

MATERIALES BIOLÓGICOS Y BIOMATERIALES

MANUEL ELICES CALAFAT
Real Academia de Ciencias

INTRODUCCIÓN

Los materiales biológicos son el resultado de un largo proceso evolutivo y nos muestran las historias que han tenido un final feliz después de 4.000 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 (Elices 2000a).

Los materiales biológicos son *multifuncionales*; exhiben simultáneamente varias propiedades. También son *inteligentes*, si por inteligentes entendemos que son capaces de reaccionar a los estímulos externos. Las antenas de los insectos poseen ambas cualidades; tienen una buena resistencia mecánica, pueden autorrepararse, son capaces de detectar información química y térmica, transmitirla a los centros de decisión, y realizar cambios de forma y posición de forma rápida y controlada. La supervivencia en la naturaleza depende de la habilidad para detectar lo que sucede en el exterior, integrar la información, predecir lo que pueda suceder y actuar en consecuencia.

Las técnicas de fabricación que usa la naturaleza no son agresivas para el medio ambiente; los procesos se efectúan en medios acuosos, a temperatura ambiente y, casi siempre, a presión atmosférica, condiciones muy distintas a las utilizadas por la industria química. Además, los materiales biológicos son *biodegradables*.

Para muchos lectores, los términos *biomaterial* y *materias biológicas* son sinónimos. Aparentemente, la posición del término *bio*—delante o detrás de la palabra *materia*—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 *materias biológicas* se sigue utilizando para cualquier material que proceda de un ser vivo. En esta breve nota se comentan dos materiales biológicos—las conchas de los moluscos y los hilos de seda de los gusanos y de las arañas—que han inspi-

rado el diseño de nuevos materiales de altas prestaciones y que, en algunas ocasiones, también han sido utilizados como biomateriales.

LOS MOLUSCOS NOS ENSEÑAN A DISEÑAR CERÁMICAS TENACES

Perlas y nácar: arquetipos de material nanolaminado

Se dice que los pescadores de perlas de Borneo retenían celosamente cada novena perla que encontraban y la guardaban, junto con dos granos de arroz, en una botella. Creían que estas perlas singulares podían reproducirse siempre que se tomaran las debidas precauciones; entre otras, que se utilizara como tapón para la botella el dedo de un hombre muerto.

La perla—el primer material biológico que se describe—ha sido una gema codiciada desde los tiempos más remotos porque, además de su rareza y origen misterioso, se le han atribuido poderes curativos, virtudes, símbolos y propiedades místicas.

En el lapidario de Alfonso X el Sabio podemos leer que la piedra llamada *aljófara* (nombre antiguo de la perla) ... «es muy buena, pues alivia mucho el temblor de corazón, y a los que son tristes o medrosos toda enfermedad que venga por melancolía, ya que limpia la sangre del corazón, esclarecela y quita la turbiedad toda de ella».

La perla es símbolo de la pureza, de la ingenuidad y de la belleza en la tradición cristiana, que también la llama *margarita* (posiblemente del persa *murwari*, que significa «hija de la luz»). Las imágenes de Santa Margarita de Antioquía, virgen y mártir emblemática de los primeros siglos del cristianismo, aparecen con frecuencia adornadas con un collar de perlas.

Los colores irisados de la luz reflejada por las perlas y el nácar de las conchas son, sin duda, otro de sus atractivos (figura 1). Ahora sabemos que este brillo especial—también llamado *oriente*—se debe a la interferencia de los rayos luminosos cuando atraviesan y se reflejan en las finas capas que, de forma semejante a una cebolla, forman la

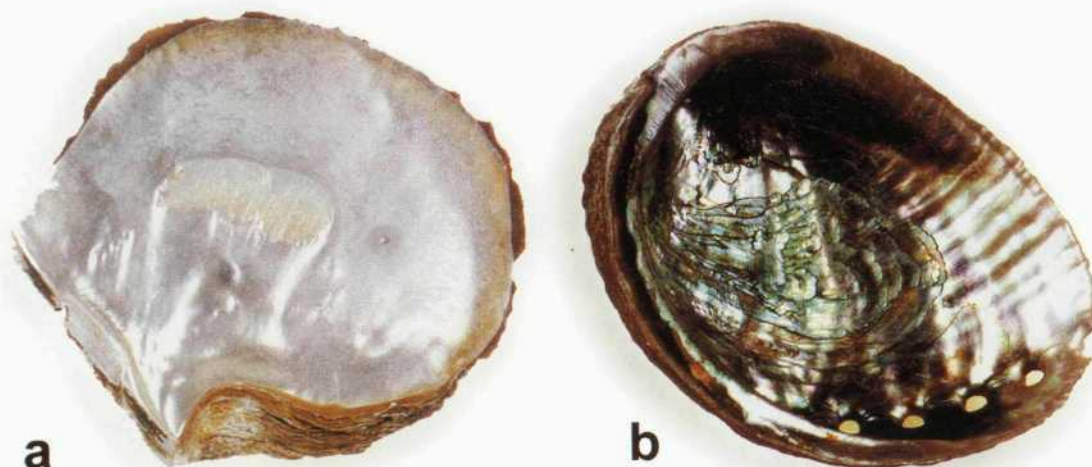


Fig 1.— Irisaciones del nácar de las conchas; a. En una madreperla (*Pinctada*). b. En una oreja de mar (*Haliotis*).

perla. Antiguamente, las explicaciones eran más poéticas; las perlas eran gotas de rocío celeste que había sido condensado y sus formas y colores dependían de la forma y colorido de las nubes, según que su nacimiento tuviera lugar durante un sereno amanecer o una radiante puesta de sol.

La cruda realidad es que la perla es la respuesta de un molusco a la irritación producida por un material que proviene del exterior de su concha. Para proteger sus delicados tejidos el molusco recubre el cuerpo extraño con finas capas de carbonato cálcico que son las responsables de su iridiscencia y de sus extraordinarias propiedades mecánicas.

Las conchas de los moluscos, y en particular el nácar, 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 por cien-

to es carbonato cálcico (en forma de aragonito o de calcita, según el tipo de molusco) y el resto, del 1 al 5 por ciento, 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.

La explicación de su gran resistencia a la rotura hay que buscarla en su microestructura formada por unos pequeños «ladrillos» de carbonato cálcico cementados con un «mortero» de proteínas y glicoproteínas (figura 2a). Las dimensiones de los ladrillos y de las juntas de mortero varían de unos moluscos a otros; para el nácar de la *Pinctada margaritifera* o del *Haliotis rufescens*, el espesor de los «ladrillos» puede variar entre 0.3 y 1.5 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) estando el tamaño de las otras dos dimensiones alrededor de las 10 μm . El espesor del «mortero» es mucho menor, del orden de los 10 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

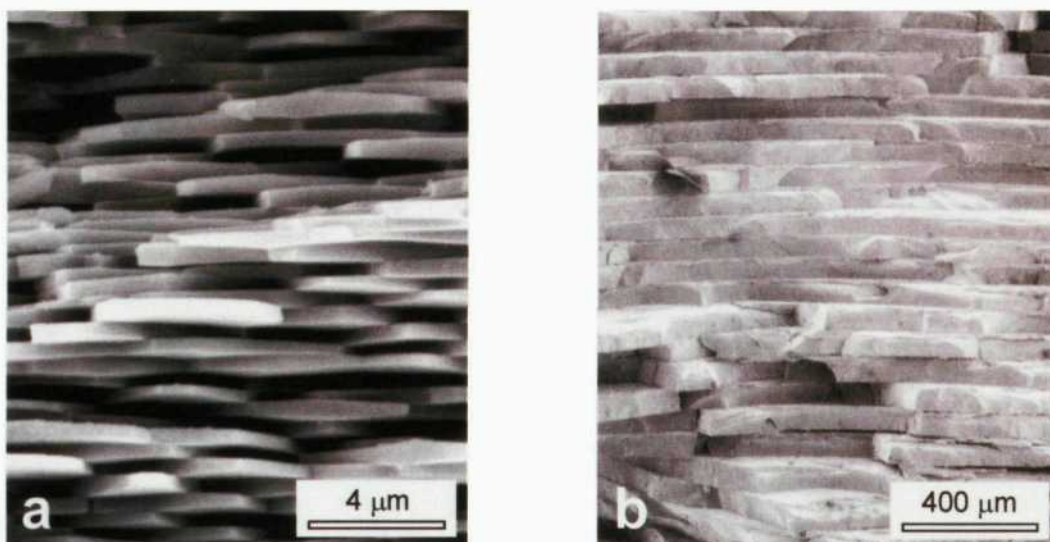


Fig. 2.— a) Microestructura del nácar; ladrillos de aragonito cementados con un mortero de proteínas. (Foto J.Y. Pastor). b) Microestructura de un material compuesto artificial; ladrillos de SiC cementados con grafito. (W.J. Clegg). (Nótese la diferencia de escalas).

La resistencia a la fractura —también llamada tenacidad— está relacionada con la dificultad que encuentran las grietas para propagarse; cuanto más cuesta, más resistente y tenaz es el material. Las conchas de los moluscos son muy tenaces porque hace falta gastar mucha energía para propagar una grieta en su seno; si estuvieran fabricadas solamente con cristales de aragonito haría falta una energía del orden de 1 J por cada metro cuadrado de grieta, pero al estar formadas por cristales de aragonito débilmente cementados por proteínas, la energía necesaria para romper un metro cuadrado se acerca a los 1000 J.

El aumento espectacular —casi tres órdenes de magnitud— de la energía de fractura de la concha se debe al camino mucho más largo y tortuoso que la grieta tiene que recorrer. Este camino se ha representado, de forma esquemática, en la figura 3. La calidad del pegamento que une los cristales es muy importante; si la unión es muy fuerte, la grieta pasa fácilmente de un cristal a otro (como se indica en el esquema *a* de la figura 3), si la unión es muy débil, el material se descompone fácilmente. El pegamento que utilizan los moluscos optimiza la fuerza de adhesión entre los cristales de aragonito para que la grieta siga un camino muy largo y tortuoso (esquema *b* de la figura 3). Estas ideas se reflejan en la figura 3, obtenida a partir de un modelo muy simple de un material laminado (similar a un millojas) en el que se varía la fuerza de cohesión entre las láminas. En el eje horizontal se ha representado la fuerza de cohesión entre las láminas y en el vertical el tamaño máximo de la grieta capaz de provocar la delaminación del material. Cuanto mayor sea este tamaño más tenaz será el material, al ser más fácil que la rotura se produzca por *delaminación* para un defecto inicial dado. Los cálculos se han hecho para un material sintético: nitruro de silicio cementado con nitruro de boro (Kovar et al. 1998).

Cerámicas tenaces inspiradas en las conchas de los moluscos

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.

El procedimiento directo y tradicional para fabricar materiales cerámicos reforzados consiste en mezclar la fibra con los polvos cerámicos, conformar y compactar la mezcla, y sinterizar la pieza. La experiencia demuestra que por esta ruta es difícil librarse de defectos internos. El proceso se puede mejorar mediante el prensado isostático en caliente, pero el coste aumenta y siguen apareciendo defectos. Otras técnicas más sofisticadas, como infiltrar una

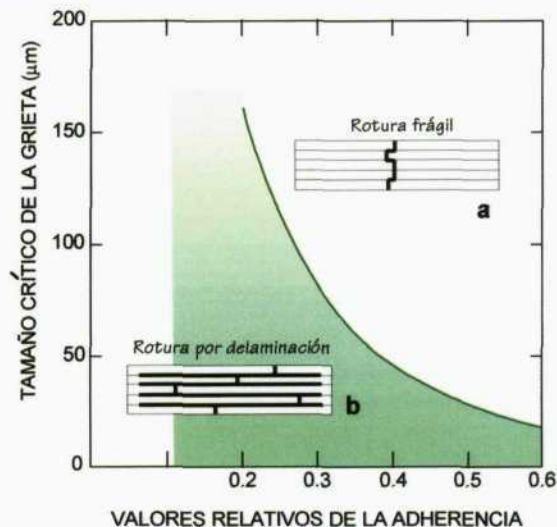


Fig. 3.— Tamaño máximo de la grieta capaz de producir una rotura por delaminación (que consume mucha energía) en función de la adhesión entre las láminas. (Cálculos para $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$, según Kovar et al. 1998).

preforma de fibras con un precursor cerámico en forma de gas, son lentas y caras.

Los moluscos han seguido otra estrategia para construir sus conchas; unir pequeñas placas cerámicas con un pegamento fino y débil. Hace unos años, J. Clegg y su equipo (1990) mostraron que, imitando a los moluscos, se podían producir materiales cerámicos tenaces por un procedimiento simple y barato. A partir de polvos cerámicos fabricaron pequeñas placas, a las que dieron un tratamiento superficial, las compactaron en la forma deseada y las sinterizaron sin presión.

Mediante esta técnica se han fabricado piezas de carburo de silicio (SiC) mucho más tenaces que las convencionales. A partir de plaquitas de SiC recubiertas con grafito se ha conseguido aumentar la tenacidad de fractura desde 4 hasta 18 $\text{MPa m}^{1/2}$, y que la energía de fractura pasara de 30 a 6000 Jm^{-2} . En este nuevo material el SiC hace el papel del aragonito y el grafito el del pegamento proteínico. La microestructura del material compuesto se muestra en la figura 2b y se compara con la microestructura, más fina, del nácar (figura 2a). El extraordinario aumento de la energía de fractura que se consigue imitando las conchas de los moluscos —tres órdenes de magnitud— se muestra en la figura 4.

Las cerámicas obtenidas por este procedimiento están especialmente indicadas en componentes que soportan fuertes sollicitaciones térmicas y bajas cargas mecánicas, porque son muy resistentes a la fatiga térmica. Una posible aplicación es el recubrimiento del sistema de combustión de turbinas de gas. Para muy altas temperaturas hace falta buscar una solución alternativa al grafito, ya que este material empieza a oxidarse a partir de 600 °C.

De nuevo, imitando los materiales biológicos se ha diseñado una segunda generación de cerámicas tenaces que resuelve algunos problemas anteriores; son las cerámicas

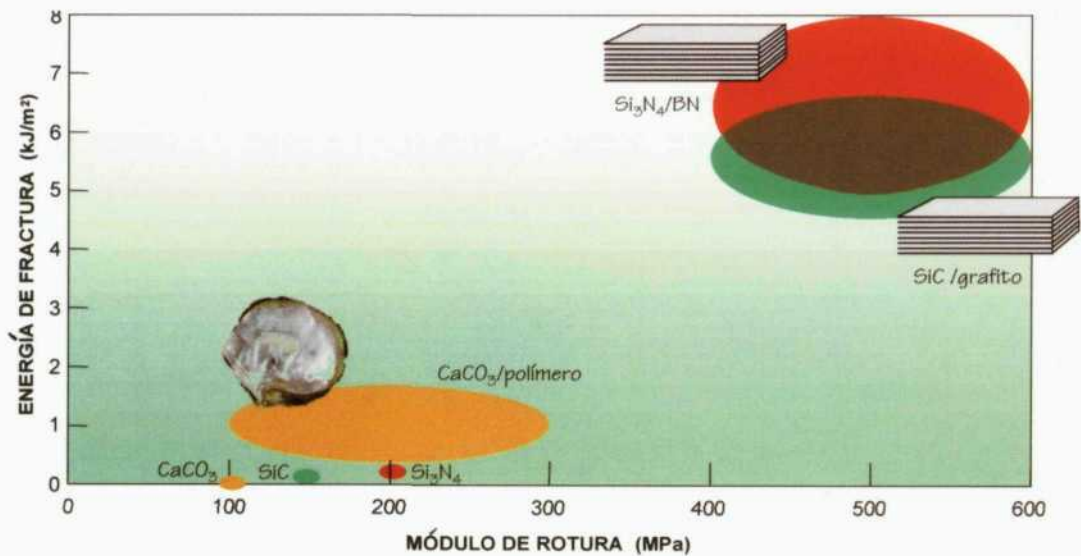


Fig. 4.— Las microestructuras laminares aumentan considerablemente la energía de fractura en comparación con el material de base: En las estructuras naturales la energía pasa de 1 J/m² (CaCO₃) a 1000 J/m² (CaCO₃/polímero). En las estructuras artificiales se pasa de 30 J/m² (SiC) hasta 6000 J/m² (SiC/grafito), o desde 100 J/m² (Si₃N₄) hasta 7000 J/m² (Si₃N₄/BN).

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 Si₃N₄—en forma de fibras de 250 μm de diámetro— están unidas por un «mortero» de nitruro de boro BN, de 10 a 20 μm de espesor. El módulo de rotura de este material es de 510 MPa a temperatura ambiente y de 290 MPa a 1300 °C. Los materiales laminados formados por placas de Si₃N₄ cementadas con BN, también exhiben un excelente comportamiento en fractura, como se indica en la figura 4, donde se puede apreciar un aumento de casi dos órdenes de magnitud con relación al Si₃N₄ monolítico.

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, soportar enormes presiones en las profundas chimeneas hidrotermales donde proliferan los moluscos, 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 (si exceptuamos aquéllos que viven en la profundidad del océano, en las chimeneas hidrotermales) utilizando técnicas de ingeniería biomolecular.

Si se quiere aprender más de las conchas de los moluscos hace falta contemplarlas desde nuevos puntos de vista, utilizar las herramientas de la biología molecular, la química de las proteínas, la físico-química de las superficies e intercaras, y entender cómo se ensamblan y crecen las macromoléculas (figura 5). Cuando se sepa cómo se forman estos nanomateriales biológicos se podrán diseñar cerámicas más tenaces y nuevos materiales con más altas prestaciones. Los conocimientos que se adquieran sobre biomineralización servirán para estudiar la formación de biocapas, para el diseño de intercaras en biomateriales y para comprender mejor y poder tratar la formación de piedras en el cuerpo humano. Esta información permitirá, también, diseñar arquitecturas inorgánicas complejas para catalizadores, filtros selectivos y tejidos para implantes, como se comentará más adelante.

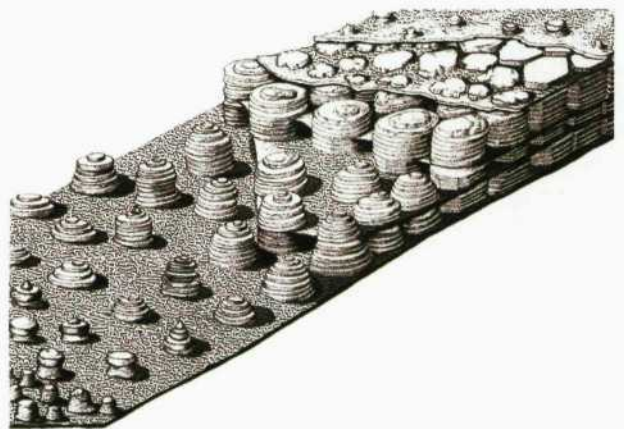


Fig. 5.— Diagrama esquemático (según von H.K. Erben) donde se indican las distintas etapas en la formación y crecimiento de las capas de nácar.

LOS GUSANOS DE SEDA Y LAS ARAÑAS NOS ENSEÑAN A FABRICAR FIBRAS DE ALTAS PRESTACIONES

Sedas naturales: arquetipo de ensamblaje molecular

Hace 4.640 años, según una leyenda china, la princesa Xi Ling Shi paseaba en su jardín con una taza de té en la mano. El azar quiso que el capullo de un gusano de seda cayera en su taza. Al intentar sacarlo, observó que podía obtener un delicado, lustroso e iridiscente hilo de la blanda masa formada por el calor de la infusión. Este accidente fue el origen del arte y de la industria de la seda. Los chinos habían descubierto cómo trabajar los capullos de los gusanos de seda para obtener una fibra más larga y brillante que cualquier otra fibra natural.

La mayoría de los gusanos de seda pertenecen a la especie domesticada *Bombyx mori* y producen seda durante una etapa de su ciclo vital. La hebra que hilan —moviendo su cabeza en forma de ocho— está formada por dos filamentos de fibroína recubiertos por una goma de sericina (figura 6). El diámetro de los filamentos es de unas 10 μm (el de un cabello humano es de unas 100 μm). Las fibras de seda se extraen de los capullos que previamente se han hervido en agua jabonosa para eliminar el recubrimiento de sericina. De cada capullo se obtienen entre 300 a 1.200 metros de fibra, teniendo el récord los japoneses que consiguieron, a principios del siglo XX, una variedad de gusano de seda cuyo capullo proporcionaba dos kilómetros de fibra. Para confeccionar una corbata hacen falta unos 100 capullos, 650 para una camisa y más de 3.000 para un kimono de calidad; para ello, los gusanos han de consumir unos 60 kilos de hojas de morera.

La seda, además de su lustre, tacto agradable y facilidad de tinción, posee unas propiedades mecánicas interesantes; tiene una resistencia a la rotura alrededor de

500 MPa (similar a la de los aceros utilizados en las estructuras metálicas. Las fibras de acero más resistentes, con diámetros de décimas de milímetro, alcanzan 3000 MPa), un alargamiento en el instante de la rotura del 20% (el acero de alta resistencia sólo alcanza valores del 1 al 3%), y un módulo de elasticidad de 10 GPa. Estas cifras, cuando se expresan por kilo de fibra y se comparan con las del acero resultan aún mucho más atractivas (tabla I).

FIBRAS	Resistencia (MPa)	Deformación hasta rotura (%)	Energía almacenada (kJ/kg)
Seda (<i>B. mori</i>)	500	20	40
Seda (<i>N. clavipes</i>)	1.200	30	130
Kevlar 49®	3.000	3	30
Acero (cuerda de piano)	3.000	2	4

(1 Pa = 1 N/m²; 1 MPa = 10⁶ Pa, 1 GPa = 10⁹ Pa)

La gran resistencia y el poco peso hicieron de la seda un material idóneo para fabricar paracaídas durante la Segunda Guerra Mundial. La fábrica de Macclesfield, en Inglaterra, producía ochocientos paracaídas por semana. Pronto entró en competencia el nilón pero, al principio, los paracaídas de nilón sólo los utilizaban las tripulaciones de los bombarderos porque abultaban mucho y resultaban incómodos para los pilotos de los pequeños aviones, como los Spitfire. La facilidad con que se doblan los tejidos de seda hizo que también se utilizaran en tiempos de guerra para confeccionar mapas; uno de 30 × 30 cm se podía empaquetar en una caja de cerillas. Mapas de seda de algunas regiones de Francia, Alemania o Suiza, con detalles de las carreteras y pueblos, todavía tienen cierta utilidad y son muy buscados por los coleccionistas.

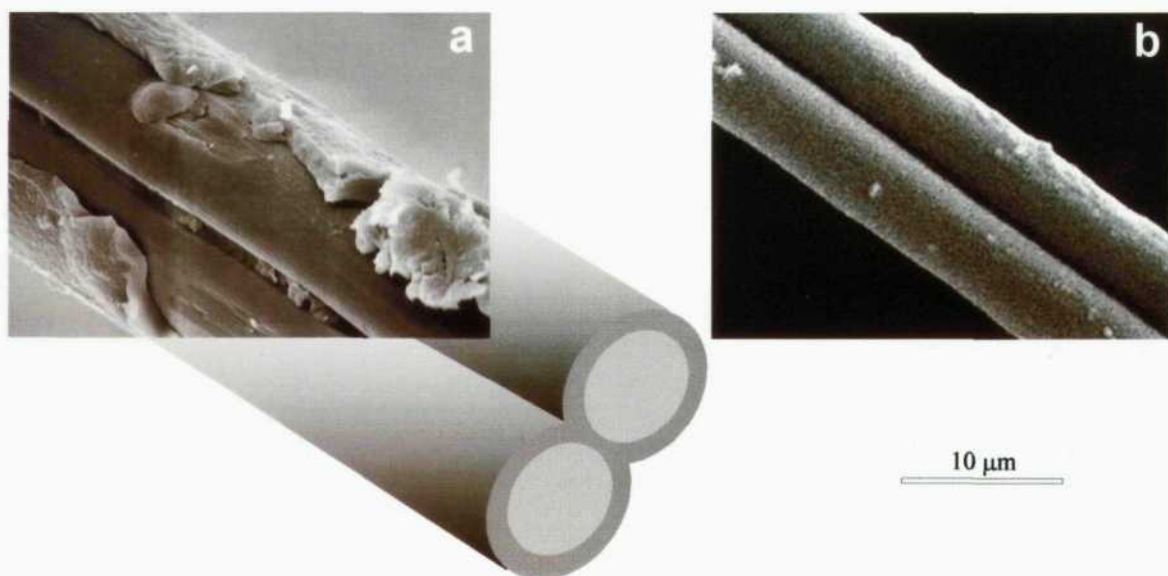


Fig. 6.— a) Hebra de seda del gusano *B. mori* formada por dos filamentos de fibroína recubiertos por sericina. b) Hebra de seda de la araña *Argiope* formada, también, por dos filamentos proteicos. (J. Pérez Rigueiro, J.M. Martínez).

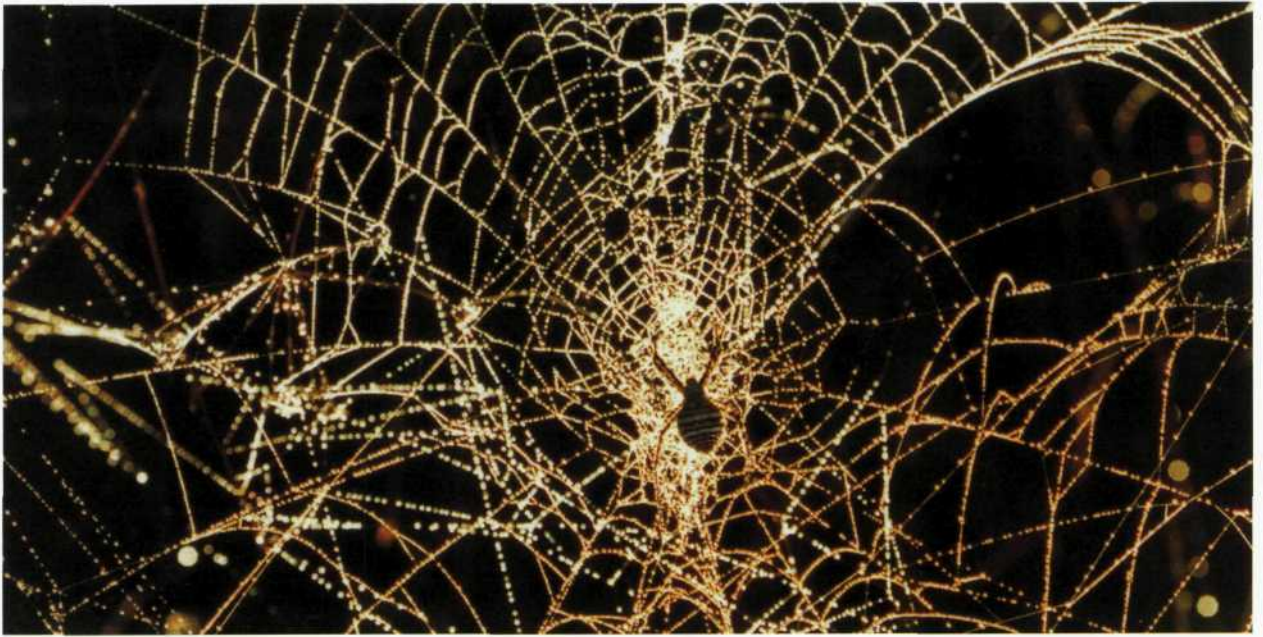


Fig. 7.– Nos asombra la belleza y precisión de una tela de araña, sobre todo si la observamos temprano por la mañana cuando está adornada con las rutilantes gotas de rocío.

No es de extrañar que este interesante material biológico haya despertado el interés de los pueblos a lo largo de la historia. Durante centenares de años los chinos guardaron celosamente el secreto de la sericultura; una ley imperial decretaba la muerte por tortura a los que lo revelaran. Pero con el paso del tiempo y el declinar del imperio el círculo de los que conocían los secretos de la lustrosa y sensual fibra se fue ensanchando. Hace 2.000 años la seda ya se conocía en Europa. Dos civilizaciones poderosas, Roma y China, reinaban en los dos extremos de la Ruta de la Seda, un puente de cultura y comercio.

Ya en tiempos del imperio romano, sólo los más opulentos se podían permitir el lujo de usar tejidos de seda, ligeros y transparentes, que hacían las delicias de hombres y mujeres. En su *Historia Natural*, Plinio hace la siguiente revelación: «Los primeros hombres que conocieron la seda fueron los séricos, famosos por la lana de sus bosques. Desprenden con agua la pelusa blanca adherida a las hojas, y de este modo nuestras mujeres ejecutan la doble tarea de separar los hilos y retejerlos: gracias a esta labor tan minuciosa desarrollada en tierras lejanas, las damas pueden aparecer en público con vestidos transparentes». Estos eran los vestidos indecentes que criticaron primero Séneca (siglo I) y después Solín (siglo III).

Hasta el siglo VI no se conocieron las técnicas de la sericultura en occidente. Procopio de Cesárea, en la *Guerra de los Godos*, relata: «Hacia esta época, unos monjes venidos de la India, al saber con qué celo se esforzaba el emperador Justiniano en impedir que los romanos comprasen la seda a los persas, fueron a hablar con el soberano y le prometieron encargarse de la fabricación de la seda. Ante estas palabras, el emperador les prometió grandes favores y les invitó a probar sus afirmaciones. Retornaron

pues a Serinda y llevaron los huevos a Bizancio; consiguieron transformarlos en gusanos y los alimentaron con hojas de morera; y después se comenzó a fabricar seda entre los romanos». Los dos monjes protagonizaron uno de los primeros casos conocidos de espionaje industrial.

La historia de la sericultura es apasionante pero nos aleja demasiado del propósito de este artículo. Además, hay otros tipos de seda que conviene comentar; se trata de la seda que fabrican las arañas. Los seres humanos contemplamos las arañas con una mezcla de recelo y admiración. Nos asombra la belleza y precisión de una tela de araña, sobre todo si la observamos temprano, por la mañana, cuando está adornada con las rutilantes gotas de rocío (figura 7). La seda de las arañas es, posiblemente, la fibra natural de más altas prestaciones mecánicas aunque hasta la fecha no se ha podido utilizar en la industria textil porque las arañas son de costumbres solitarias y predadoras, y no se han sabido domesticar como hicieron los chinos con los gusanos de seda. Hasta mediados del siglo XX los hilos de seda de la araña sólo se utilizaban para fabricar las retículas de los instrumentos ópticos. Los nativos de Nueva Guinea, Nuevas Hébridas y de la isla Salomón, han utilizado los hilos de seda de las arañas de la especie *Nephila* para fabricar redes y artificios para pescar, según describe el naturalista E. A. Pratt (1906) en su curioso libro *Dos años entre los caníbales de Nueva Guinea*. En 1709, Bon de Saint-Hilaire fabricó guantes y medias a partir de la seda de los sacos ovígenos, pero la Academia Francesa consideró que la industria de la seda basada en arañas nunca sería rentable. Trescientos años después, con la llegada de la biotecnología, se está reconsiderando la obtención industrial de las proteínas de la seda a partir de organismos genéticamente modificados.

Las propiedades mecánicas de los hilos de seda de las arañas son impresionantes cuando se comparan con los hilos de acero y con otras fibras de altas prestaciones, como el Kevlar 49 (DuPont): la tensión de rotura (fuerza de rotura dividida por la sección del hilo) para el acero y el Kevlar se sitúa alrededor de 3.000 MPa mientras que la del hilo de araña *Araneus gemmoides* puede alcanzar 4.000 MPa (Viney 2000). Los valores más normales están alrededor de 1.000 MPa (recuérdese que el hilo de seda del *Bombyx mori* llegaba a 500 MPa). Además, los hilos de seda de araña son más flexibles y pueden deformarse más del 30 % sin romperse. Estas dos propiedades –gran resistencia y deformabilidad– permiten que el hilo almacene una gran cantidad de energía antes de romperse; 130 kJ/kg para el hilo de araña, frente a 30 kJ/kg para el Kevlar y apenas 4 kJ/kg para el acero. Esta propiedad no es de extrañar ya que la tela de araña debe ser capaz de soportar sin romperse el impacto de un insecto. En la tabla se muestran algunas propiedades de los hilos de seda junto con las de otras fibras artificiales e hilos de acero, y en la figura 8 se han representado las curvas obtenidas en ensayos de tracción. El área encerrada bajo cada curva indica la capacidad de almacenar energía antes de romper el hilo.

La solución acuosa que dará origen a las hebras de seda –tanto en el gusano de seda como en las arañas– es una solución de cadenas proteínicas de forma globular, según la información proporcionada por resonancia magnética nuclear y espectroscopía Raman (Viney 2000). En las he-

bras aparece una estructura cristalina donde las cadenas proteínicas se ordenan en forma de hojas plegadas, conocidas como hojas β . La estructura de la hebra se puede modelizar como si fuera un material compuesto por microcristales de hojas β embebidos en una matriz amorfa de un polipéptido (figura 9). La fibroína de la seda de las arañas tiene una secuencia de aminoácidos menos regular que la de los gusanos de seda y esta podría ser la causa de que la seda de las arañas tenga una mayor proporción de material amorfo.

Los hilos de la tela de araña tienen otras propiedades sorprendentes: 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 que facilita su deformación. Además, los recubrimientos incorporan fungicidas y bactericidas que defienden 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. Entre otras propiedades curiosas, también se ha detectado un comportamiento piezoeléctrico de los hilos e interesantes propiedades ópticas; algunas telas de araña reflejan la luz ultravioleta y son verdaderas trampas para los insectos que se sienten atraídos por esas longitudes de onda mientras buscan alimento, apareamiento o un lugar para depositar sus huevos. Otras telas cambian de color según las estaciones para facilitar la captura de las

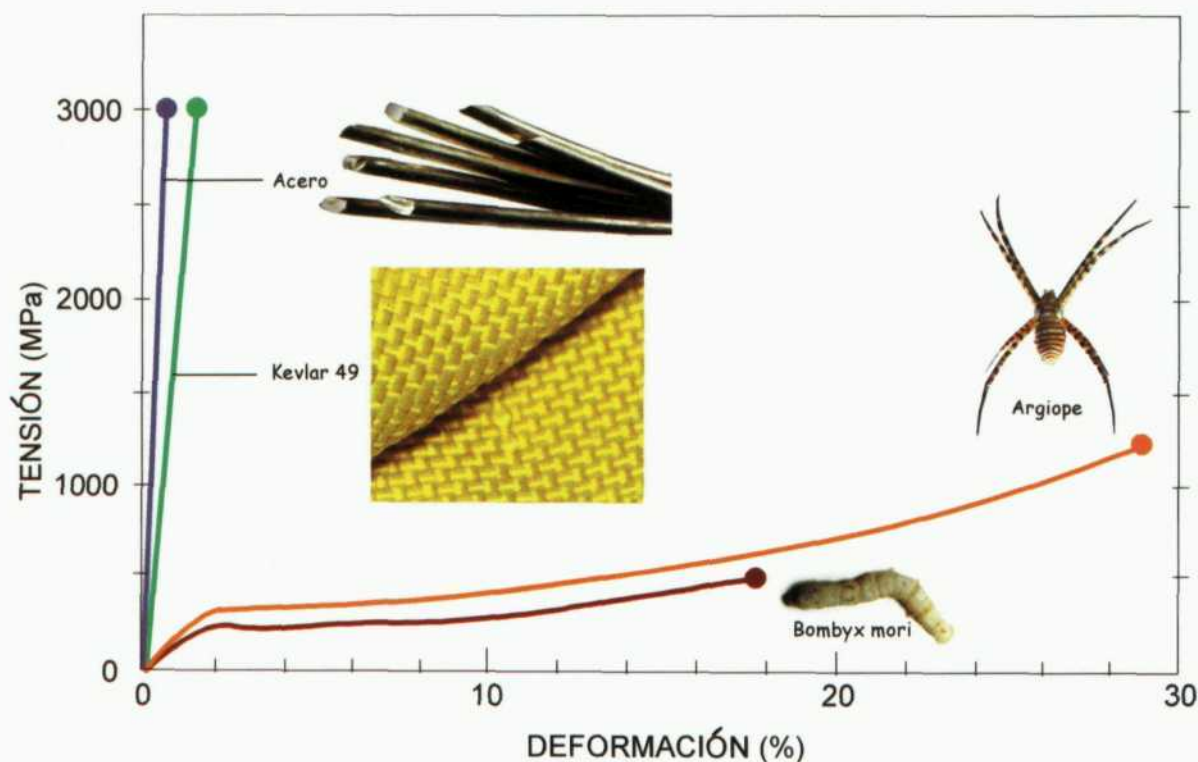


Fig. 8.— Ensayos de tracción correspondientes a distintos tipos de fibras. En la escala vertical se representa la tensión (fuerza/sección) y en la horizontal, la deformación (incremento de longitud/longitud).

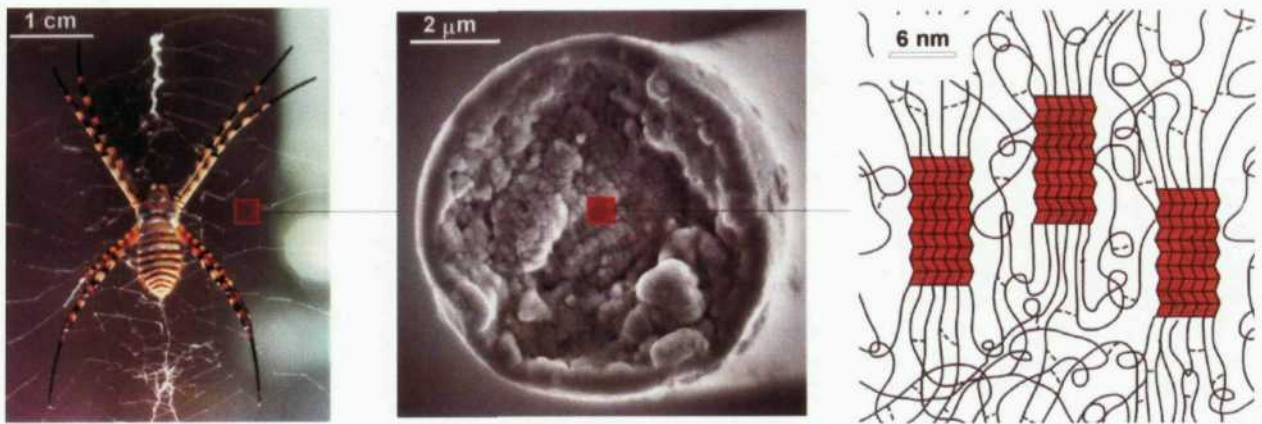


Fig. 9.— La microestructura del hilo de araña no se conoce aún con detalle. El material compuesto por microcristales de hojas β embebidos en una matriz amorfa, permite calcular propiedades mecánicas que coinciden bastante bien con los experimentos.

presas y para protegerse de los predadores. Todo este comportamiento polivalente ilustra el concepto de *multifuncionalidad*, casi siempre presente en los materiales biológicos, fruto de una estructura muy jerarquizada.

El hilado, o quizá con más propiedad el extrusionado, de la solución proteínica que dará lugar a las hebras de seda es un proceso muy ingenioso y todavía no bien conocido. Mediante este sistema, la solución concentrada (aproximadamente 30%) y viscosa almacenada en las glándulas se convierte en una fibra insoluble en agua. El proceso implica la formación de una fase de cristal-líquido, de baja viscosidad y sensible al esfuerzo cortante, a medida que se elimina el agua y aumenta la concentración. La información disponible (a partir de observaciones de *B. mori* y *N. clavipes*) sugiere que la fase formada es una solución de estructuras alargadas supramoleculares, ensambladas por agregación de las cadenas proteínicas globulares (Viney 2000).

A mediados del siglo XX empezaron a estudiarse los primeros cristales líquidos de origen polimérico y pronto surgieron patentes para fabricar sólidos a partir de estos exóticos materiales en la esperanza de haber encontrado la ruta para reproducir la compleja organización molecular típica de las estructuras biológicas. La euforia duró poco porque la arquitectura molecular de los materiales biológicos es escurridiza. La aparición de la química supramolecular y su extensión a los polímeros supramoleculares, a finales del siglo XX, ha despertado nuevas esperanzas en los intentos de ensamblar estructuras sofisticadas que pretenden mimetizar la compleja y jerárquica arquitectura de los materiales biológicos.

Fibras de altas prestaciones inspiradas en la seda

El interés por los hilos de seda de las arañas, o de los gusanos 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 treinta, 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 (Elices, 2000b). Las fibras de Kevlar, aparecidas a finales de los sesenta, también están basadas en un polímero con uniones peptídicas, pero con monómeros mucho más rígidos. Las técnicas para caracterizar las estructuras de los materiales han tenido un desarrollo considerable en la segunda mitad del siglo XX y han permitido empezar a entender las complejas estructuras de los materiales biológicos y, en consecuencia, comenzar a diseñar nuevos materiales inspirados en la naturaleza.

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 —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 autoensamblaje de las macromoléculas. A continuación se citan dos ejemplos, inspirados en las sedas del *Bombyx mori* y de la *Nephila clavipes*, donde se usan técnicas de biosíntesis y se concluye con unos comentarios sobre el interés de las técnicas de autoensamblaje.

La fibroína del *Bombyx mori* es un excelente modelo de proteína para estudiar cómo se pueden conseguir fibras de altas prestaciones hilando polímeros proteínicos. Los primeros resultados satisfactorios de polímeros sintéticos, parecidos a la seda del *B. mori*, se obtuvieron a finales de los años ochenta mediante fermentación de bacterias modificadas genéticamente (Ferrari et al., 1988). Para el diseño de estas sedas artificiales se tuvo en mente las secuencias de aminoácidos que suelen ir asociadas a la formación de hojas con estructura β en las sedas naturales y se escogió como monómero el hexapéptido (glicina-alanina-glicina-alanina-glicina-serina). El estudio de estos polímeros, por difracción de rayos X, confirmó la presencia de estructuras en hojas- β , semejantes a las detectadas en las sedas naturales procedentes de los capullos. Tirrell y su equipo (Tirrell et al., 1991) han genera-

lizado esta técnica y han fabricado una nueva familia de proteínas formadas por bloques de (glicina-alanina)_x, donde x es 3 o 6, separados por cortos fragmentos de (glicina-prolina-ácido glutámico) o de (glicina-ácido glutámico). Estos polímeros también pueden formar estructuras en forma de hojas- β , que se pliegan formando pequeños cristales. Se cree que la microestructura formada por estos pequeños cristales embebidos en una matriz amorfa del mismo polímero es, en gran parte, la responsable de las excelentes propiedades de los hilos de seda (Termonia, 2000).

También se han hecho intentos para fabricar hilos de seda de araña por vía biosintética. Entre los distintos tipos de hilos de seda que producen las arañas, el más resistente es el que hila la glándula mayor. Es el que se utiliza para fabricar los radios de la red y el que usa la araña como cordón de seguridad cuando se desplaza. Las etapas para fabricar la fibra son a grandes rasgos: diseño del polímero (a partir de las secuencias de la seda natural), síntesis química de los genes, introducción y expresión de los genes en microorganismos, aislamiento y purificación del polímero y, finalmente, «hilado» por extrusión de la solución proteínica.

El hilo de seguridad de la araña *Nephila clavipes* está formado por dos proteínas llamadas *spidroin 1* y *spidroin 2*. Las secuencias de los aminoácidos son bastante distintas entre las dos y también difieren de la proteína del gusano de seda. La *spidroin 1* está formada por una secuencia de 34 aminoácidos y la *spidroin 2* por una de 47, bastante rica en prolina (Lewis, 1992). Para los hilos de seguridad de otras arañas se han encontrado proteínas con secuencias parecidas, pero no iguales. La misma araña es capaz de fabricar proteínas con distintas secuencias según la finalidad del hilo, por ejemplo: la secuencia de aminoácidos para el hilo de seguridad—que necesita resistencia y tenacidad—es distinta de la del hilo circunferencial uti-

lizado para atrapar las presas—que debe ser más elástico—. Estas observaciones nos indican que es posible diseñar fibras con distintas prestaciones variando la secuencia de los aminoácidos. Todavía quedan muchos tipos de hilos de araña por explorar, pero parece claro que lo más interesante es conocer el idioma en el que las proteínas expresan su estructura y función.

Una vez decidida la secuencia de aminoácidos, el siguiente paso es la preparación de genes artificiales tratando de reproducir los aspectos más característicos de las proteínas naturales. Los primeros intentos de expresar los genes en la clásica bacteria *Escherichia coli* no fueron muy satisfactorios y, entre los distintos microorganismos candidatos, el grupo de DuPont ha obtenido resultados aceptables con la levadura *Pichia pastoris* (O'Brien et al. 1998).

El citado grupo de investigación, a partir de una solución acuosa de las proteínas sintéticas, obtuvo por extrusión una fibra de seda. Las fibras artificiales exhibieron unas propiedades mecánicas ligeramente inferiores a las de las naturales; la resistencia disminuyó y el módulo de elasticidad aumentó. Los datos publicados de la microestructura indican que el tamaño de los cristales es mayor en las fibras sintéticas y también el espaciamiento de las láminas- β (0.75 nm en las sintéticas y 0.53 nm en las naturales). Se cree que la diferencia de tamaño de los cristales puede ser una de las causas del inferior comportamiento de las fibras sintéticas, como se comenta en el párrafo siguiente.

Y. Termonia ha simulado numéricamente el comportamiento durante un ensayo de tracción de tres tipos de fibras ideales; una con pequeños cristales semejantes a los de la seda de *B. mori* ($2 \times 6 \times 21$ nm), la segunda con cristales con las mismas proporciones, pero tres veces más grandes, y la tercera con cristales más anchos que los primeros (figura 10). Los mayores valores de la resistencia y

INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y FORMA DE LA FASE CRISTALINA

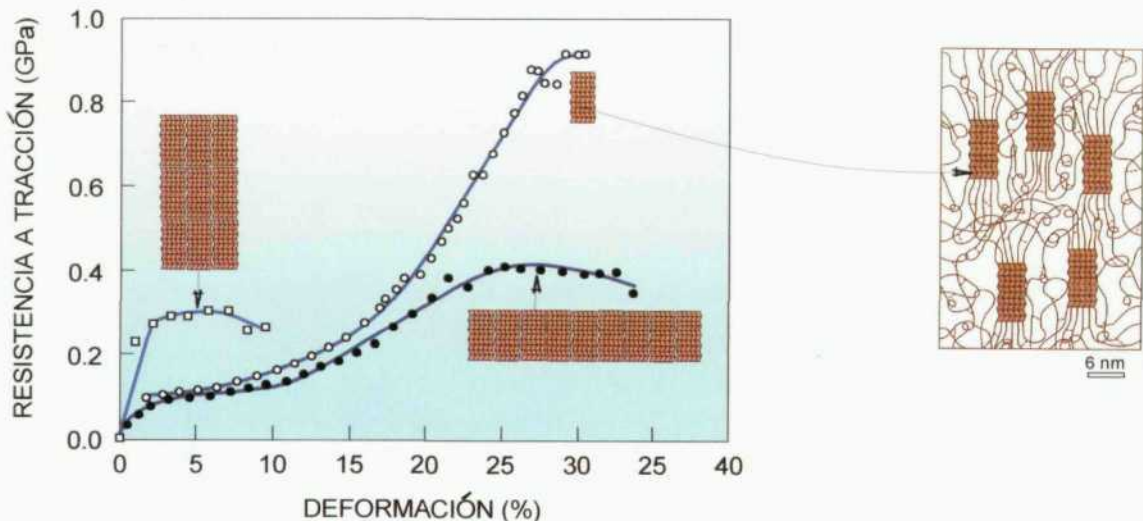


Fig. 10.— Simulación numérica del ensayo de tracción para tres microestructuras que difieren en el tamaño de los cristales. Los mejores resultados se obtienen con los cristales semejantes a los observados en la seda de *B. mori*. (Y. Termonia).

de la deformación los obtuvo con la primera fibra. Con la segunda, disminuyó la resistencia y la deformación, y con la tercera, la resistencia (Termonia 2000). Parece ser que la naturaleza ha optimizado las dimensiones de los cristales para conseguir fibras de seda muy elásticas y resistentes, pero es posible que estas propiedades puedan mejorarse en fibras sintéticas cuando se conozca mejor la microestructura de las sedas.

La diferencia entre los dos procesos de extrusión —el natural y el artificial— también podría ser la causa de la inferior calidad de las sedas artificiales. 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 procesamiento 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. A este nivel, el de los nanómetros (10^{-9} m), se espera que la nanotecnología produzca una fuerte sinergia entre la ingeniería y la biología. Con la biosíntesis de la seda, ya se ha dado el primer paso.

La siguiente etapa en la imitación de los materiales biológicos se basa en las técnicas de autoensamblaje. Las fuerzas que participan en este complejo proceso no son las tradicionales fuerzas de los enlaces covalentes, iónicos o metálicos, son más débiles y se corresponden con las fuerzas de los enlaces de hidrógeno, de van der Waals o fuerzas dipolares (también se las llama a todas ellas «interacciones supramoleculares»). La tensión superficial y la gravedad también intervienen en este proceso. Todas estas interacciones permiten la formación de agregados atómicos —mucho mayores que las moléculas convencionales— que posteriormente se agrupan en estructuras complejas con propiedades que no exhiben ni los componentes por separado, ni cuando se agrupan de forma más homogénea al formar cristales. Entre las propiedades emergentes de las estructuras autoensambladas puede aparecer la capacidad de autorrepararse y de reproducirse. El atractivo de las técnicas del autoensamblaje es evidente, porque permitirán la fabricación barata de estructuras complejas y de materiales inteligentes.

FUTURO DE LOS BIOMATERIALES:

ANDAMIOS ACOGEDORES E INTELIGENTES PARA IMPLANTES Y ÓRGANOS DE REPUESTO

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 ne-



Fig. 11.—Detalle de la mandíbula superior derecha del cráneo hallado en Essonne (siglo I o II d.C.). El implante dental de hierro se puede apreciar en la parte inferior de la imagen. (E. Crubézy et al., *Nature*).

crópolis Galo-Romana en Essonne, Francia, fue un hecho relevante que se publicó en la prestigiosa revista *Nature* (Crubézy et al., 1998).

Se trata de un implante de hierro en la posición del segundo premolar de la mandíbula superior derecha (figura 11). Corresponde a un hombre que falleció alrededor de los treinta 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.

De ser cierto este hallazgo, el éxito se debió a la confluencia de tres factores; un «cirujano» habilidoso, un «herrero» consumado y mucha «suerte». Estos factores siguen presentes en la nueva disciplina de los biomateriales, donde es preciso conjugar: ciencia básica (la «suerte» citada anteriormente en forma de Biología, Química y Física), ingeniería de materiales (el herrero) y práctica clínica (el cirujano).

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. La sustitución de la cabeza del fémur en personas mayores es una práctica común y para ello se utilizan materiales metálicos: acero y aleaciones de titanio. El inconveniente de estas prótesis es que tienen una vida media de diez o quince años antes de que se aflojen o se rompan. La solución ideal sería que el cuerpo fuera capaz de fabricar tejido óseo que, poco a poco, fuera regenerando el tejido dañado.

Antiguamente, al seleccionar biomateriales para implantes se intentaba que fueran inertes, que interacciona-

ran 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. Volviendo a los implantes óseos, 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 debe ser 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. Entre los primeros han tenido éxito los polímeros del ácido glicólico, del ácido láctico y los copolímeros de los dos. Todos son biocompatibles, permiten fabricar implantes con la misma forma que el tejido a reemplazar, y pueden ser suficientemente resistentes para mantener la forma hasta que haya crecido el nuevo tejido. También se puede controlar la velocidad de biodegradación para acompañarla a la de regeneración del implante. El inconveniente de estos polímeros sintéticos es la hidrofobia y la incapacidad para ser reconocidos por las células, lo que conduce a una adhesión celular pobre. Por el contrario, los polímeros naturales derivados del colágeno pueden interaccionar con las células y al ser hidrófilos se facilita, además, su siembra. Su mayor inconveniente es que los andamios contruidos con estos polímeros suelen ser muy blandos y es difícil darles la forma deseada para los implantes.

Parece lógico que el siguiente paso sea la fabricación de armazones híbridos a partir de polímeros biodegradables sintéticos y naturales. Siguiendo esta idea se ha experimentado con biomateriales híbridos—formados por fibras de colágeno embebidas en una matriz de un polímero del ácido láctico— para reconstrucción de tendones y ligamentos (Dunn et al., 1997). Otro tipo de andamiaje híbrido, poroso y biodegradable, se ha conseguido alojando microesponjas de colágeno en los poros de una esponja de poliéster (Chen et al., 1999). La resistencia y la relación superficie/volumen para las células transplantadas, son mayores en este material que en las esponjas por separado.

Algún día, estos biomateriales permitirán reemplazar la mayoría de los componentes estructurales del cuerpo humano: huesos, ligamentos, piel y arterias. También pro-

porcionarán armazones biodegradables para reparar tejidos y órganos. Se utilizarán para encapsular drogas y liberarlas en el lugar adecuado, sin efectos secundarios durante el trayecto. Todos estos logros pueden darnos una imagen del cuerpo humano como si fuera una máquina compleja en la que las partes defectuosas se podrán reparar, o cambiar por piezas guardadas en un almacén. Es más, puede parecer una visión un tanto fría e inquietante del futuro; hasta puede evocar reminiscencias de Frankenstein. Pero en la actualidad, con el progreso de la Ciencia de los Materiales, de la Biología Molecular y de la Ingeniería Genética, este panorama es realista y debe ser reconocido y considerado. Además, al aumentar cada día las posibilidades de curar y reparar tejidos y órganos enfermos o debilitados, la sociedad deberá preguntarse con más frecuencia lo que es deseable, o aceptable, y lo que no lo es. Estas consideraciones se salen del marco de los biomateriales, pero son preguntas que surgirán de este campo y que la comunidad médica y la sociedad tendrán que encarar porque el progreso científico no se realiza en el vacío.

CONSIDERACIONES FINALES. BIOMATERIALES A PARTIR DE MATERIALES BIOLÓGICOS

Evelyn López, Gerard Atlan y sus colaboradores, en París y Montpellier, han utilizado el *nácar* del molusco *Pinctada maxima* como biomaterial; lo han molido finamente y lo han 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* (Atlan et al. 1997).

¿Qué tienen en común el *nácar* y el hueso para que puedan engañar 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, deben tener en común parte 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.

Nuestros antepasados ya intuyeron la utilización del *nácar* como biomaterial. En 1931 se descubrió un fragmento de mandíbula, de la civilización Maya, con implantes dentales hechos de *nácar* y las radiografías mostraron que las

raíces de los implantes se integraron bien en el hueso. El descubrimiento lo realizó el matrimonio de arqueólogos Popenoe durante una excavación en la Playa de los Muertos, en el valle de Ulloa en Honduras. La mandíbula, fechada alrededor del año 600 d. C., perteneció a una joven de unos 20 años. En ella se implantaron tres incisivos de nácar y, al principio, se creyó que se habían insertado después de haber fallecido la joven, pero un detallado análisis por rayos X mostró que se había formado hueso compacto alrededor de los implantes (Bobbio 1972). Nuevamente, el poder de la intuición no deja de sorprendernos.

La seda de las arañas y de los gusanos de seda nos ofrece otro ejemplo de material biológico que puede utilizarse como biomaterial. En 1957 el Dr. 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 Dr. 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.

Las propiedades antisépticas, anteriormente mencionadas, de la seda de las arañas han inspirado el diseño de tejidos bacteriostáticos. Estos textiles contienen sustancias que regulan la multiplicación de las bacterias responsables de los malos olores y pueden ser de gran utilidad en la lucha contra las infecciones que se contraen en los hospitales. Los tejidos pueden actuar de dos formas: impidiendo que las bacterias proliferen, o bien protegiéndose ellos mismos de la degradación que les pueden originar las bacterias. Cuando las condiciones de temperatura y humedad son favorables, las bacterias y los hongos presentes en el aire, en el agua o en el suelo, colonizan los textiles, proliferan y son los responsables de su degradación. Algunos microorganismos liberan enzimas que degradan las fibras naturales y otros liberan pigmentos que las colorean. El olor característico a «cerrado» o a «húmedo» indica la presencia de hongos o de bacterias.

El diseño de un tejido antibacteriano ideal no es fácil; si los tejidos no están en contacto con la piel se pueden impregnar con bactericidas, pero cuando pueden estar en contacto con ella hay que limitar la proliferación de los microorganismos con bacteriostáticos que no destruyan la flora microbiana que vive naturalmente sobre la piel y la protege. Además de luchar contra las bacterias y los hongos microscópicos, el tejido ha de ser duradero y no perder sus propiedades después de numerosos lavados, tener un aspecto agradable y no ser muy caro, para ser competitivo. Tiene que ser compatible con los agentes impermeabilizantes, ignífugos y colorantes. También debe resistir la radiación ultravioleta. Hoy día no se dispone de un textil con todas estas características y los hilos de seda de las arañas nos pueden proporcionar una pista para conseguirlo.

Hasta un Rolls-Royce acaba parándose cuando alguna pieza deja de funcionar debido a una rotura o al desgase-

te. 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 se dispondrá de corazonas, riñones y pulmones que apenas se desgasten y que, de vez en cuando, tengan que pasar alguna revisión.

Russ R. Cianelli, en un artículo futurista (Cianelli, 2000), comenta que los biomateriales tendrán un gran porvenir en el mundo de los deportes y se imagina que, en el 2089, cuando el equipo de fútbol americano de los Gigantes de Nueva York fiche al *quarterback* por un billón de dólares, el contrato incluirá una cláusula que le obligue a estar operado de las rodillas y a que tenga dos implantes artificiales. Sospecha que, por aquellas fechas, las rodillas artificiales se fabricarán a partir de unos biomateriales con unas excelentes propiedades mecánicas y estarán provistas de sensores que permitirán que primero se rompan los componentes mecánicos antes de que se rasguen los ligamentos.

El entusiasmo que pueden despertar los materiales biológicos debe atemperarse con una apreciación realista de las limitaciones de la naturaleza. Las tecnologías que usa la naturaleza no son las que exhibiría si hubiera dispuesto de materiales y tiempo sin limitación alguna; por el contrario, ha tenido que desarrollarlas con las constricciones impuestas por la continuidad en la evolución, la restricción de materiales y una capacidad limitada para almacenar información. Por otra parte, los objetivos de la naturaleza no tienen por qué coincidir con los nuestros y los materiales biológicos no tienen por qué estar optimizados para el uso que les queremos dar, ni para el ambiente en que los queremos utilizar. Por último, estos materiales son el fruto de numerosos pequeños pasos a lo largo del camino de la evolución. Dificilmente podemos imaginar lo que acabaría siendo dentro de varios millones de años un prototipo recién fabricado con sus defectos iniciales, las imperfecciones son necesarias para evolucionar (Elices, 1994).

No obstante, la naturaleza siempre será una fuente de inspiración, aun cuando los procesos que utilice sean muy complejos o extremadamente lentos. Las conchas de los moluscos nos proporcionan, de nuevo, un ejemplo; se podría dudar de las ventajas que se obtendrían si fuéramos capaces de copiar el proceso de fabricación de las conchas, cuya velocidad de crecimiento es de apenas unos milímetros por año. Sin embargo, las conchas de los moluscos nos pueden proporcionar información valiosa sobre cómo diseñar la intercara entre el polímero orgánico y el material cerámico para conseguir un extraordinario valor de la tenacidad de fractura, superior en varios órdenes de magnitud a la del material cerámico. Incluso es posible que se pue-

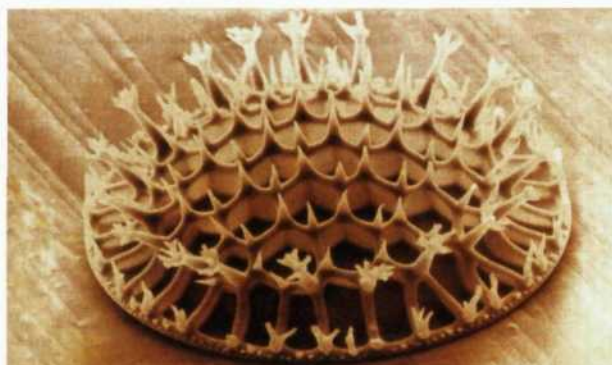


Fig. 12.— Delicada estructura de una diatomea no identificada. (Sedimento marino del Eoceno. Cortesía de C. W. Li y B. E. Volcani, *Phil. Trans.*).

da aumentar la velocidad de fabricación de la concha cuando se entienda bien el proceso, si se tiene en cuenta que la velocidad de fabricación de las conchas de los huevos en las aves (otro material compuesto de cerámica y polímero) es dos órdenes de magnitud mayor.

En conclusión, aunque la evolución no siempre haya optimizado las propiedades de los materiales biológicos en aquellos aspectos que nos puedan interesar, con frecuencia podemos aprender de ellos copiando alguna de sus peculiaridades. Las delicadas filigranas de los esqueletos de las diatomeas y radiolarios, chocan con la idea intuitiva de que las estructuras fabricadas con materiales inorgánicos son rígidas y simples (figura 12). Observando los materiales biológicos siempre encontraremos la inspiración para innovar. En la naturaleza hay un montón de patentes escondidas.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a Gustavo V. Guinea sus valiosos comentarios al manuscrito, a José Miguel Martínez por la ayuda prestada en las figuras y a Rosa María Morera por la esmerada elaboración del texto.

BIBLIOGRAFÍA

- ATLAN, G., BALMAIN, N., BERLAND, S., VIDAL, B., LÓPEZ, E.: «Reconstruction of Human Maxillary Defects with Nacre Powder: Histological Evidence of Bone Regeneration», *C.R. Acad. Sci. Paris/Life Sci.*, 320, págs. 253-258, 1997.
- BASKARAN, S., NUNN, S. D., POPOVIC, D., HALLO-
RAN, J. W.: «Fibrous Monolithic Ceramics», *J. Am. Ceram. Soc.*, 76, págs. 2209-2224, y 77, págs. 1249-1262, 1993-1994.
- BOBBIO, A.: «The First Endosseous Alloplastic Implant in the History of Man», *Bull. Hist. Dent.*, 20, págs. 1-6, 1972.
- CLEGG, W. J., KENDALL, K., ALFORD, N. M., BUT-
TON, T. W., BIRCHALL, J. D.: «A Simple Way to Make Tough Ceramics», *Nature*, 347, págs. 455-457, 1990.
- CRUBÉZY, E., MURAIL, P., GIRARD, L., BERNADOU, J. P.: «False Teeth of the Roman World», *Nature*, 391, pág. 29, 1998. Véase, también, BECKER, M. J.: «A Roman "Implant" Reconsidered», *Nature*, 394, pág. 534, 1998.
- CHEN, G., USHIDA, T., TATEISHI, T.: «Fabrication of PLGA-Collagen Hybrid Sponge», *Chem. Lett.*, 58, págs. 561-562, 1999.
- CHIANELLI, R. R.: «Materials Science 2100?», *MRS Bulletin*, 25(9), págs. 25-58, 2000.
- DUNN, M. G., BELLINCAMPI, L. D., TRIA, A. J., ZAWADSKY, J. P.: «Preliminary Development of a Collagen-PLA Composite for ACL Reconstruction», *J. Appl. Polym. Sci.*, 63, págs. 1423-1428, 1997.
- ELICES, M.: *Sobre la necesidad de las imperfecciones*, capítulo 5, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1994.
- —: *Structural Biological Materials: Design and Structure-Property Relationships*, Pergamon, Elsevier Science, 2000a.
- —: «De las cuerdas de cáñamo a los hilos de araña», en Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, *Horizontes culturales. Las fronteras de la ciencia*, Espasa Calpe, Madrid, 2000b, págs. 1-10.
- ERBEN, H. K.: «On the Formation and Growth of Nacre», *Biomaterialization*, 4, págs. 15-46, 1972.
- FERRARI, F. A., RICHARDSON, C., CHAMBERS, J., CHAUSEY, J., POLLOCK, S. C.: *World Patent Application WO 88/03533*, 1998.
- HYDE, N.: «The Queen of Textiles», *Nat. Geographic*, 165, págs. 2-49, 1984.
- KOVAR, D., THOULESS, M. D., HALLORAN, J. W.: «Crack Deflection and Propagation in Layered Silicon Nitride/Boron Nitride Ceramics», *J. Am. Ceram. Soc.*, 81, págs. 1004-1012, 1998.
- LEWIS, R. V.: «Spider Silk: The Unravelling of a Mystery», *Acc. Chem. Res.*, 25, págs. 392-398, 1992.
- LI, C. W., VOLCANI, B. E.: «Aspects of Silicification in Wall Morphogenesis of Diatoms», *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 304, págs. 519-528, 1984.
- O'BRIEN, J. P., FAHNESTOCK, S. R., TERMONIA, Y., GARDNER, K. H.: «Nylons from Nature: Synthetic Analogs to Spider Silk», *Adv. Mater.*, 10, págs. 1185-1195, 1998.
- PRATT, E. A.: *Two Years among New Guinea Cannibals*, Feeley & Co., London, 1906.
- TERMONIA, Y.: «Modeling of the Stress-Strain Behaviour of Spider Dragline», capítulo 11 de *Structural Biological Materials* (M. Elices, ed.), Pergamon, Elsevier Science, 2000.
- TIRRELL, D. A., FOURNIER, M. J., MASXON, T. L.: «Genetic Engineering of Polymeric Materials», *MRS Bulletin*, 16, págs. 23-28, 1991.
- VINEY, C.: «Silk Fibers: Origins, Nature and Consequences of Structure», capítulo 10 de *Structural Biological Materials* (M. Elices, ed.), Pergamon, Elsevier Science, 2000.