió, en gran parte, a que se dispuso de los materiales adecuados.

El *Thrust-SSC* tiene una longitud de 16,5 m, una anchura de 3,7 m, pesa 9,3 toneladas y está propulsado por dos motores turbohélice Spey 205 de Rolls-Royce (figura 3). Para su construcción se ha recurrido a distintos materiales: acero, aluminio, titanio y varios materiales compuestos. La utilización de un compuesto de *matrix epoxy* reforzada con fibras de grafito ha sido decisiva: este material ha permitido disminuir el peso del vehículo y, a la vez, proporcionar la gran resistencia necesaria en los conductos de admisión del aire —fabricados de una sola pieza— en la cabina del piloto, en las góndolas de los motores y en el afilado morro.

Otras hazañas no pueden realizarse porque todavía no se dispone de los materiales adecuados. Éste es el caso, por ejemplo, del *Oriente Express*.

El *Oriente Express* es el nombre coloquial que se ha dado al avión suborbital, de Mach 8, que volará de Nueva York a Tokyo en tres horas. Durante la reentrada en la atmósfera su piel puede alcanzar temperaturas próximas a los 2.000 °C. Tanto la aeronave como sus motores —el combustible será hidrógeno— están diseñados, pero no se dispone de un material suficientemente dúctil y tenaz que pueda soportar las altísimas temperaturas producidas por el roce con la atmósfera al comenzar el descenso.

Esta delicada maniobra la suele iniciar el transbordador espacial cuando está sobre Madagascar, al inclinar el piloto lateralmente la nave de forma que el borde de un ala y el morro empiecen a hendir la tenue atmósfera. La maniobra debe efectuarse con mucha precisión: si no entra con el ángulo adecuado puede rebotar igual que una piedra plana lanzada horizontalmente sobre el agua. Si logra penetrar, cualquier pequeño error resulta difícil de corregir porque la nave no planea muy bien. Si se desviara de la ruta más de 1.300 kilómetros —una distancia que, orbitando, recorre en menos de tres minutos— tendría gran-

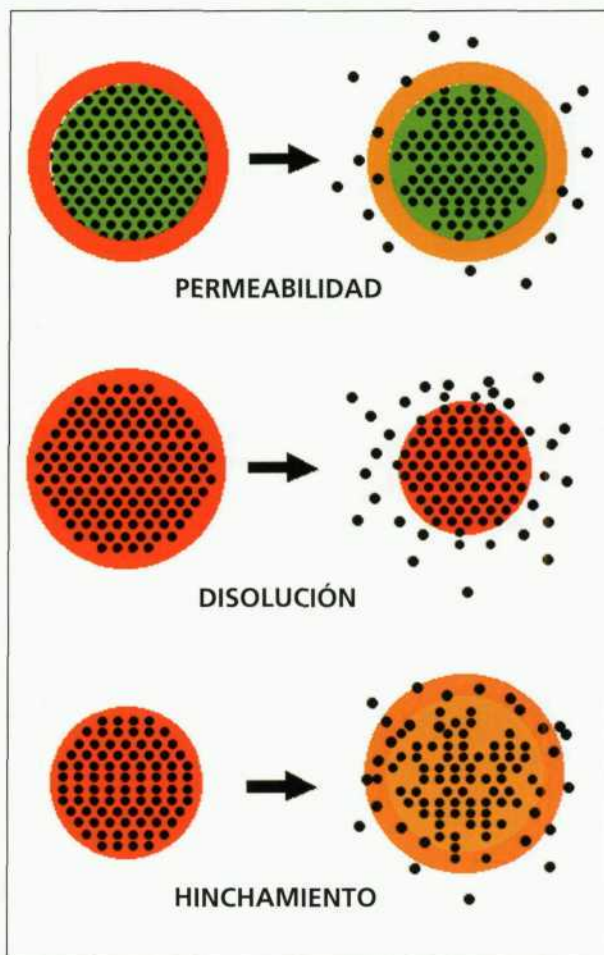


Fig. 2.— Distintas estrategias —usando diferentes tipos de materiales— para liberar un fármaco en el sitio adecuado.

des dificultades para llegar a Cabo Cañaveral y, probablemente, se estrellaría en el suelo. Por si todo esto fuera poco, cuando el transbordador golpea la atmósfera —a 27.000 kilómetros por hora— su piel se calienta mucho, tanto que el gas que lo rodea se ioniza formando un plasma. Las ondas de radio no pueden atravesar este plasma y las comunicaciones permanecen interrumpidas durante varios agonizantes minutos.

El *Oriente Express* pretende eliminar estos problemas con otro diseño para que la nave planee mejor y pueda así aterrizar en otro aeropuerto, y con un morro más aerodinámico que elimine prácticamente los minutos de silencio. Se estima que con el nuevo diseño más estilizado en el morro y en los bordes de ataque de las alas se alcanzarán temperaturas superiores a los 2.000 °C, mucho mayores que las que puede soportar un material estructural convencional.

En el primer ejemplo —el coche supersónico—, el problema se resolvió porque se supo diseñar un material ligero y tenaz. En el segundo —el avión transatmosférico—, el problema no se ha resuelto todavía porque no se sabe diseñar el material que pueda resistir una temperatura tan elevada. También puede darse una situación intermedia:

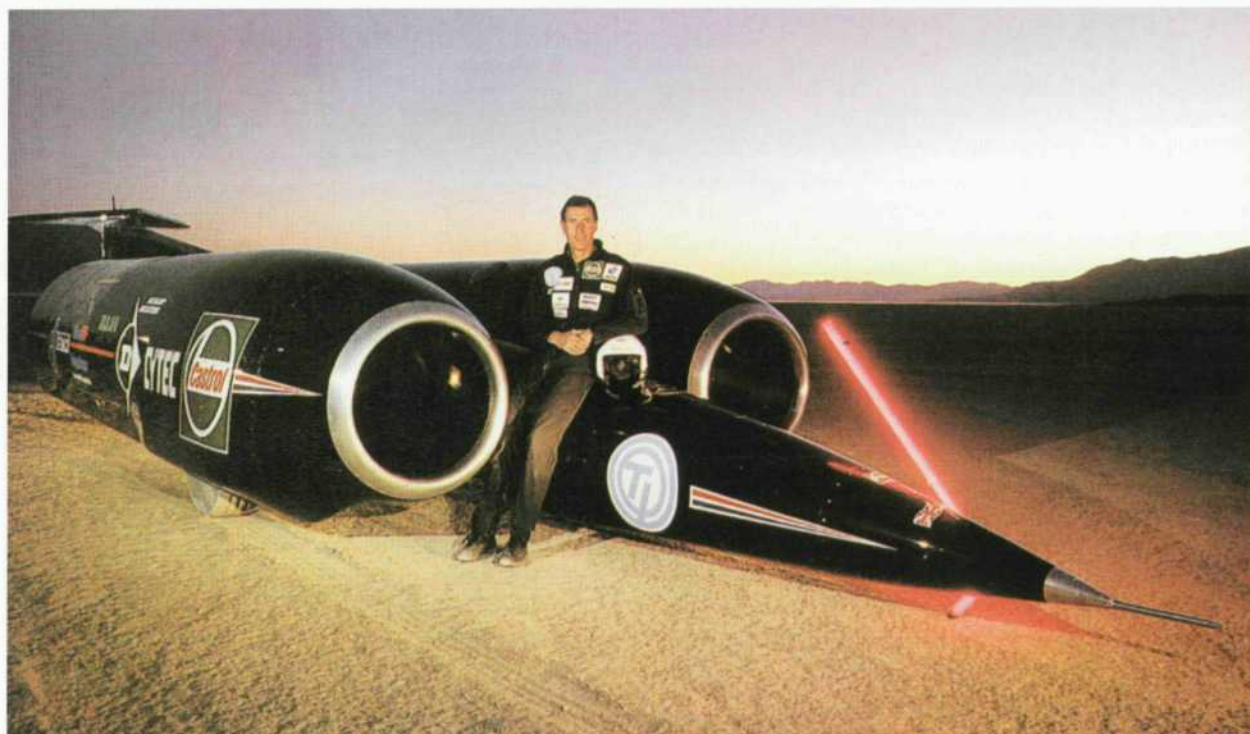


Fig. 3.— El Thrust SSC fue el primer coche que superó la barrera del sonido, el 15 de octubre de 1997. (A. Ernoult, cortesía de Nikon Pro.)

tener un material adecuado a escala de laboratorio y no saberlo fabricar a escala industrial de forma competitiva. Los trenes que funcionan por levitación magnética pueden ilustrar este tercer ejemplo.

En el mes de octubre de 1829, la compañía del ferrocarril Liverpool-Manchester ofreció un premio de 500 libras —unos 18 millones de pesetas de ahora— al vehículo capaz de arrastrar una carga igual a tres veces su peso a una velocidad de 16 kilómetros por hora. El premio lo ganó una locomotora a vapor, llamada eufemísticamente el «cohetes» —*The Rocket*—, en competición con otras tres máquinas de vapor, un vehículo tirado por caballos y otro accionado por dos hombres.

La *Rocket* marcó el inicio de una nueva era. Durante las pruebas, que duraron ocho días y a las que asistieron más de 15.000 espectadores, se alcanzaron velocidades cercanas a los 50 kilómetros por hora. El triunfo de la locomotora se debió, en gran parte, a su caldera, cuyo diseño y materiales fueron novedosos. A partir de esta fecha, las diligencias tuvieron sus días contados. No obstante, el tren inspiraba pánico a mucha gente; la gran velocidad —20 kilómetros por hora—, el traqueteo y el humo, que en los túneles era irrespirable y tiznaba a los pasajeros, hacían del tren un motivo de espanto. Ocho años después se inauguró en Cuba el primer ferrocarril español, entre La Habana y Güinnes. En 1848 se inauguraba el primer ferrocarril de la península, entre Barcelona y Mataró.

El ferrocarril del futuro, el *Maglev*, no se parecerá en nada al *Rocket* ni a sus descendientes, sólo conservará el nombre. Hasta las vías de hierro —el *chemin de fer*— desaparecerán. Este tren tampoco tendrá un motor tradicio-

nal, no tendrá ruedas convencionales, no rozará el suelo sino que volará —*levitará*— a unos diez centímetros de altura debido a un fuerte campo *magnético*, de ahí su nombre: *maglev*. La velocidad media prevista, 500 kilómetros por hora, será un orden de magnitud superior a la máxima alcanzada por el *Rocket*. La resistencia del aire limitará la velocidad más que la potencia de los motores electromagnéticos. Se alcanzarán velocidades superiores a 800 kilómetros por hora y en túneles, con aire a baja presión, se cree que se podrán superar los 1.000 kilómetros por hora.

Para conseguir los fuertes campos magnéticos capaces de hacer levitar el tren hacen falta potentes electroimanes. La energía que se disiparía utilizando materiales conductores convencionales —cobre— haría el proyecto inviable. El descubrimiento de materiales superconductores —donde la disipación de energía es prácticamente nula— permiten que el *Maglev* sea una realidad. Dos trenes de este tipo están en proyecto; el primero, previsto para el año 2000, entre Tokio y Osaka, y el segundo, para el año 2005, entre Berlín y Hamburgo. Todas las bobinas de los electroimanes, para que sean superconductoras, deberán trabajar a una temperatura extremadamente baja, 4° K (−269 °C) —la temperatura del helio líquido—, lo que implica un alto coste de refrigeración y mantenimiento.

Recientemente, se han descubierto materiales que son superconductores a temperaturas menos bajas, alrededor de −150 °C. Ello permitirá refrigerar con nitrógeno líquido (−196 °C), que es muchísimo más barato que el helio líquido, haciendo más atractivo y viable el proyecto. El escollo que ha surgido está en la fabricación industrial de las bobinas superconductoras. Cuando se logre pasar de la es-

cala del laboratorio, cuando se sepan fabricar estos materiales a escala industrial, los supertrenes nos harán los viajes más cómodos; la ausencia de vías reducirá los ruidos y vibraciones, y la duración de los trayectos será mucho menor. La fabricación industrial de estos materiales superconductores —o, quizá, superconductores a temperatura ambiente— es un apasionante desafío para el futuro.

MATERIALES A MEDIDA

Ya es posible diseñar materiales a medida. Antes, se *seleccionaba* el material más adecuado que ofrecía la Naturaleza. Si no se encontraba, se *diseñaba empíricamente*; con ingenio. En la actualidad, ya se puede *diseñar*—con criterios racionales basados en la Ciencia de los Materiales— el material que se necesita. Aunque todavía se está lejos de tener soluciones para todos los casos, ya se ha trazado el camino a seguir en el futuro.

Para comentar estas ideas basta observar la evolución de un componente estructural. El ejemplo elegido es uno de los más simples: el *tendón*. Los primeros cables se tuvieron que fabricar con fibras naturales, *seleccionando* las más adecuadas. El buen resultado obtenido ha permitido a las cuerdas de yute o de cáñamo sobrevivir hasta nuestros días. Buscando otras prestaciones, se diseñaron los cables metálicos

imitando los tendones naturales y su fabricación fue posible gracias a la ductilidad de estos materiales. El progreso en el conocimiento de las relaciones entre la estructura de los materiales y sus propiedades ya permite *diseñar materiales nuevos* para fabricar tendones con unas prestaciones superiores a los cables de acero o las cuerdas de cáñamo.

Fibras materiales

Fibras seleccionadas

Hilar y tejer fueron unas de las primeras habilidades tecnológicas de los humanos. Los restos arqueológicos indican que nuestros antepasados tuvieron una técnica refinada y que, hasta cierto punto, controlaban las propiedades de los tejidos utilizando distintos materiales y procedimientos. Se sabe que hace más de 4.000 años ya se utilizaban las fibras proteínicas de los capullos de los gusanos de seda para tejer delicadas prendas. Las fibras empleadas se *seleccionaron* entre las fibras animales y vegetales disponibles: pelo y lana, cáñamo, lino o algodón, en regiones templadas, yute en la India y China, y pita en América Central.

Con las fibras se fabricaron cuerdas y tejidos. Las cuerdas se han usado en construcción para unir estructuras de madera y en puentes colgantes (figura 4), en el aparejo de barcos y en distintos tipos de armas: arcos, ballestas y ca-



Fig. 4.— Puente colgante fabricado con fibras vegetales.



Fig. 5.— Puente colgante fabricado con fibras metálicas. El puente de Verrazano (EE. UU.) —con una luz de 1.298 m— fue récord mundial de puentes colgantes desde 1964 hasta 1981 (foto de M. Elices).

tapultas. Los tejidos han sido, y todavía son, la base de la vestimenta. Para los pueblos nómadas, la tela es un elemento esencial en sus tiendas, y para los marinos, el material de sus velas. En estos últimos años, las fibras naturales se están revalorizando —los primeros *Levi's* llevaban fibra de cáñamo— y compiten con productos de prestaciones medias por su bajo coste, poco peso y facilidad de reciclado.

Fibras diseñadas empíricamente

La tendencia a imitar la naturaleza es, posiblemente, uno de los impulsos más primitivos de los seres humanos. Después de usar durante muchos siglos cuerdas fabricadas con fibras naturales y de haber aprendido a deformar los metales blandos —oro y cobre—, el siguiente paso fue la fabricación de cordones con hilos metálicos, al principio como adornos y después con fines más utilitarios. En nuestros días usamos hilos metálicos para casi todo y su contribución a la moderna civilización es tan discreta que suelen pasar casi desapercibidos. Sin los hilos metálicos, muchos de los logros de esta época —desde los ingenios espaciales, o la distribución de la electricidad, hasta el humilde muelle de un lapicero— no serían posibles.

La fabricación de hilos metálicos continuó de forma artesanal hasta bien entrada la revolución industrial. A principios del siglo XIX, la demanda de hilos de acero todavía era escasa. El uso de cables empezó a generalizarse a partir de 1850, pero su crecimiento estuvo obstaculizado por la gran cantidad de uniones que debían hacerse al ser pequeña la longitud de los alambres disponibles.

El puente de Brooklyn, abierto al tráfico en 1883 —considerado por los americanos de aquella época la octava maravilla del mundo, después del de Niágara que, para ellos, era la séptima—, estaba soportado por cuatro grandes cables de 400 mm de diámetro. Cada cable estaba formado por 19 cordones y cada cordón por 278 alambres. En total se utilizaron 24.000 km de alambre de acero. El 5 de abril de 1998 se abrió al tráfico el puente de Akashi Kaikyo, cerca de Kobe. Con una luz entre apoyos centrales de 1.990 m batió el récord mundial de puentes colgantes. Está soportado por dos grandes cables de 1 m de diámetro. Cada cable está formado por 290 cordones y cada cordón por 127 alambres de 5 mm de diámetro. Con el alambre utilizado se podría dar siete veces la vuelta al mundo. Esta proeza se ha conseguido, en parte, por la gran resistencia de los alambres de acero, más de 1.800 MPa (figura 5).

El hilo de acero es el elemento básico del cable. El proceso central en la fabricación del alambre es el *trefilado*, que va acompañado de una etapa previa de preparación y de una etapa posterior de acabado. Durante el trefilado, el alambre pasa a través de una hilera y sufre una deformación plástica brutal con el propósito de aumentar su límite elástico y carga de rotura.

Si se comparan las propiedades de los tendones obtenidos *seleccionando* fibras naturales —las cuerdas de cáñamo, por ejemplo— con los tendones *diseñados por intuición* —los cables de acero, en nuestro caso—, se observan ventajas y algunos inconvenientes; la resistencia de los cables de acero (1.000 MPa) es muy superior a la del cáñamo (85 MPa). También lo es la resistencia específica, aunque no tanto. (225 MN m/kg para el acero y 120 MN m/kg para el cáñamo). La energía elástica que son capaces de almacenar por unidad de volumen es, prácticamente, la misma (alrededor de 4 J/cm³). La deformación que pueden soportar hasta la rotura es mucho mayor en la cuerda de cáñamo (10 % frente al 1 %), lo cual puede ser una ventaja en algunos casos o un inconveniente para otras aplicaciones. Los cables de acero son más pesados (la densidad relativa es de 4 frente a 0,7), y ambos tendones se deterioran en ambientes húmedos; las cuerdas de cáñamo se pudren y los cables de acero se corroen. En el futuro, un diseño más racional —basado en un mejor conocimiento de los materiales— permitirá mejorar las propiedades y subsanar los inconvenientes.

Se está cerca de alcanzar el límite teórico de la resistencia en algunos materiales; en el hierro, por ejemplo, se cree que la resistencia a tracción puede llegar a 14.000 MPa y ya se han conseguido 5.000 MPa en hilos muy finos de acero trefilado. La Ciencia de los Materiales nos ha enseñado que la presencia de defectos en los cristales disminuye su resistencia. Cuando los cristales son muy pequeños —por ejemplo, las fibras cristalinas llamadas *whiskers*— es más difícil que tengan defectos, y se ha comprobado que estos microcristales son enormemente resistentes. La forma de aprovechar las excelentes propiedades de las fibras es fabricando un material compuesto, arropándolas en una matriz adecuada. El diseño de materiales compuestos para fines determinados será, en el futuro, una de las principales actividades del ingeniero de materiales.

Fibras diseñadas científicamente

El nilón puede considerarse la primera fibra *diseñada científicamente*. Es una poliamida inventada por Wallace Carothers en 1934, cuando trabajaba en los laboratorios de I+D de Du Pont tratando de imitar las fibras de seda. No le había encontrado ninguna aplicación y lo arrinconó dentro de un bote en el almacén, aunque se había dado cuenta de que si se introducía la punta de una varilla de vidrio dentro del bote y después se extraía, se formaban unos filamentos de apariencia sedosa. Un día en el que Carothers no estaba en el laboratorio, Julian Hill y otros químicos del equipo intentaron ver lo lejos que se podía

llegar estirando uno de estos hilos; tomaron una pequeña cantidad del producto en una varilla de vidrio y, corriendo por el vestíbulo, estiraron el filamento formando una larga fibra. En este momento se dieron cuenta de las posibilidades del polímero.

El estirado en frío del polímero produce una reorientación de las cadenas de poliamida aumentando considerablemente su resistencia a 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 la Du Pont puso en el mercado.

En la Feria Mundial de Nueva York de 1939, se lanzó al mercado la fibra de nilón. Du Pont hizo la presentación del nuevo producto diciendo que se había sintetizado a partir de *carbón, aire y agua*, y que era tan fuerte como el acero. Esta frase se interpretó por las mujeres que estaban presentes en el auditorio como si las medias de nilón fueran indestructibles e interrumpieron el discurso con un fuerte aplauso. Junto a la sala de conferencias había una atractiva modelo dentro de un gigantesco tubo de ensayo mostrando muy visiblemente sus nuevas medias. Cuando se ofrecieron a la venta, por primera vez, las medias de nilón —el 15 de mayo de 1940 en Nueva York—, se vendieron cuatro millones de pares en las primeras cinco horas.

En 1988, el avión del vuelo 104 de Pan Am explotó en el aire cuando volaba sobre Lockerbie (Escocia) debido a una bomba dentro de una maleta. Los 270 pasajeros probablemente estarían vivos si el compartimento de equipajes hubiera estado protegido con paneles de *Kevlar*.

El *Kevlar* es otra fibra *diseñada científicamente* con la que se fabrican chalecos antibala. El Ministerio de Defensa británico (DERA) lleva gastados más de 1.250 millones de pesetas para conocer hasta qué punto se puede proteger un avión frente a estos atentados y ha realizado pruebas con aviones en el laboratorio que tiene en Fort Halstead. Los resultados indican que los paneles de *Kevlar* pueden deformarse, sin romperse, y absorber la metralla. Para proteger un avión comercial se necesitarían tres toneladas de *Kevlar*, con un sobrecurso en combustible de unos 9 millones de pesetas al año.

Las fibras *Kevlar* y *Spectra* son dos ejemplos de diseño basado en la Ciencia de los Materiales. El *Kevlar* es el nombre comercial (Du Pont, 1968) de las fibras sintéticas de aramida y *Spectra* es el nombre comercial (Dutch State Mines, 1984) de unas fibras especiales de polietileno. Si se compara la resistencia de estas fibras con las tradicionales, se observa que es muy superior a la de las fibras naturales y similar a la del acero; la resistencia del *Kevlar 49* es de 3.100 MPa, la de *Spectra 900* es de 2.600 MPa, el algodón y el nilón sólo tienen una resistencia de alrededor de 600 MPa, y la de un cable fino de acero (la cuerda de piano) puede llegar a 3.000 MPa. El mó-

dulo de elasticidad también es alto en estas fibras artificiales: unos 120 GPa para las dos fibras comentadas y menos de 10 GPa para el algodón y el nilón.

La clave para entender las excepcionales prestaciones de estas fibras, en particular los grandes valores de la resistencia y módulo de elasticidad, está en el alto grado de orientación de las cadenas del polímero. Una fibra con todas las cadenas orientadas paralelamente al eje es mucho más resistente y rígida que otra con las cadenas sin una orientación preferente.

La flexibilidad de las cadenas alifáticas en el nilón favorece que se enreden y que el grado de alineación con el eje de la fibra no sea muy grande. En el *Kevlar*, por el contrario, las cadenas de aramida se comportan como varillas rígidas y al extrusionarlas a través de la hilera se alinean más fácilmente con el eje de la fibra (figura 6). Algo parecido ocurre con los espaguetis; es fácil alinear un mazo de espaguetis cuando están secos, sin cocinar. Si intentamos alinearlos cuando ya están servidos en el plato es casi imposible porque están blandos, son más flexibles y se enredan.

La gran resistencia de los enlaces carbono-carbono continúa excitando la imaginación de los ingenieros de materiales, que han encontrado en los *nanotubos* de carbono —uno de los jóvenes parientes de la molécula del fullereno— un candidato para la fibra ideal. Los nanotubos son variantes tubulares de la molécula esférica de 60 átomos de carbono. La gran resistencia de los nanotubos —que algunos investigadores cifran en uno o dos órdenes de magnitud superior a la de las mejores fibras conocidas— proviene de la estabilidad de los enlaces carbono-carbono y de la casi perfección de estos minúsculos cilindros. Las extraordinarias propiedades, electrónicas y mecánicas, auguran un futuro muy prometedor para estos nuevos materiales.

Materiales para electrónica

El diseño de materiales *a medida* es el objetivo final de la Ciencia de los Materiales. El *diseño* de fibras ha sido un ejemplo en el campo de los materiales estructurales. En el campo de la electrónica, la ingeniería de bandas (*band gap engineering*) nos ofrece otro 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 en serie. Variando la anchura de los pozos o la altura de las barreras, o graduando la cantidad de impurezas, se pueden conseguir dispositivos que respondan con más rapidez o que emitan radiación de una determinada longitud de onda y modificar la masa efectiva de los portadores de carga. En una palabra, fabricar materiales electrónicos «a medida».

LECCIONES PARA EL FUTURO

Los conocimientos logrados por la Ciencia de los Materiales ya permiten diseñar fibras sintéticas con muy al-

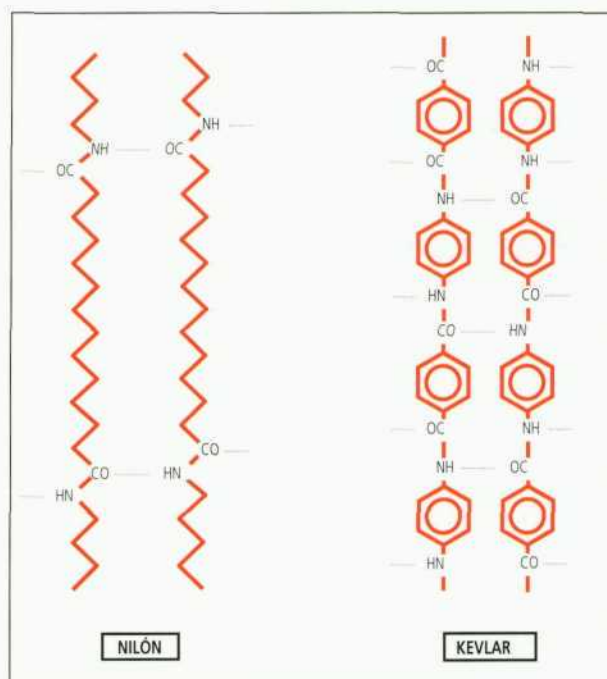


Fig. 6.— Estructura molecular (esquemática) de una fibra de una poliamida alifática (nilón) y de una poliamida aromática (*Kevlar*).

tas prestaciones; se fabrican fibras de polímeros, de materiales metálicos, o cerámicos, que se acercan a los valores teóricos de un cristal perfecto. Pero esto no es todo, porque un material —y las fibras, en particular— casi nunca desempeña una sola función; un material, además de resistente puede interesar que sea flexible (o rígido), transparente (u opaco), aislante (o conductor), que soporte temperaturas altas (o bajas), que sea reciclable o que posea otras características. Todo ello hace que el diseño se complique, porque se pretende concebir un material optimizando varias propiedades; este concepto de *multifuncionalidad* parece que tendrá una gran relevancia en el futuro. Otro aspecto, íntimamente ligado al material, es el de su *fabricación*; de poco sirve concebir un excelente material si después no se puede fabricar, o su producción no es rentable. Las tres caras de un material —*estructura, propiedades y fabricación*— están íntimamente relacionadas. La Naturaleza sigue siendo una buena fuente de inspiración para el diseño de materiales, y el hilo que fabrican las arañas es un paradigma de los tres aspectos anteriormente mencionados.

El hilo de seda de la tela de araña

Todas las arañas poseen glándulas que segregan hilos de seda para fabricar los capullos, descolgarse de un sitio a otro y tejer trampas (figura 7). Aunque tienen distintas clases de glándulas —que funcionan como si fueran hileras— capaces de producir distintos tipos de seda, todos los hilos son biopolímeros (el monómero es una proteína formada por una cadena de aminoácidos). El hilo de la araña *Nephila clavipes* que le sirve para descolgarse contiene una

proteína con un peso molecular de alrededor de 300.000. La transición de la seda desde el estado líquido –antes de ser hilada a través de la glándula– al hilo de seda sólido, no se conoce muy bien y es un paso tremendamente importante para la fabricación industrial de la fibra. Aparentemente, una parte de la proteína cambia de configuración durante este proceso, pasando de una estructura helicoidal (llamada tipo α), que es soluble en agua, a otra estructura en forma de una hoja plegada (llamada tipo β), que es insoluble. En algunas especies se cree que la transición se produce por causas mecánicas durante el paso a través de la hilera.

El hilo de seda de las arañas tiene un diámetro de aproximadamente una micra y posee una estructura que recuerda a los materiales compuestos. Está formado por una maraña de cadenas de aminoácidos –con estructura α – en la que están embebidos pequeños paquetes (cuyas dimensiones son de aproximadamente 10 nm) de cadenas ordenadas –con estructura β –. Estos paquetes se comportan como cristales y son los responsables de la rigidez de la fibra, mientras que las regiones amorfas le proporcionan la elasticidad.

La elasticidad de los hilos depende, también, del grado de humedad. Una fibra seca no puede deformarse más allá del 30% sin romperse, mientras que una fibra húmeda puede extenderse diez veces más. En muchas telas

de araña se puede comprobar que se utilizan hilos secos para fabricar el bastidor de la tela porque son más rígidos, y que los hilos húmedos, más deformables, se reservan para atrapar las presas.

Las propiedades mecánicas de estos hilos de seda son impresionantes cuando se comparan con las de otras fibras de altas prestaciones, como el *Kevlar 49* o el hilo de acero: la resistencia para los dos últimos está alrededor de 3.000 MPa y la resistencia del hilo de la araña *Araneus* alcanza 5.000 MPa. Además, es mucho más flexible; el módulo de elasticidad inicial vale alrededor de 10 GPa, mientras que los módulos para el *Kevlar* y el acero son 120 GPa y 210 GPa, respectivamente. Gracias a estos dos atributos, su capacidad para almacenar energía elástica es enorme; 100 kJ/kg para el hilo de araña frente a 30 kJ/kg del *Kevlar* y 1 kJ/kg para el acero. Esta propiedad no es de extrañar porque la tela de araña debe ser capaz de soportar sin romperse el impacto de un insecto. Se ha dicho que si se pudiera fabricar una red de pesca con hilo de araña, se podría cazar un avión en pleno vuelo sin romper la red.

Los hilos de la tela de araña tienen otras propiedades sorprendentes: las fibras de seda están protegidas por una especie de vaina –como en algunos cables y fibras ópticas– que tiene, entre otros cometidos, la misión de evitar que se dañe la superficie de la fibra. Una pequeña fisura su-



Fig. 7.– Una araña *Argiope* y su tela adornada con rocío (foto de M. Elices).

perficial disminuiría la capacidad resistente de la fibra; basta imaginar lo que sucedería si a un hilo de goma tirante se le hiciera un pequeño corte con una hoja de afeitar. El recubrimiento de los hilos radiales —que suelen mantenerse secos— es una fina capa de lípidos, mientras que los hilos de la espiral —los llamados hilos de captura que conviene que sean muy deformables— poseen un revestimiento acuoso. Las vainas también incorporan fungicidas y bactericidas para defender los hilos contra bacterias y hongos que podrían deleitarse con las nutritivas proteínas del recubrimiento. Esta cualidad antiséptica de la tela de araña podría justificar que se la usara antiguamente para vendar las heridas. Todas estas propiedades ilustran el concepto de *multifuncionalidad* que, sin duda, estará cada vez más presente en el diseño de nuevos materiales.

Los hilos de araña también nos pueden orientar sobre el otro aspecto mencionado anteriormente; la *fabricación* y el *reciclado* del material. Las arañas han desarrollado un procedimiento original para reciclar sus hilos, que, probablemente, se pueda imitar. Se ha observado que las proteínas de la seda de las telas de araña se reciclan. La araña *Araneus* antes de fabricar una nueva tela se come la antigua. Se han hecho experimentos marcando radiativamente un aminoácido de la proteína —la alanina, con tritio— y se ha observado que alrededor del 90 % de la radiactividad reaparece en la nueva tela. Puesto que esto ocurre al cabo de unos 30 minutos, o bien la seda de la tela antigua no se ha roto del todo por las enzimas digestivas, o los aminoácidos se absorben tan rápidamente por el epitelio glandular que muy pocos de ellos se utilizan para fabricar proteínas del cuerpo de la araña. En cualquier caso, parece ser que la araña *recicla* la seda con rapidez y que apenas la usa para su sustento.

La *fabricación*, en cantidades industriales, de seda de araña no es un problema sencillo, pero hay indicios de que está en vías de solución. Las arañas no se han podido domesticar, como los gusanos de seda, porque es muy difícil que crezcan juntas en cautividad, debido a que tienen una naturaleza solitaria y depredadora. Además, las telas de araña no se pueden devanar como se hace con los hilos de los capullos de seda. El camino que se sigue es: primero, identificar los genes de las arañas responsables de la fabricación de las proteínas de la seda; después sintetizar estos genes, y, finalmente, expresarlos en microorganismos o en plantas —girasoles, por ejemplo—. Si estas técnicas de bioingeniería tienen éxito, el siguiente paso será fabricar nuevos tipos de seda modificando los genes. No está muy lejano el día en que las humeantes fábricas de fibras se transformen en dorados campos de girasoles.

EPÍLOGO

La diversidad de materiales estructurales que nos ofrece la Naturaleza es el resultado de 4.000 millones de años de investigación y desarrollo. Casi siempre, estos materiales son *multifuncionales* e *inteligentes* —son tolerantes al daño y capaces de autorrepararse—, se *fabrican* en condiciones no agresivas —medios acuosos y a temperatura ambiente— y son *biodegradables*. La habilidad para apreciar las lecciones que nos enseña la Naturaleza ha progresado gracias a los avances de la Ciencia de los Materiales y de la Biología Molecular, y ya se pueden imitar —e incluso mejorar— algunos aspectos de los materiales biológicos. No obstante, estos materiales seguirán siendo una fuente de inspiración para las futuras generaciones.