



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Grao en Bioloxía

Memoria do Traballo de Fin de Grao

Revisión bibliográfica

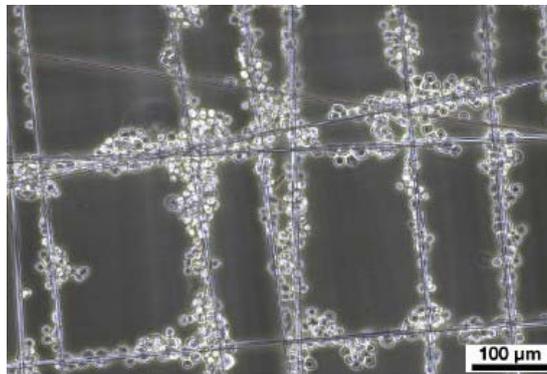
Propiedades mecánicas y aplicabilidade de las sedas de araña

Revisión bibliográfica

Propiedades mecánicas e aplicabilidade das sedas de araña

Literature review

Mechanical properties and applicability of spider silks



Nerea Alvite Bergara
Junio, 2021

Directores académicos:

Oscar Cabeza Gras

Montserrat Domínguez Pérez



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA y
CIENCIAS DE LA TIERRA

D. Oscar Cabeza Gras y **Dña. Montserrat Domínguez Pérez** autorizan la presentación del trabajo de fin de grado **“Propiedades mecánicas y aplicabilidad de las sedas de araña”** presentado por **Nerea Alvite Bergara** para su defensa ante el tribunal calificador.

Dr. Oscar Cabeza Gras

Dra. Montserrat Domínguez Pérez

En A Coruña a 21 de junio de 2021

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Las arañas	1
1.2 Las telas de araña	2
1.3 Sedas de las telas de araña	4
1.3.1 La dragalina	5
1.4 Tejido de las telas de araña	6
1.5 Propiedades mecánicas de las sedas y sus aplicaciones	7
1.5.1 Definición de las magnitudes físicas	7
1.5.2 Propiedades mecánicas de las sedas	10
1.5.3 Aplicaciones de las sedas de araña	10
2. OBJETIVOS	11
3. MÉTODOS DE BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA	11
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	11
4.1 Propiedades mecánicas de las sedas de araña	11
4.2 Comparación de las propiedades mecánicas de las sedas con otros materiales .	14
5. APLICACIONES	16
5.1 Fibras sintéticas	16
5.2 Fibras textiles	17
5.3 Biomedicina	17
5.3.1 Hidrogeles y esponjas porosas	17
5.3.2 Microcápsulas	18
6. CONCLUSIONES / CONCLUSIÓNS / CONCLUSIONS / ONDORIOAK	18
7. BIBLIOGRAFÍA	19
ANEXO	26

RESUMEN

Las sedas de araña son fibras proteicas que forman algunas especies de araneidos para diversas funciones como la caza, la formación de ootecas o la construcción de refugios. Se componen por fibrillas rodeadas de un core que las mantiene unidas, y esta estructura les confiere unas excepcionales propiedades mecánicas, como son la elevada elasticidad, alta resistencia a la tracción y una remarcable tenacidad. Según la función que van a desempeñar, las arañas pueden tejer diferentes tipos de sedas con diferentes propiedades gracias a las distintas glándulas que poseen. Este material está siendo muy estudiado en diversos ámbitos debido a sus características, además, se están desarrollando sedas artificiales, aunque no se ha conseguido que tengan las mismas propiedades que las naturales. En esta revisión se describirán las propiedades mecánicas más remarcables de algunos tipos de sedas y se relacionarán con las diferentes aplicaciones que tienen en los ámbitos de la biotecnología y la biomedicina.

Palabras clave

Arañas, sedas de araña, propiedades mecánicas, biomedicina

RESUMO

As sedas de araña son fibras proteicas que forman algunhas especies de araneidos para diversas funcións como a caza, a formación de ootecas ou a construción de refuxios. Están compostas por fibrillas rodeadas por un core que as mantén unidas, e esta estrutura dalles propiedades mecánicas excepcionais, como son a elevada elasticidade, alta resistencia á tracción e unha notable tenacidade. Dependendo do papel que xoguen, as arañas poden tecer diferentes tipos de sedas con diversas propiedades, grazas ás distintas glándulas que teñen. Este material, está sendo amplamente estudado en varios ámbitos debido ás súas características, ademais, están a desenvolverse sedas artificiais, aínda que non foron capaces de ter as mesmas propiedades que as naturais. Nesta revisión, describiranse as propiedades mecánicas máis notables dalgúns tipos de sedas e relacionaranse coas diferentes aplicacións que teñen nos ámbitos da bioteconloxía e a biomedicina.

Palabras clave

Arañas, fíos de araña, propiedades mecánicas, biomedicina

ABSTRACT

Some species of araneids form protein fibers called spider silk, for various functions such as hunting or the construction of ootheca and shelters. Spider silk is made of fibrils surrounded by a core that holds them together. This structure gives them exceptional mechanical properties, such as high elasticity, high tensile strength and a remarkable toughness. Depending on the role they are going to play, spiders can weave different types of silk with different properties thanks to the divergent glands. This material is being highly studied in various fields due to its characteristics. In addition, artificial silks are being developed, although they have not been able to have the same properties as natural ones. In this review, the most remarkable mechanical properties of some types of silks will be described and related to the different applications they have in the fields of biotechnology and biomedicine.

Key words

Spiders, spider silk, mechanical properties, biomedicine

LABURPENA

Armiarma hariak, especie batzuk sortzen dituzten proteina zuntzak dira, hauek ehizatzeo, arrautzen kaxa edo aterpetxea egiteko erabiltzen dituzte. Elkari eusten dion nukleo batez inturatutako zuntz txikiagoez osatuta daude hariak. Era berean, egitura honek aparteko propietate mekanikoak ematen dizkie hariei; elastikotasun, trakzio-erresistentzia eta gogortasun handiak, adibidez. Guruin desberdinei esker, armiarmek, hari mota desberdinak ehundu ditzakete funtzio desberdinetarako. Gaur egun, harien ezaugarri buruz ikerketa asko egiten ari dira. Gainera, armiarma hari artifizialak sortzen ari dira, izan ere, momentuz, ez da lortu naturalen ezaugarri berdinak edukitzea. Berrikuspen honetan, hari mota batzuen propietate garrantzitsuenak deskribatuko dira eta bioteknologian eta biomedikuntzan izan ditzaketen aplikazioekin erlazionatuko dira.

Hitz-gakoak

Armiarmak, armiarma haria, propietate mekanikoak, biomedikuntza

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Las arañas

Las arañas forman el orden Araneae dentro de la clase de los arácnidos. Estos se clasifican dentro del subfilo Chelicerata que a su vez está dentro del filo de los artrópodos (Menéndez, n.d.). Hoy en día, hay 49.171 especies de arañas descritas (World Spider Catalog, 2021) dentro de este orden y se clasifican en 110 familias (Soler, 2017).

El orden Araneae se caracteriza por poseer unos apéndices modificados llamados hileras, ubicadas en la parte posterior del cuerpo (Selden et al., 2008) que están conectadas a las glándulas de la seda. Como se muestra en la figura 1, estas se disponen por pares en la parte ventral y encontramos hileras media y laterales (Molinero, 2013). En 1989 se describió una hilera de la especie *Attercopus fimbriunguis* datadas en el Devónico medio (hace 386 millones de años). Esta se considera la evidencia más antigua de las arañas, así mismo también es la primera evidencia del uso de la seda por animales (Selden et al., 2008).

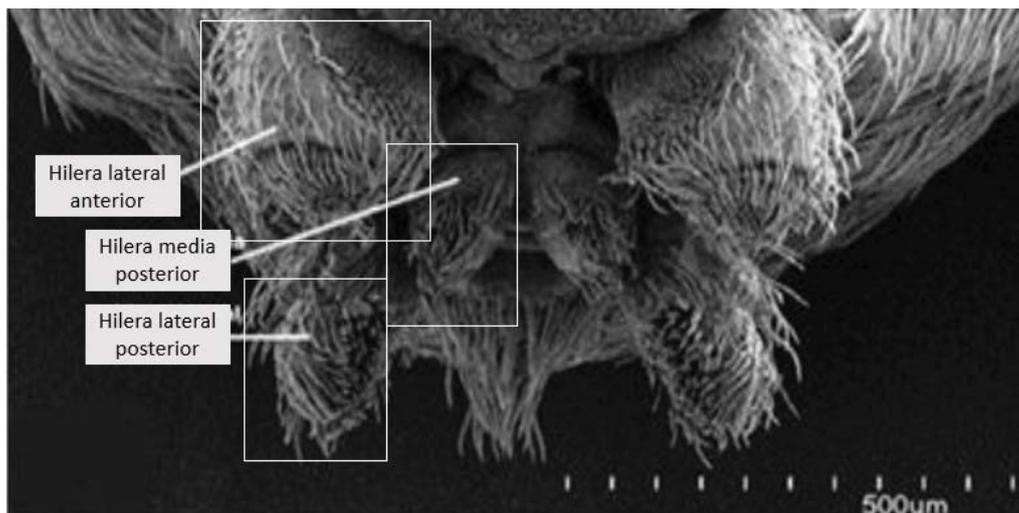


Figura 1. Estructura macroscópica de las hileras (Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) o Scanning Electron Microscope (SEM)). Imagen de (Molinero, 2013).

El orden de las arañas se divide en dos subórdenes principales (figura 2), por un lado, tenemos el suborden Mesothelae, donde encontramos la familia Liphistiidae que se compone de 8 géneros según el Catálogo Mundial de Arañas y es la única familia superviviente de este suborden (Bond et al., 2014; *World Spider Catalog*, 2021; Xin et al., 2015). Por otro lado, tenemos el suborden Opisthothelae, en la que se encuentra el resto de arañas (Bond et al., 2014).

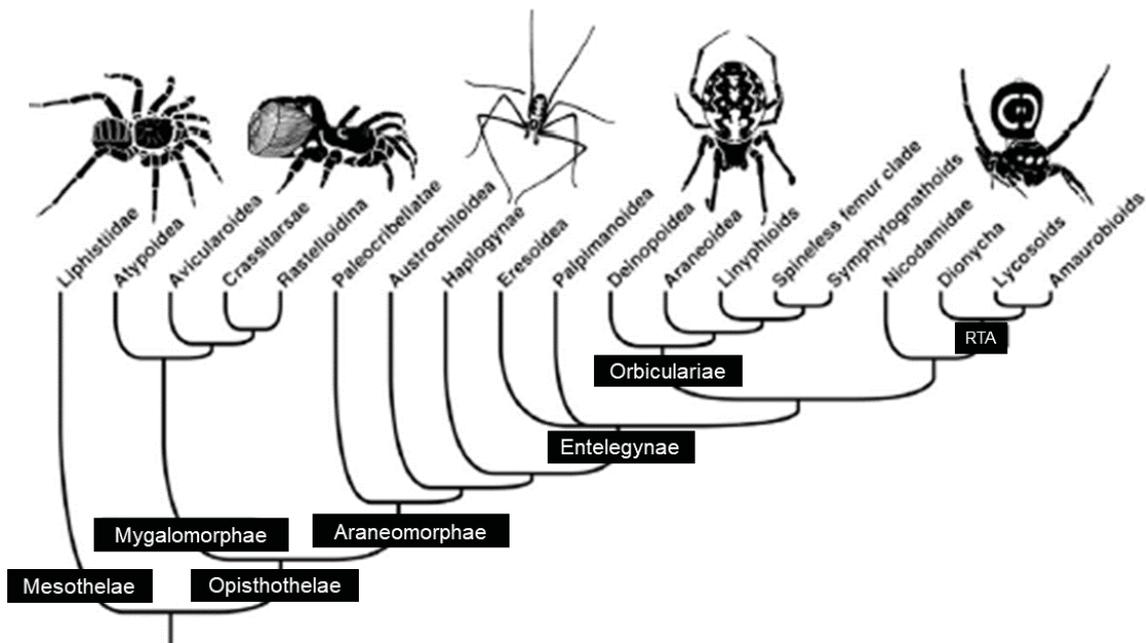


Figura 2. Relación filogenética entre algunas de las familias que pertenecen al orden Araneae (Bond et al., 2014).

1.2 Las telas de araña

Alrededor de 4000 especies de arañas tejen telas de araña (Soler, 2017). Estas, son estructuras que construyen a partir de las sedas y pueden exceder varias veces su tamaño corporal (Su et al., 2020). La mayoría, sin embargo, tejen seda, pero no construyen telas. Este es el caso de la familia Lycosidae, como se observa en la figura 2, (a la que pertenecen las tarántulas), que no utiliza telas de araña para capturar a las presas, ya que caza de manera activa (Lee & Yeargan, 2008). Además, estas arañas, excavan en el suelo para crear refugios para vivir. Así mismo, las arañas que sí que las tejen, han adaptado sus telas para sobrevivir en diferentes ambientes y condiciones ambientales (Su et al., 2018). Estas telas desempeñan diferentes funciones como cazar, protección (tanto de ellas mismas como de los huevos) y cortejo (Greco & Pugno, 2021; Miranda, 2015; Scott et al., 2018).

Existen diferentes formas de telas, como las que se muestran en la figura 3, y estas las clasificamos en dos grupos: bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) (Miranda, 2015). Las más comunes en la naturaleza son las de tres dimensiones (solo el 10% de las especies de arañas que construyen telas son bidimensionales (Harmer et al., 2011; Su et al., 2018)). Una de las ventajas de las telas de araña tridimensionales es que mientras a las arañas les proporcionan protección de otros depredadores, pueden cazar presas (Su & Buehler, 2020). Además, las telas en 3D son más robustas que las 2D, por lo que van a ser más duraderas (Su et al., 2020).

Sin embargo, la tela más estudiada es la tipo orbicular (2D) mostrada en la figura 3B (Babu, 2019; Miranda, 2015). Este tipo de tela está diseñada para cazar y, por lo tanto, debe ser resistente a fuerzas como el viento. Es por eso por lo que este tipo de tela posee las sedas de los radios más rígidos y con las espirales más elásticas, lo que les permite que alguna de estas últimas se rompa, ya que son más fáciles de reparar (Qin et al., 2015; Su et al., 2020).

El proceso de construcción de este tipo de tela es bastante complejo, como vemos en la figura 4. Al amanecer, las arañas recorren la zona en la que se encuentran, unidas a un hilo de vida o de seguridad que producen. Al encontrar un buen lugar, adhiere este hilo de seguridad a un sustrato y forma un puente (figura 4a). A continuación, la araña produce

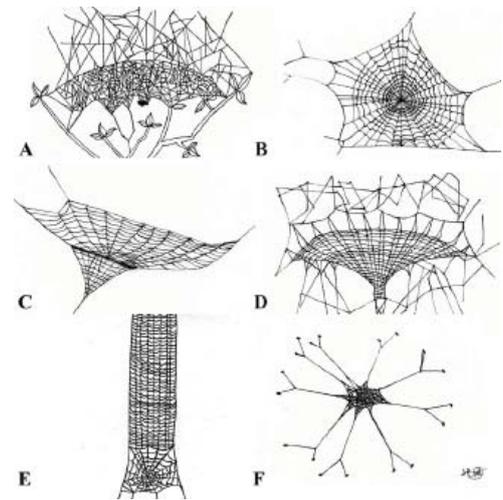


Figura 3. Diferentes tipos de telarañas. (A) Tela irregular (3D), (B) tela tipo orbicular (2D), (C) tela tipo orbicular con forma de embudo (3D), (D) tela tipo orbicular con forma de embudo y ejes irregulares (3D), (E) tela tipo orbicular alargada (2D) y (F) tela estrellada (3D). Imagen de (Martínez et al., 2015).

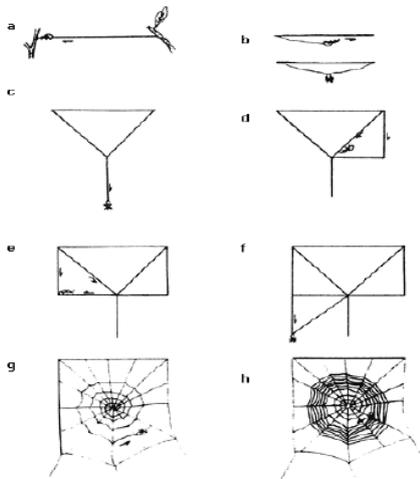


Figura 4. Construcción de una tela tipo orbicular. (a) construcción del puente, (b) formación del triángulo inicial, (c) descenso de la araña con el hilo de seguridad, (d,e,f) formación de los demás radios de la tela, (g,h) formación de las espirales de captura. Imagen de (Molinero, 2013).

una seda más larga que el puente, que parte de los dos extremos de este (figura 4b). La araña desciende gracias a su hilo de seguridad y lo engancha en un sustrato, formando así otro radio (figura 4c). A partir de esta estructura y gracias al hilo de vida, la araña sigue construyendo su tela (figura 4d, figura 4e y figura 4f). Finalmente, rellena la estructura con las espirales de captura (figura 4g y figura 4h). Al llegar la noche, algunas de las arañas que construyen estas telas orbiculares (por ejemplo Familia Araneidae) se comen su propia tela y al día siguiente volverán a elaborar otra tela (Molinero, 2013). Estas telas de tipo orbicular funcionan como redes y capturan insectos que vuelan a gran velocidad (Vollrath, 2000).

Los individuos pertenecientes a la familia Theridiidae, construyen telas de araña tridimensionales en las que las sedas se separan rápidamente del lugar donde están adheridas cuando una presa las toca. De esta manera, liberan la energía elástica que se encuentra almacenada en la telaraña (Argintean et al., 2006).

En el caso de que la presa sea pequeña, se queda suspendida enredada en las sedas. A medida que el tamaño va aumentando, las presas no se quedan completamente suspendidas y las arañas pueden usar seda para envolver a las presas y así inmovilizarlas (Greco & Pugno, 2021).

Otra de las funciones de las telas es la recepción de vibraciones, y gracias a ello, detectan a otros individuos cuando se posan en ellas y localizan en que parte se encuentran, además, también pueden distinguir entre presas, predadores y potenciales parejas reproductivas (Alencastre et al., 2016; Mortimer et al., 2018; Su et al., 2020). Esto es posible gracias a la estructura y propiedades de la seda de la que están formadas (Greco & Pugno, 2021).

Otra de las funciones, aunque menos estudiada, es la de la formación de telas para el cortejo. Se ha visto que los individuos macho, además de tejer telas para cazar o para su protección, producen seda y la pueden depositar sobre las telas de la hembra, sobre el cuerpo de la hembra, e incluso realizar regalos nupciales. Se piensa que estos comportamientos pueden tener un papel muy importante en la comunicación inter-sexual, ya que estos comportamientos aumentan el éxito reproductivo o reducen la posibilidad de que las crías de la hembra sean de otro macho (Scott et al., 2018).

1.3 Sedas de las telas de araña

Las sedas de araña son fibras proteicas filamentosas que producen las arañas y con estas pueden construir telas de araña, envolver a las presas, envolver los huevos o utilizarlas como hilo de vida (Greco & Pugno, 2021; Scott et al., 2018; Tokareva et al., 2014). En el caso de la especie *Nephila clavipes*, al eclosionar los huevos, las arañas juveniles permanecen 1 semana en el lugar donde nacieron y luego se dispersan y ya empiezan a tejer sus sedas (Moore, 1977).

Se conocen 7 tipos diferentes de sedas, y para producirlas las arañas presentan glándulas especializadas, como podemos observar en la figura 5: glándula ampulácea mayor, glándula ampulácea menor, glándula tubuliforme o cilíndrica, glándula flageliforme, glándula agregada, glándula piriforme y glándula actiniforme (Eisoldt et al., 2011; Tokareva et al., 2014).

Cada individuo solo posee algunas de las glándulas, nunca tendrán todos los tipos (Miranda, 2015). Por lo tanto, una araña puede llegar a fabricar varios tipos de seda con propiedades y funciones diferentes como vemos en la tabla 1 (Blackledge, 2012; Tokareva et al., 2014).

Los tipos de seda difieren en la composición, por lo que también varían sus propiedades mecánicas (Scheibel, 2004; Tokareva et al., 2014). Estas propiedades también varían interespecíficamente, intraespecíficamente e incluso individualmente y esto ocurre porque las

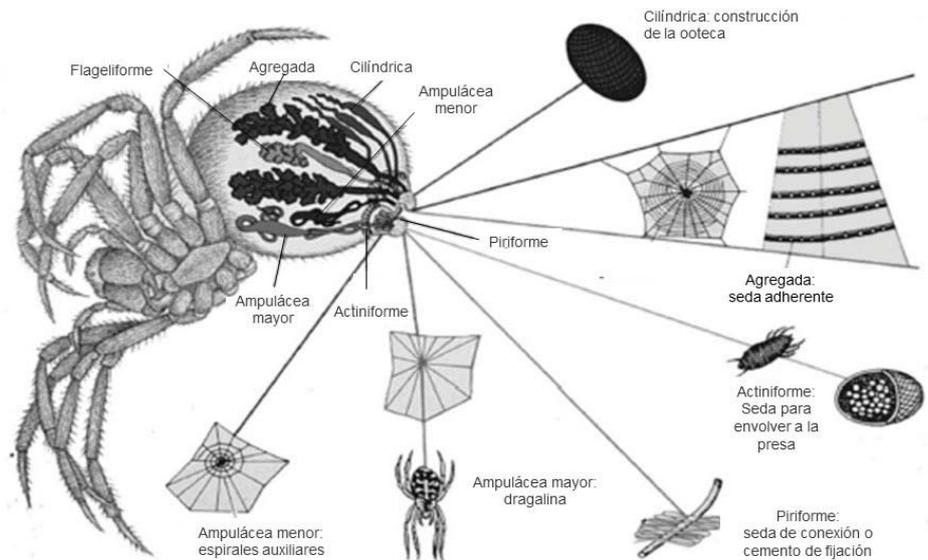


Figura 5. Representación gráfica de las diferentes glándulas y diferentes sedas de araña, así como sus funciones. Modificada de (Vollrath, 2000).

propiedades vienen determinadas por la estructura molecular (desde la secuencia de aminoácidos hasta la tela de araña), el proceso de formación de la seda e incluso el ambiente en el que se tejen (Dicko et al., 2008; Heim et al., 2009; Madsen et al., 1999; Su & Buehler, 2020).

Tabla 1. Glándulas que producen diferentes tipos de seda y sus usos. Modificada de (Babu, 2019; Miranda, 2015)

Tipo de glándula	Tipo de seda	Abreviatura	Función de la seda
Ampulácea mayor	Dragalina	SAM	Hilo de seguridad y marco y radios
Ampulácea menor	Espirales auxiliares	SIM	Refuerzo de la dragalina
Piriforme	Seda piriforme	SPI	Seda de conexión o cemento de fijación
Actiniforme	Seda actiniforme	SACT	Seda para envolver a la presa
Cilíndrica o tubuliforme	Seda tubuliforme	SCI	Construcción de la ooteca
Agregada	Seda agregada	SAG	Seda adherente
Flageliforme	Seda flageliforme o espirales de captura	SFLAG	Espirales de captura

1.3.1 La dragalina

El tipo de seda más estudiado es la dragalina y es producida a partir de dos proteínas, Espidroínas 1 y 2 de la Glándula Ampulácea Mayor (MaSp1 y MaSp2) (Eisoldt et al., 2011; Scheibel, 2004; Tokareva et al., 2014). Suele formar los radios y marcos de la tela de araña tipo orbicular (Eisoldt et al., 2011; Miranda, 2015), así como el hilo o línea de vida del que se cuelgan (Agnarsson et al., 2010). Esta variedad de seda es uno de los materiales más resistentes que conocemos (es como mínimo un 50% más resistente que las otras fibras

de las arañas (Blackledge & Hayashi, 2006)). Está siendo motivo de estudio, ya que, presenta unas propiedades físicas inusuales en la naturaleza.

Las cadenas de aminoácidos que conforman las sedas pueden tomar dos tipos de conformaciones secundarias como vemos en la figura 6. Por un lado tendríamos una región amorfa que conformarían las espirales β , y por otro lado otra región que se pliega formando láminas de cristales β unidos por enlaces de hidrogeno (Boutry & Blackledge, 2010; Su & Buehler, 2016). Estas conformaciones son importantes ya que son las que les confieren las propiedades físicas a las sedas. Las espirales β (regiones amorfas) aportan elasticidad y las láminas de cristales β confieren la resistencia (Su et al., 2020; Su & Buehler, 2016). Por lo tanto, las propiedades físicas que tienen las sedas de las arañas vienen determinadas

por la proporción entre láminas de cristales β y de espirales β , así como de los cambios químicos, fuerzas aplicadas por las arañas y condiciones ambientales. Las fibrillas forman el núcleo o core de la seda y están recubiertas por un recubrimiento o parte exterior que está formada por lípidos y glucoproteínas (Blackledge, 2012; Saravanan, 2006).

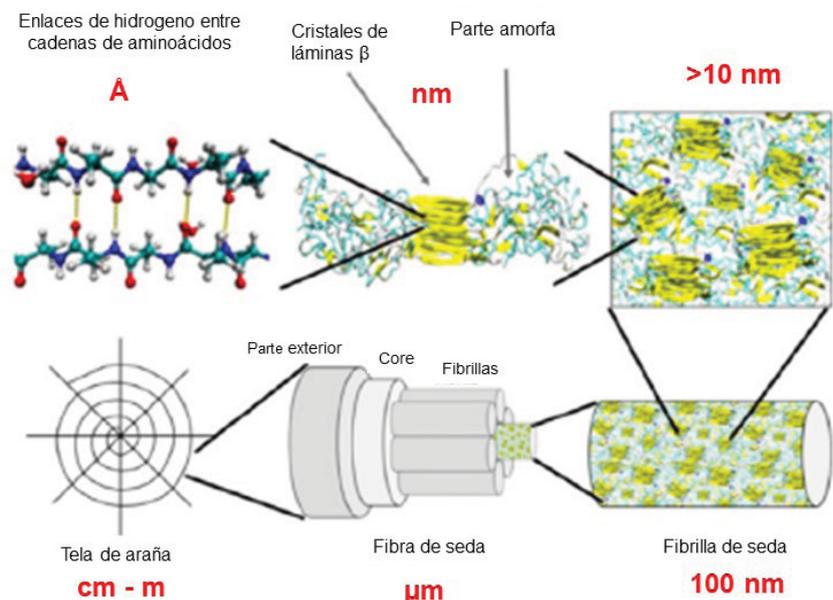


Figura 6. Jerarquía estructural en el ensamblaje de una seda de araña. Modificado de (Su & Buehler, 2016).

En cuanto a las proteínas, se ha visto que las MaSp2 aparecen empaquetadas en la región central de la seda que produce la especie *Nephila clavipes*, mientras que las MpSp1 tienden a aparecer distribuidas uniformemente a lo largo del eje radial (Babu, 2019; Sponner et al., 2005).

1.4 Tejido de las telas de araña

El proceso de producción de la seda se muestra en la figura 7. Este comienza en la cola de la glándula donde se van acumulando las proteínas en una solución acuosa (MaSp1 y MaSp2 en el caso de la Glándula Ampulácea Mayor). Las proteínas toman una conformación tipo micelar y la solución se almacena en la ampolla de la glándula. A

continuación, la solución de proteínas pasa al conducto donde se produce la elongación de las proteínas (Eisoldt et al., 2011).

En el conducto se forma una sustancia que fluye como un líquido, pero mantiene un orden característico del cristal, y además, las proteínas fluyen de manera paralela entre ellas (Vollrath & Knight, 2001). Al pasar a través del conducto, se dan cambios en el ambiente como la acidificación. Gracias a estos cambios y a las fuerzas internas aplicadas por las arañas, se da una separación de fases que da como resultado una fibrilla de seda preliminar.

La araña aplica fuerzas internas durante el proceso de formación de la seda, ya que, el autoensamblaje de las proteínas no es suficiente para obtener las propiedades características de las sedas (Eisoldt et al., 2011; Su et al., 2020).

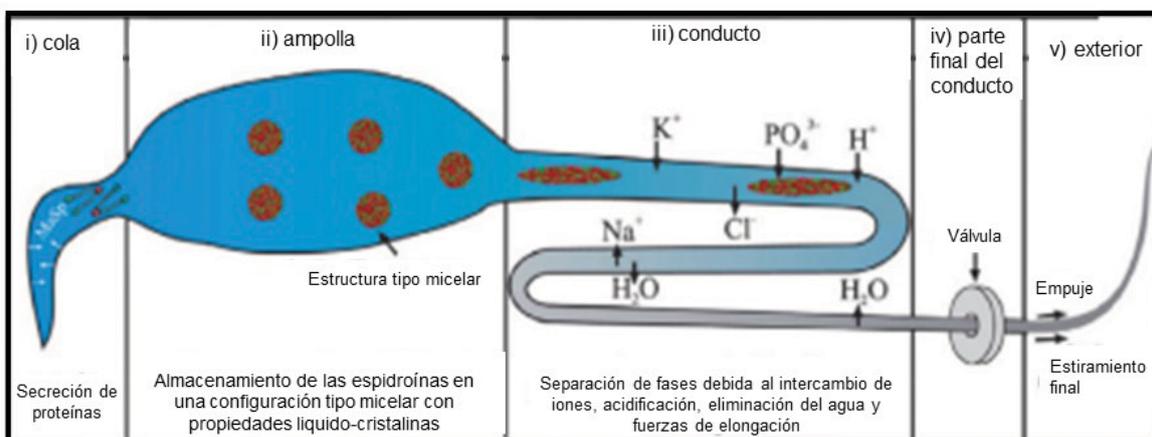


Figura 7. Representación gráfica de una glándula de la seda y el proceso de tejido de la seda de araña (Eisoldt et al., 2011; Su et al., 2020).

A continuación, esta pre-seda pasa por la última parte del conducto, y en esta, gracias a la evaporación del agua se da un proceso de estirado (Heim et al., 2009; Miranda, 2015). Las arañas pueden variar el diámetro de la seda abriendo o cerrando la válvula de la glándula (Saravanan, 2006). En el último giro del conducto se secretan las sustancias que forman el recubrimiento de las fibrillas (Saravanan, 2006).

1.5 Propiedades mecánicas de las sedas y sus aplicaciones

1.5.1 Definición de las magnitudes físicas

Para comprender mejor las propiedades mecánicas, se hará una definición de ciertos conceptos:

- Esfuerzo (σ): fuerza aplicada a un área determinada de un material para deformarlo (Jou et al., 1994). Se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

F es la fuerza aplicada y A es el área de la sección del material en el que se aplica.

- Deformación (ϵ): cambio de la longitud de un material debido a un esfuerzo (Capote, 2011). Se calcula de la siguiente manera:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Donde l_0 es la longitud inicial y Δl es la diferencia entre la longitud final y la inicial.

- Resistencia a la tensión: máximo esfuerzo aplicable a un material sin provocar la rotura (Jou et al., 1994). En el Sistema Internacional se mide en Pascales (Pa).
- Módulo de Young (E): también llamado Módulo de Elasticidad, nos indica la rigidez de un material (Pérez, 2014). Se calcula a partir de esta ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

- Rigidez: capacidad que tiene un material para aguantar esfuerzos sin deformarse . Se mide con el Módulo de Young (Capote, 2011).
- Rigidez inicial: rigidez que presentan las sedas antes de haber sufrido ninguna deformación, ya que siguen un comportamiento elástico no lineal debido a su composición (régimen I).

Las sedas se comportan de manera diferente como vemos en el gráfico 1. El régimen I representa la zona elástica de la seda en la que la parte amorfa (espirales β) se estira de una forma homogénea, se van rompiendo los enlaces de hidrógeno y por lo tanto se van desplegando las espirales β (Su & Buehler, 2016). En ese momento se pasa al régimen II que se corresponde con una zona de

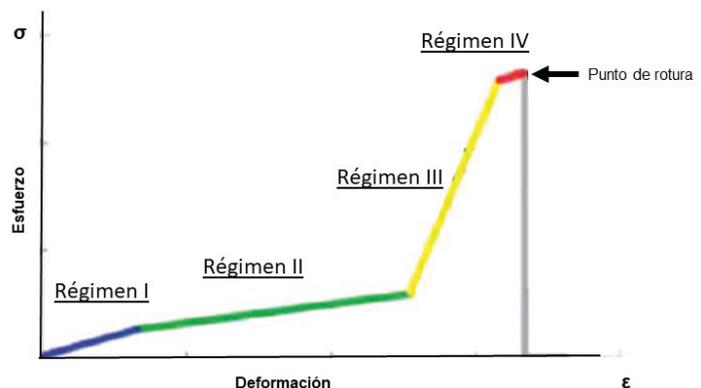


Gráfico 1. Curva de esfuerzo-deformación en el que se ven los diferentes comportamientos (Régimen I, Régimen II, Régimen III y Régimen IV) que toma la seda a medida que se le aplica el esfuerzo hasta que llega al punto de rotura. Modificado de (Su & Buehler, 2016).

debilitamiento en la que las espirales β están completamente desplegadas y al mismo tiempo, se forman más cristales de láminas β (Su & Buehler, 2016). A continuación, se pasa al régimen III, que es mucho más rígido que el régimen I porque la carga se ha transferido de las espirales β (parte amorfa) a los cristales de láminas β (Su & Buehler, 2016). El régimen IV se corresponde con una zona de debilitamiento provocada por la rotura de los enlaces de hidrógeno de los cristales de las láminas β (Su & Buehler, 2016).

- Supercontracción: capacidad de las sedas para acortar su longitud. Esto ocurre por el rápido alineamiento de las regiones amorfas de las espidroínas a lo largo del eje de la fibra a través de puentes de hidrogeno, al entrar en contacto con la humedad (Blackledge, 2012).
- Histéresis: capacidad de la seda para transformar la energía cinética que la deforma en calor, en vez de almacenarla internamente (Blackledge, 2012).
- Elasticidad: capacidad de un material para recobrar su longitud inicial tras cesar el esfuerzo que provocaba la deformación (Capote, 2011).
- Material viscoelástico: material que presenta propiedades de sólidos elásticos y líquidos viscosos (García, 2008).
- Energía de deformación (W): aumento de energía interna acumulada en el interior de un sólido deformable como resultado del trabajo realizado por las fuerzas que provocan la deformación. Se calcula de la siguiente manera (Miranda, 2015):

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$$

- Tenacidad (T): cantidad de energía de deformación que es capaz de acumular o absorber un material sin romperse (Torres, n.d.). La tenacidad es el área que queda por debajo de la curva del gráfico esfuerzo-deformación hasta el punto de rotura como vemos en el gráfico 2. La tenacidad se calcula a partir de la ecuación de la energía de deformación, pero hasta el punto de rotura (donde ϵ_R es la deformación de rotura):

$$T = \int_0^{\epsilon_R} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

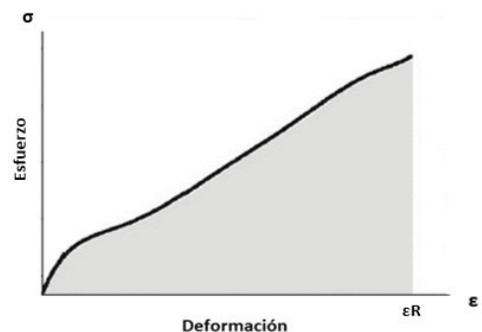


Gráfico 2. Representación de la deformación causada por el esfuerzo aplicado a una seda de araña. El área (color gris) que queda debajo de la línea es la energía de deformación. Editado de (Blackledge, 2012; Vollrath & Knight, 2001), inspirado en (Miranda, 2015).

- Electrohilado: técnica ampliamente utilizada en la formación electrostática de fibras poliméricas, donde se hace uso de fuerzas eléctricas para producir fibras con diámetros en un rango desde 2 nm hasta varios μm a partir de soluciones poliméricas (Díaz, 2012).
- Dalton (Da): unidad de masa atómica que equivale aproximadamente a la masa de un protón. Siendo un kilodalton (kDa) mil veces un dalton (Coto, 2003).

1.5.2 Propiedades mecánicas de las sedas

La dragalina presenta elevada resistencia a la tensión y una alta elasticidad (Keten et al., 2010; Koski et al., 2013). Gracias a la combinación de estas propiedades, posee una extrema tenacidad, mayor que otros materiales como el acero de alta resistencia o el Kevlar (Agnarsson et al., 2010; Blackledge, 2012; Eisoldt et al., 2011; Scheibel, 2004). Estas propiedades son el resultado de la organización jerárquica que podemos ver en la figura 6, que va desde la secuencia aminoacídica hasta las grandes telas de araña (Su et al., 2020).

Otra de las propiedades que tienen las sedas que producen las arañas (más pronunciada en la dragalina) es la supercontracción (Babu, 2019). Cuando la seda está en un ambiente con una humedad relativa mayor del 60% o entra en contacto con el agua, aumenta en diámetro y acorta su longitud hasta un 50% (Boutry & Blackledge, 2010; Eisoldt et al., 2011; Guinea et al., 2005).

Además, todas las sedas presentan comportamientos viscoelásticos, por lo que cuando se les aplica un esfuerzo, solo recuperan una parte de la deformación aplicada (Eisoldt et al., 2011; García, 2008; Koski et al., 2013). La mayoría de sedas también presentan una elevada histéresis para capturar a sus presas, y para ello absorben la energía del insecto evitando tener un rebote, lo que podría liberar a la presa (Babu, 2019; Blackledge, 2012).

1.5.3 Aplicaciones de las sedas de araña

Debido a las propiedades tan características de las sedas, se están realizando diversos estudios sobre las posibles aplicaciones que tienen dentro de campos como el de la biomedicina. Las sedas de araña son biocompatibles y se ha comprobado que mejoran la migración de las células de Schwann, el crecimiento axonal y la remielinización (Radtke et al., 2011). También se están creando sedas artificiales, pero no han conseguido que posean las mismas propiedades que las naturales (Babu, 2019; Kluge et al., 2008; Scheibel, 2004). Al contrario de lo que ocurre con los gusanos de seda, la producción de seda de araña natural no es posible porque las arañas presentan comportamientos caníbales, lo que

dificulta su cría (Babu, 2019). Es importante estudiar las propiedades de las sedas de araña y entender sus funciones, para avanzar en los ámbitos mencionados.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son:

- Definir lo que son las sedas y las telas de araña, así como su estructura y sus funciones.
- Describir las propiedades físicas de las sedas y compararlas con otros materiales.
- Explicar las diversas aplicaciones que pueden tener estas sedas en la biotecnología.

3. MÉTODOS DE BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

El presente trabajo es una revisión bibliográfica, por lo que se ha procedido a realizar una búsqueda de información en diferentes bases de datos.

Las bases de datos que se han usado para la búsqueda han sido Web Of Science (WoS) y Google Scholar (<https://scholar.google.es/>). Las palabras clave utilizadas en la búsqueda fueron “Spider web” y “evolution”, así como “spider fibers” y “properties”, “spider silk” y “elastic”, “spider life cycle” y por último “spider silk and their applications”. Sin embargo, la mayoría de los artículos empleados en este trabajo se obtuvieron de las referencias de los artículos encontrados en las primeras búsquedas obtenidas en las distintas bases de datos.

Se seleccionaron preferentemente artículos recientes, aunque hay algunos artículos en la revisión que no siguen este criterio ya que se consideró que era importante añadirlos al trabajo. La revisión de artículos terminó el 27 de abril de 2021, por lo que no se han tenido en cuenta artículos publicados después de esta fecha.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Propiedades mecánicas de las sedas de araña

La medida experimental de las propiedades de las sedas de araña es complicada debido a su pequeño diámetro (300-1000 nm) (Babu, 2019; Blackledge, 2012). La resistencia a la tensión de las sedas (esfuerzo necesario para romper la fibra) puede ser desde 0,02 GPa hasta 1,7 GPa; y la elasticidad puede variar de 10 a 500% (Eisoldt et al., 2011). Comparando estas propiedades con las de la seda producida por los gusanos de seda, las sedas de araña son tres veces más resistentes (Babu, 2019). Aun así, como ya se dijo anteriormente, estas propiedades son muy variables entre los tipos de sedas, así como entre especies. En la tabla 2 apreciamos algunas de las propiedades de las sedas de araña.

Tabla 2. Comparación de las propiedades mecánicas de algunos tipos de sedas de araña (editado con datos de (Fraternali et al., 2020; Heim et al., 2009; Lewis, 2006; Tokareva et al., 2014)). Los valores del Módulo de Young de las sedas de araña corresponde con los valores obtenidos en el trabajo de (Blackledge & Hayashi, 2006) para la especie *Argiope argentata*.

Material	Abreviatura	Densidad (g·cm ⁻³)	Resistencia (GPa)	Elasticidad (%)	T (J·kg ⁻¹)	E (GPa)
Dragalina	SAM	1,3	4	35	1 · 10 ⁵	10
Seda de la ampulácea menor	SIM		1	5	3 · 10 ⁴	10,6
Seda flageliforme	SFLAG		1	>200	1 · 10 ⁵	0,003
Seda tubuliforme	SCI	1,3	1	20	1 · 10 ⁵	11,6
Seda actiniforme	SACT		0,7	80	6 · 10 ⁹	10,4

En el gráfico 3 se representa la curva de esfuerzo-deformación de la dragalina y de la seda flageliforme de la especie *Araneus diadematus* (construye telas de araña tipo orbicular) (Miranda, 2015).

Como vemos en el gráfico 3, las espirales de captura son más elásticas, esto es, poseen más capacidad de deformación ante un esfuerzo. Pero la dragalina es más rígida y le confiere rigidez a la tela de

araña. Se deforma muy poco a niveles de esfuerzos muy grandes y es por eso por lo que la dragalina forma los marcos y radios de la tela, así como el hilo de seguridad.

La rigidez viene determinada por el Módulo de Young, que se calcula obteniendo la tangente a la curva esfuerzo-deformación. La rigidez inicial o Módulo de Young (E_{init}) de cada tipo de seda es de 10 GPa en el caso de la dragalina y 0,003 GPa en el caso de la seda flageliforme (Blackledge, 2012; Gosline et al., 1999; Miranda, 2015).

Como vemos, las curvas de deformación no siguen un comportamiento lineal y esto se debe a su composición (regiones amorfas y cristales de láminas β), esto provoca que la seda se deforme de manera diferente a medida que aumentamos el esfuerzo aplicado (Su & Buehler, 2016).

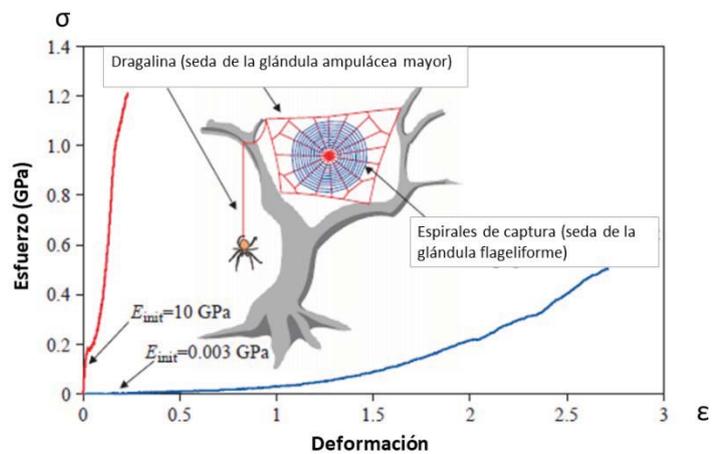


Gráfico 3. Comparación de la curva de esfuerzo-deformación de la dragalina (línea roja) y de las espirales de captura (línea azul) de la especie *Araneus diadematus*. Editado de (Gosline et al., 1999; Miranda, 2015; Omenetto & Kaplan, 2010).

En la tabla 2 se muestra como las espirales de captura se estiran más del 200% de su longitud mientras que la dragalina solo un 35%, lo que concuerda con lo mencionado en la curva esfuerzo-deformación. Cabe destacar que la seda producida para envolver a la presa también presenta una elevada elasticidad (mayor que la de la dragalina). También vemos como la dragalina es la seda que más tensión resiste (4 GPa) entre los tipos de seda comparados, mientras que las demás tienen un valor parecido (entre 0,7-1,0 GPa).

La seda tubuliforme, es producida para construir cajas protectoras de los huevos y se caracteriza por tener una gran resistencia a la tensión (1 GPa) pero poca elasticidad (20%) (Hu et al., 2005; Tokareva et al., 2014). La seda actiniforme, que principalmente la producen para inmovilizar a la presa, posee una baja resistencia a la tensión en comparación con la dragalina pero tiene mayor elasticidad que esta (80%) y tenacidad ($6 \cdot 10^9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) (Tokareva et al., 2014).

La histéresis es otra de las propiedades que caracterizan a las sedas de araña. En el caso de la especie *Araneus diadematus* tanto la dragalina como las espirales de captura transforman un 65% de la energía de deformación en calor, esto les permite evitar que los insectos reboten al impactar con la seda (Blackledge, 2012; Gosline et al., 1999; Miranda, 2015).

Anteriormente, se mencionó que las propiedades elásticas de las sedas variaban individualmente, intraespecíficamente e interespecíficamente. Los factores como la temperatura del ambiente y la velocidad a la que se teje la seda, pueden determinar la resistencia a la tensión de la misma y hacer que varíen las propiedades de esta dentro de un mismo individuo (Vollrath & Knight, 2001). En el gráfico 4 se puede observar cómo varía esta propiedad en función de estos dos factores en la dragalina producida por la especie *Nephila edulis* (Vollrath & Knight, 2001).

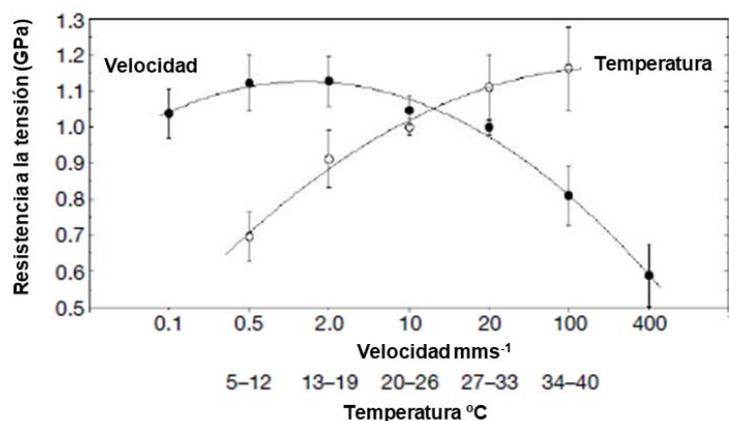


Gráfico 4. Representación de la resistencia a la tensión de la dragalina de la especie *Nephila edulis* y la velocidad en la que se ha formado, así como la temperatura del ambiente. La temperatura control era de 25°C cuando se variaba la velocidad y la velocidad control eran 20 mm/s cuando se variaba la temperatura. Editado de (Vollrath & Knight, 2001).

Como podemos observar, se necesita una velocidad óptima para producir la seda más resistente, y a partir de ahí, a medida que aumenta la velocidad en la que la araña teje la seda, baja la resistencia a la tensión de esta. Con el factor de la temperatura ocurre lo contrario, a medida que aumenta la temperatura del ambiente, aumenta la resistencia a la tensión de la seda producida.

La resistencia a la tensión de un mismo tipo de seda también varía entre especies como indica el gráfico 5 y esto ocurre porque cada una ha adaptado sus sedas para capturar un determinado tipo de presas. En este caso, vemos que las sedas de *Euprosthonops sp.* se deforman menos que las demás al someterlas al mismo esfuerzo (Vollrath & Knight, 2001).

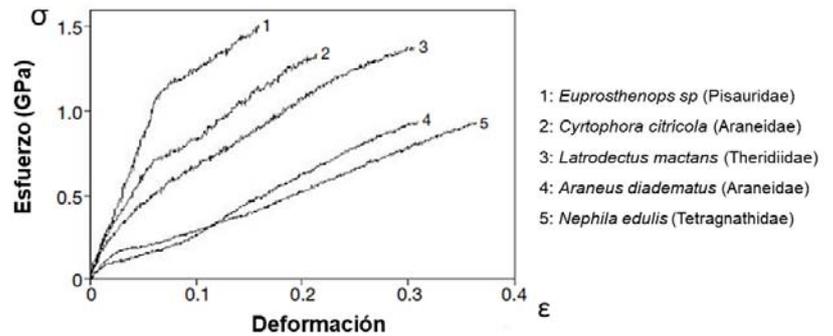


Gráfico 5. Curva de esfuerzo-deformación para diferentes especies. Editado de (Vollrath & Knight, 2001)

4.2 Comparación de las propiedades mecánicas de las sedas con otros materiales

Las propiedades mecánicas de las sedas de araña superan a las de otros materiales como el Kevlar, el caucho, el acero de alta resistencia (AAR), el nylon o los tendones como se puede ver en los gráficos 6 y 7. En primer lugar, comparamos la resistencia a la tensión (en GPa) de cada material en el gráfico 6a, en el que observamos como la dragalina y el Kevlar tienen los valores más altos y similares entre sí (material que se caracteriza por su elevada resistencia a la tensión y se usa para elaborar chalecos antibalas entre otros) (Tokareva et al., 2014).

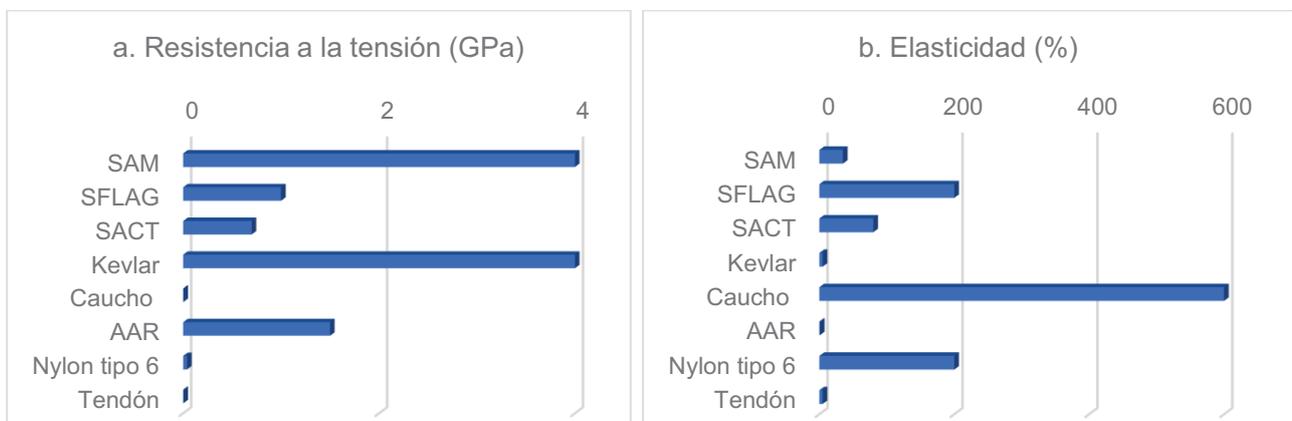


Gráfico 6. (a) Comparación de la resistencia a la tensión de diferentes materiales (b) Comparación de la elasticidad de diferentes materiales. Datos de (Fraternali et al., 2020; Heim et al., 2009; Lewis, 2006; Omenetto & Kaplan, 2010; Tokareva et al., 2014).

En cuanto a la elasticidad, en el gráfico 6b, vemos que, entre los materiales comparados, el caucho es el más elástico (se estira un 600%), y que la seda producida en la glándula flageliforme y las fibras de nylon tienen un valor parecido respecto a la propiedad mencionada (aproximadamente 200%). El Kevlar es poco elástico, ya que, solo se estira un 5%.

Cuando comparamos la tenacidad según los datos de la tabla 2, se observa que la seda con mayor tenacidad es la producida en las glándulas actiniformes con un valor de $6 \cdot 10^9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. El Kevlar tiene una tenacidad de $3 \cdot 10^4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, esto significa que la seda de las glándulas actiniformes pueden absorber 200.000 veces más energía que el Kevlar antes de romperse, sin embargo, el Kevlar presenta una resistencia casi 6 veces mayor que este tipo de seda (Tokareva et al., 2014).

Lo mismo ocurre con la dragalina, ya que esta última posee una resistencia parecida al Kevlar, pero es más elástica que este. Según un estudio (Tokareva et al., 2014) se observa que la seda actiniforme tiene mayor elasticidad y tenacidad que la dragalina, pero tiene menos resistencia a la tensión que esta. Por lo tanto, la combinación de las propiedades de la dragalina hace que sea un material único.

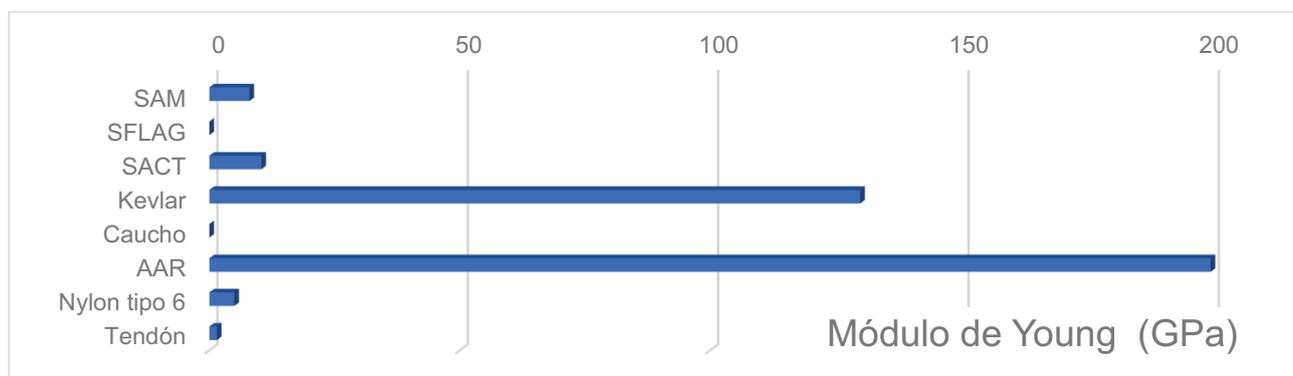


Gráfico 7. Comparación de los valores del Módulo de Young (GPa) que nos indica la rigidez del material. Los valores del Módulo de Young de las sedas de araña corresponde con los valores obtenidos en el trabajo de (Blackledge & Hayashi, 2006) para la especie *Argiope argentata*. Los valores del Módulo de Young de los otros materiales se obtienen de (Gosline et al., 1999; Miranda, 2015).

El Módulo de Young nos indica la rigidez del material. En el caso de los materiales seleccionados, se ve en el gráfico 7 que el acero de alta resistencia (AAR) y el Kevlar son materiales mucho más rígidos que todos los tipos de seda de araña.

Tabla 3. Valores de histéresis (Omenetto & Kaplan, 2010).

Material	Histéresis %
SAM	65
SFLAG	65
Elastina	10
Colágeno de los tendones	7

En la tabla 3 se muestra la histéresis de distintos de materiales. Al comparar los valores de la dragalina (SAM) y los de las espirales de captura (SFLAG) con otros materiales (tabla 3), se observa que tienen una mayor capacidad de disipar esta energía en forma de calor (Omenetto & Kaplan, 2010).

5. APLICACIONES

Durante cientos de años el ser humano ha hecho uso de las telas de araña. Los habitantes de la Antigua Grecia las utilizaban para detener el sangrado de heridas, asimismo, otras poblaciones las utilizaban como hilo de pesca (Babu, 2019). El interés actual por el estudio de las aplicaciones que pueden tener las sedas de araña es por su increíble combinación de resistencia y elasticidad, además de la tenacidad e histéresis.

Otra ventaja que nos proporciona este material es que es completamente biodegradable y biocompatible, lo que permite utilizarlo en áreas como la biomedicina (Allmeling, 2006; Babu, 2019). Gracias a las características mencionadas, con este material se podrían desarrollar nuevos biomateriales como botellas biodegradables, materiales ligeros para aviones, superficies antimicrobianas, vendajes, membranas como soporte para la formación de tejidos, tendones artificiales e incluso se podría llegar a reparar nervios (Allmeling, 2006; Babu, 2019; Gustafsson et al., 2020; Kluge et al., 2008; Kumari et al., 2020; Radtke et al., 2011; Scheibel, 2004).

Como se muestra en la figura A1 del Anexo, las proteínas de la seda tienen cierta solubilidad en agua, disolventes orgánicos y líquidos iónicos y se pueden procesar para formar nuevos biomateriales como fibras, geles, esponjas porosas y microcápsulas (Kluge et al., 2008).

5.1 Fibras sintéticas

Las arañas habitualmente viven en solitario y debido a su naturaleza depredadora, presentan comportamientos caníbales. Es por ello por lo que no es viable criar arañas para producir este material, ya que se comerían entre ellas (Babu, 2019; Scheibel, 2004). Además, no son capaces de generar una elevada cantidad de seda (Babu, 2019). Por eso, la mejor solución parece ser la formación de seda de araña artificial mediante métodos de ingeniería genética. Gracias a los avances en esta área, se han desarrollado sedas con características específicas modificando las proteínas que las forman (Babu, 2019; Kluge et al., 2008; Scheibel, 2004). Así mismo, se ha visto que la morfología y estructura de estas fibras se podrían manipular mediante el control de las condiciones de formación de la misma como se muestra en el gráfico 4 (Kluge et al., 2008). Sin embargo, aún no se ha conseguido una fibra sintética igual de resistente a la tensión que la seda natural (Bourzac, 2015). Esto

es porque las proteínas naturales tienen masas de 250-500 kDa mientras que las proteínas sintéticas solo 30-110 kDa (Eisoldt et al., 2011). Se sabe que cuanto más grandes son las moléculas que forman una fibra, más resistente es, no obstante, cuanto más grande es la molécula, es más difícil de conseguir mediante bioingeniería (Bourzac, 2015).

5.2 Fibras textiles

La combinación de la alta resistencia, tenacidad y su bajo peso, hace que la dragalina de las sedas de arañas sean atractivas para la producción de fibras textiles, para ello, se tendrían que desarrollar más técnicas como el electrohilado para generar materiales de grandes longitudes en cantidades suficientes (Kluge et al., 2008).

5.3 Biomedicina

Dentro de todas las aplicaciones posibles, las aplicaciones biomédicas son las más prometedoras, ya que, como se muestra en la figura A2 del Anexo, se ha visto que la dragalina (del género *Nephila*), favorece la migración de las células de Schwann funcionando como un filamento que guía al nervio (Kluge et al., 2008; Naghilou et al., 2020; Radtke et al., 2011). En el estudio de (Naghilou et al., 2020) vieron que la conformación secundaria (láminas β) de las sedas de araña tiene un papel importante en la rigidez y por lo tanto en esta propiedad de guía de las células (Keten et al., 2010; Naghilou et al., 2020).

Igualmente, la gran resistencia a la tensión de la seda, permite la mejora de sistemas de cierre de heridas y suturas extremadamente estrechas en neurocirugía (Scheibel, 2004).

5.3.1 Hidrogeles y esponjas porosas

Tanto los hidrogeles como las esponjas o soportes porosos se utilizan para la ingeniería de tejidos. Los hidrogeles se producen mediante proteínas de dragalina modificadas y se forman nanofibras de 3 nm de diámetro y longitudes menores de 1 μ m, que a su vez se ensamblan en una especie de andamios porosos pero estables (Kluge et al., 2008). Los soportes en cambio, se producen solubilizando la seda tubuliforme, y se ensamblan formando estructuras 3D que sirven como soportes de células y permiten el transporte de nutrientes para el desarrollo de tejidos como se puede ver en la figura A3 del Anexo (Gellynck et al., 2005; Kluge et al., 2008).

En otro trabajo han desarrollado nanomembranas formadas por proteínas recombinantes de las sedas, que promueven la adherencia y proliferación celular, lo que podría ser un gran avance en la ingeniería de tejidos, para la formación de tejidos *in vitro* que podrían usarse en trasplantes (Gustafsson et al., 2020). Gellynck et al. concluyen que estas

nanomembranas elásticas promueven la regeneración del cartílago ya que funcionan como soporte de los condrocitos (Gellynck et al., 2005).

5.3.2 *Microcápsulas*

Estas estructuras se producen a partir de proteínas modificadas de la dragalina y se forman controlando el autoensamblaje en una interfaz de emulsión. Se forman microcápsulas ricas en láminas β con una alta estabilidad mecánica, con propiedades habituales de microcápsulas como la respuesta de degradación restringida a enzimas específicas del tejido. Por lo que se trata de un material que puede utilizarse para la administración de fármacos (Hermanson et al., 2007; Kluge et al., 2008).

6. CONCLUSIONES

La combinación de las propiedades mecánicas y biológicas de las sedas de araña como son la elevada elasticidad y la alta tenacidad, hacen que estas sean un material único y muy prometedor en el ámbito biotecnológico. Pero para avanzar en ello, se deben realizar más estudios respecto a las propiedades de las sedas de araña menos estudiadas, ya que estas pueden poseer propiedades con las que se puedan desarrollar nuevas aplicaciones o mejorar las que existen hoy en día. En estos momentos, la dragalina es el tipo de seda más prometedor y sus aplicaciones en el ámbito de la biomedicina son muy interesantes ya que la ingeniería de tejidos como la regeneración nerviosa está en pleno auge.

Igualmente, deben de desarrollarse nuevas técnicas con las que se puedan producir sedas artificiales con las mismas propiedades que las naturales, en grandes cantidades y longitudes. De esta manera, este material podría suponer un avance científico y tecnológico muy importante en los campos descritos.

CONCLUSIÓNS

A combinación das propiedades mecánicas e biolóxicas das sedas de araña como son a elevada elasticidade e a alta tenacidade, fan que estas sexan un material único e moi prometedor no ámbito biotecnolóxico. Pero para avanzar nisto, débense realizar máis estudos respecto ás propiedades das sedas menos estudadas, xa que estas poden ter propiedades coas que se poden desenvolver novas aplicacións ou mellorar as que existen na actualidade. Nestes momentos, a dragalina é o tipo de seda máis prometedor e as súas aplicacións no ámbito da biomedicina son moi interesantes debido a que a enxeñería de tecidos, en concreto a rexeneración nerviosa, están en pleno desenvolvemento.

Do mesmo xeito, habería que desenvolver novas técnicas coas que se poidan producir sedas artificiais coas mesmas propiedades cas naturais en grandes cantidades e lonxitudes. Deste xeito, este material podería supoñer un gran avance científico e tecnolóxico nos ámbitos descritos.

CONCLUSIONS

The combination of the biological and mechanical properties of the spider silk, such as high elasticity and high tenacity, make it a unique and promising material in the biotechnological field. In order to make significant advances in this subject, it's important to do more research about the mechanical properties of less studied types of silk. This is because of the potential new properties and applications these other types of silks could provide to the matter. With the existing knowledge, dragaline can be described as the most promising type of silk, due to its very interesting biomedical applications.

Nevertheless, in order to manufacture large amounts of material, new techniques need to be developed to produce artificial silks with similar properties to natural ones. By doing so, this material could represent a very important scientific and technological advance.

ONDORIOAK

Armiarmen haria bioteknologia arloan oso material interesgarria da, propietate mekaniko eta biologikoen konbinazioarengatik, elastikotasun eta irmotasun handiak adibidez. Gai honetan aurrera egiteko, harien propietateei buruzko ikerketa gehiago egin beharko lirateke, gaur ezezagunak ditugun ezaugarri eta aplikazio berriak eduki litzaketelako. Hari mota guztietatik, dragalinak eman ditu emaitza interesgarrienak biomedikuntzan, Antza denez, ehunen ingeniartzan eta nerbioen birsorkuntzan emaitza oso onak aurkeztu ditu.

Hariak kantitate eta luzeera handietan eta naturalen ezaugarriekin sortzeko, teknika berriak ikertu behar dira. Zalantzarik gabe, material berri hau, aipatutako arlo ezberdinetan aurrerapen zientifiko eta teknologiko bat suposatu dezake.

7. BIBLIOGRAFÍA

Agnarsson, I., Kuntner, M., & Blackledge, T. A. (2010). Bioprospecting finds the toughest biological material: Extraordinary silk from a giant riverine orb spider. *PLoS ONE*, 5(9), 1–8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011234>

Alencastre, J. H., Olarte, C., Rivera, R., & Muñoz, J. L. (2016). Estudio dinámico del sistema araña-tela de araña en condiciones de resonancia. *Informacion Tecnologica*, 27(4), 139–144. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000400015>

- Allmeling, C. (2006). Use of spider silk fibres as an innovative material in a biocompatible artificial nerve conduit. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 10(3), 770–777. <https://doi.org/10.2755/jcmm010.003.18>
- Altman, G. H., Horan, R. L., Lu, H. H., Moreau, J., Martin, I., Richmond, J. C., & Kaplan, D. L. (2002). Silk matrix for tissue engineered anterior cruciate ligaments. *Biomaterials*, 23(20), 4131–4141. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00156-4](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00156-4)
- Argintean, S., Chen, J., Kim, M., & Moore, A. M. F. (2006). Resilient silk captures prey in black widow cobwebs. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 82(2), 235–241. <https://doi.org/10.1007/s00339-005-3430-y>
- Babu, K. M. (2019). Spider silks and their applications. K. M. Babu (Ed.), *Silk* (Second Edi, pp. 235–253). Woodhead. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102540-6.00010-3>
- Blackledge, T. A. (2012). Spider silk: a brief review and prospectus on research linking biomechanics and ecology in draglines and orb webs. *Journal of Arachnology*, 40(1), 1–12. <https://doi.org/10.1636/M11-67.1>
- Blackledge, T. A., & Hayashi, C. Y. (2006). Silken toolkits: biomechanics of silk fibers spun by the orb web spider *Argiope argentata* (Fabricius 1775). *Journal of Experimental Biology*, 209(13), 2452–2461. <https://doi.org/10.1242/jeb.02275>
- Bond, J. E., Garrison, N. L., Hamilton, C. A., Godwin, R. L., Hedin, M., & Agnarsson, I. (2014). Phylogenomics resolves a spider backbone phylogeny and rejects a prevailing paradigm for orb web evolution. *Current Biology*, 24(15), 1765–1771. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.06.034>
- Bourzac, K. (2015). Spiders: web of intrigue. *Nature*, 519, 4–6. <https://doi.org/10.1038/519S4a>
- Boutry, C., & Blackledge, T. A. (2010). Evolution of supercontraction in spider silk: Structure-function relationship from tarantulas to orb-weavers. *Journal of Experimental Biology*, 213(20), 3505–3514. <https://doi.org/10.1242/jeb.046110>
- Capote, V. (2011). Tipos de esfuerzos físicos. *Revista Digital Para Profesionales de La Enseñanza*, 15, 1–18. <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8567.pdf>
- Coto, C. E. (2003). Curso de introducción al conocimiento científico experimental. Departamento de Química Biológica. Universidad de Buenos Aires. *Química Viva*, 1–

155. <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/>

Díaz, R. (2012). *Preparación y caracterización de fibras poliméricas por electrohilado para su preparación en cultivo celular* [Tesis Doctoral. Universidad de Sonora. División de Ingeniería]. <http://www.bidi.uson.mx/tesisDet.aspx?crit1=TITULO&texto1=electrohilado&crit2=TITULO&texto2=>

Dicko, C., Porter, D., Bond, J., Kenney, J. M., & Vollrath, F. (2008). Structural disorder in silk proteins reveals the emergence of elastomerocity. *Biomacromolecules*, 9(1), 216–221. <https://doi.org/10.1021/bm701069y>

Eisoldt, L., Smith, A., & Scheibel, T. (2011). Decoding the secrets of spider silk. *Materials Today*, 14(3), 80–86. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70057-8](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70057-8)

Fraternali, F., Stehling, N., Amendola, A., Anrango, B. A. T., Holland, C., & Rodenburg, C. (2020). Tensegrity modelling and the high toughness of spider dragline silk. *Nanomaterials*, 10(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/nano10081510>

García, J. C. (2008). *Tema 3. viscoelasticidad*. Retrieved March 3, 2021, from <http://hdl.handle.net/10045/3624>

Gellynck, K., Verdonk, P., Almqvist, K. F., van Nimmen, E., Gheysens, T., Mertens, J., van Langenhove, L., Kiekens, P., & Verbruggen, A. (2005). Chondrocyte growth in porous spider silk 3D-Scaffolds. *European Cells and Materials*, 10(SUPPL.2), 1–45.

Google Académico. (n.d.). Retrieved May 13, 2021, from <https://scholar.google.es/>

Gosline, J. M., Guerette, P. A., Ortlepp, C. S., & Savage, K. N. (1999). The mechanical design of spider silks: From fibroin sequence to mechanical function. *Journal of Experimental Biology*, 202(23), 3295–3303.

Greco, G., & Pugno, N. M. (2021). How spiders hunt heavy prey: the tangle web as a pulley and spider's lifting mechanics observed and quantified in the laboratory. *Journal of The Royal Society Interface*, 18(175), 20200907. <https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0907>

Guinea, G. V., Elices, M., Pérez-Rigueiro, J., & Plaza, G. R. (2005). Stretching of supercontracted fibers: a link between spinning and the variability of spider silk. *Journal of Experimental Biology*, 208(1), 25–30. <https://doi.org/10.1242/jeb.01344>

Gustafsson, L., Tasiopoulos, C. P., Jansson, R., Kvick, M., Duursma, T., Gasser, T. C., van der Wijngaart, W., & Hedhammar, M. (2020). Recombinant spider silk forms tough and

elastic nanomembranes that are protein-permeable and support cell attachment and growth. *Advanced Functional Materials*, 30(40), 1–9. <https://doi.org/10.1002/adfm.202002982>

Harmer, A. M. T., Blackledge, T. A., Madin, J. S., & Herberstein, M. E. (2011). High-performance spider webs: integrating biomechanics, ecology and behaviour. *Journal of the Royal Society Interface*, 8(57), 457–471. <https://doi.org/10.1098/rsif.2010.0454>

Heim, M., Keerl, D., & Scheibel, T. (2009). Spider silk: from soluble protein to extraordinary fiber. *Angewandte Chemie - International Edition*, 48(20), 3584–3596. <https://doi.org/10.1002/anie.200803341>

Hermanson, K. D., Huemmerich, D., Scheibel, T., & Bausch, A. R. (2007). Engineered microcapsules fabricated from reconstituted spider silk. *Advanced Materials*, 19(14), 1810–1815. <https://doi.org/10.1002/adma.200602709>

Hu, X., Lawrence, B., Kohler, K., Falick, A. M., Moore, A. M. F., McMullen, E., Jones, P. R., & Vierra, C. (2005). Araneoid egg case silk: a fibroin with novel ensemble repeat units from the black widow spider, *Latrodectus hesperus*. *Biochemistry*, 44(30), 10020–10027. <https://doi.org/10.1021/bi050494i>

Jou, D., Llebot, J. E., & Pérez, C. (1994). *Física para ciencias de la vida* (J. Stumpf (Ed.); First Edit). Mc Graw Hill. Madrid

Keten, S., Xu, Z., Ihle, B., & Buehler, M. J. (2010). Nanoconfinement controls stiffness, strength and mechanical toughness of B-sheet crystals in silk. *Nature Materials*, 9(4), 359–367. <https://doi.org/10.1038/nmat2704>

Kluge, J. A., Rabotyagova, O., Leisk, G. G., & Kaplan, D. L. (2008). Spider silks and their applications. *Trends in Biotechnology*, 26(5), 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.02.006>

Koski, K. J., Akhenblit, P., McKiernan, K., & Yarger, J. L. (2013). Non-invasive determination of the complete elastic moduli of spider silks. *Nature Materials*, 12(3), 262–267. <https://doi.org/10.1038/nmat3549>

Kumari, S., Lang, G., DeSimone, E., Spengler, C., Trossmann, V. T., Lücker, S., Hudel, M., Jacobs, K., Krämer, N., & Scheibel, T. (2020). Engineered spider silk-based 2D and 3D materials prevent microbial infestation. *Materials Today*, 41(December), 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.06.009>

- Lee, P., & Yeorgan, K. (2008). Las arañas comunes que se encuentran alrededor de la casa y otros edificios. *ENTfact. University of Kentucky College of Agriculture*, 622, 1–3.
- Lewis, R. V. (2006). Spider silk: ancient ideas for new biomaterials. *Chemical Reviews*, 106(9), 3762–3774. <https://doi.org/10.1021/cr010194g>
- Madsen, B., Shao, Z. Z., & Vollrath, F. (1999). Variability in the mechanical properties of spider silks on three levels: Interspecific, intraspecific and intraindividual. *International Journal of Biological Macromolecules*, 24(2–3), 301–306. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(98\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(98)00094-4)
- Martínez, C. A., Benavides, E., Escorcía, O. R., & Franco, T. K. (2015). Arácnidos: un mundo en ocho patas. *Infozoa. Boletín de Zoología. Universidad Del Magdalena*, 8, 1–16. https://www.unimagdalena.edu.co/Content/Public/Docs/Entrada_Facultad3/adjunto_1029-20181004104925_435.pdf
- Menéndez, J. L. (n.d.). *Araneae (Arthropoda)*. Asturnatura.Com [En Línea]. Retrieved April 11, 2021, from <https://www.asturnatura.com/orden/araneae.html>
- Miranda, J. A. (2015). *Caracterización de las propiedades dinámicas de la seda de araña* [Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Industriales (UPM)]. <http://oa.upm.es/view/institution/Industriales/>
- Molinero, Á. G. (2013). La taxonomía de araneidos y el comportamiento de elaboración de telas. *Revista de Divulgación e Investigación en Ciencias Naturales*, 1, 7–35.
- Moore, C. W. (1977). The life cycle, habitat and variation in selected web parameters in the spider, *Nephila clavipes* Koch (Araneidae). *American Midland Naturalist*, 98(1), 95–108. <https://doi.org/10.2307/2424717>
- Mortimer, B., Soler, A., Siviour, C. R., & Vollrath, F. (2018). Remote monitoring of vibrational information in spider webs. *Science of Nature*, 105(37), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00114-018-1561-1>
- Naghilou, A., Pöttschacher, L., Millesi, F., Mann, A., Supper, P., Semmler, L., Weiss, T., Backus, E. H. G., & Radtke, C. (2020). Correlating the secondary protein structure of natural spider silk with its guiding properties for Schwann cells. *Materials Science and Engineering C*, 116(111219), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111219>
- Omenetto, F. G., & Kaplan, D. L. (2010). New opportunities for an ancient material. *Science*,

329(5991), 528–531. <https://doi.org/10.1126/science.1188936>

- Pérez, A. (2014). *Módulo de elasticidad*. Retrieved April 21, 2021, from http://www.mecapedia.uji.es/modulo_de_elasticidad.htm
- Qin, Z., Compton, B. G., Lewis, J. A., & Buehler, M. J. (2015). Structural optimization of 3D-printed synthetic spider webs for high strength. *Nature Communications*, 6(May), 1–7. <https://doi.org/10.1038/ncomms8038>
- Radtke, C., Allmeling, C., Waldmann, K. H., Reimers, K., Thies, K., Schenk, H. C., Hillmer, A., Guggenheim, M., Brandes, G., & Vogt, P. M. (2011). Spider silk constructs enhance axonal regeneration and remyelination in long nerve defects in sheep. *PLoS ONE*, 6(2), e16990. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016990>
- Saravanan, D. (2006). Spider silk: structure, properties and spinning. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 5(1), 1–20.
- Scheibel, T. (2004). Spider silks: recombinant synthesis, assembly, spinning, and engineering of synthetic proteins. *Microbial Cell Factories*, 3, 1–10. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-3-14>
- Scott, C. E., Anderson, A. G., & Andrade, M. C. B. (2018). A review of the mechanisms and functional roles of male silk use in spider courtship and mating. *Journal of Arachnology*, 46(2), 173–206. <https://doi.org/10.1636/JoA-S-17-093.1>
- Selden, P. A., Shear, W. A., & Sutton, M. D. (2008). Fossil evidence for the origin of spider spinnerets, and a proposed arachnid order. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(52), 20781–20785. <https://doi.org/10.1073/pnas.0809174106>
- Soler, A. M. (2017). *Estudio de la relación entre tipo estructural y función biológica en la tela de araña orbicular*. Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid.
- Sponner, A., Unger, E., Grosse, F., & Weisshart, K. (2005). Differential polymerization of the two main protein components of dragline silk during fibre spinning. *Nature Materials*, 4(10), 772–775. <https://doi.org/10.1038/nmat1493>
- Su, I., & Buehler, M. J. (2016). Nanomechanics of silk: the fundamentals of a strong, tough and versatile material. *Nanotechnology*, 27(30), 1–15. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/30/302001>

- Su, I., & Buehler, M. J. (2020). Mesomechanics of a three-dimensional spider web. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 144(104096), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.104096>
- Su, I., Jung, G. S., Narayanan, N., & Buehler, M. J. (2020). Perspectives on three-dimensional printing of self-assembling materials and structures. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 15, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2020.01.003>
- Su, I., Qin, Z., Saraceno, T., Krell, A., Mühlethaler, R., Bisshop, A., & Buehler, M. J. (2018). Imaging and analysis of a threedimensional spider web architecture. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(146), 1–11. <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0193>
- Tokareva, O., Jacobsen, M., Buehler, M., Wong, J., & Kaplan, D. L. (2014). Structure function property design interplay in biopolymers: spider silk. *Acta Biomaterialia*, 10(4), 1612–1626. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.08.020>
- Torres, M. (n.d.). *Propiedades mecánicas*. Retrieved April 21, 2021, from https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/22_propiedades_mecnicas.html
- Vollrath, F. (2000). Strength and structure of spiders' silks. *Reviews in Molecular Biotechnology*, 74(2), 67–83. [https://doi.org/10.1016/S1389-0352\(00\)00006-4](https://doi.org/10.1016/S1389-0352(00)00006-4)
- Vollrath, F., & Knight, D. P. (2001). Liquid crystalline spinning of spider silk. *Nature*, 410(6828), 541–548. <https://doi.org/10.1038/35069000>
- World Spider Catalog*. (2021). World Spider Catalog. Version 22.0. Natural History Museum Bern. <https://doi.org/10.24436/2>
- Xin, X., Liu, F., Chen, J., Ono, H., Li, D., & Kuntner, M. (2015). A genus-level taxonomic review of primitively segmented spiders (Mesothelae, Liphistiidae). *ZooKeys*, 488, 121–151. <https://doi.org/10.3897/zookeys.488.8726>

ANEXO

En este anexo se muestran imágenes de las aplicaciones de las telas de araña.

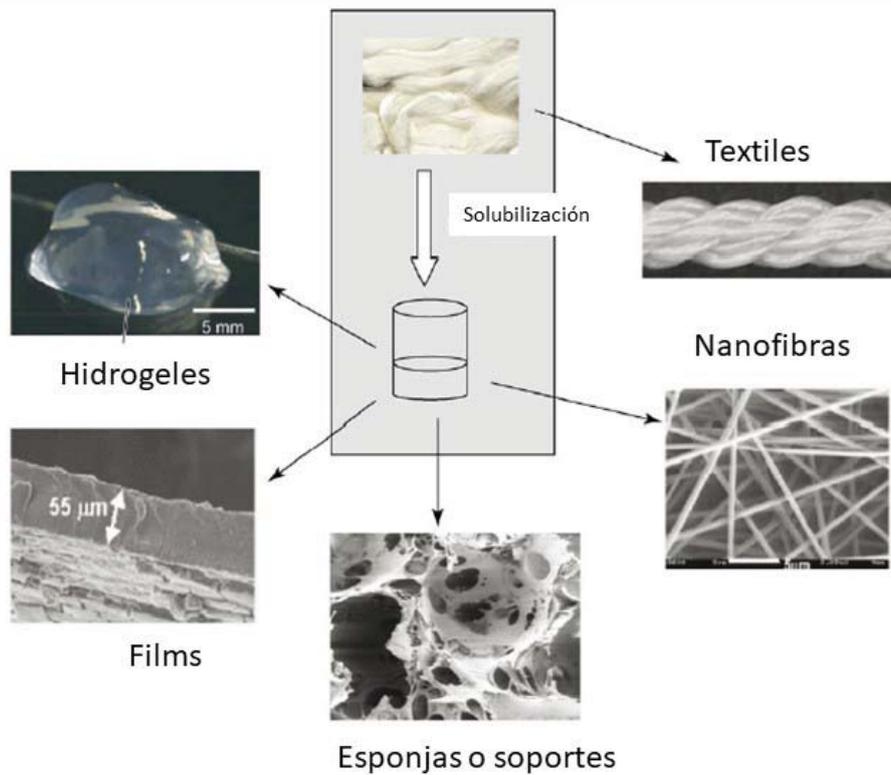


Figura A1. Esquema de diferentes aplicaciones que se pueden obtener a partir de la solubilización de las proteínas de las sedas de araña (Altman et al., 2002; Kluge et al., 2008).

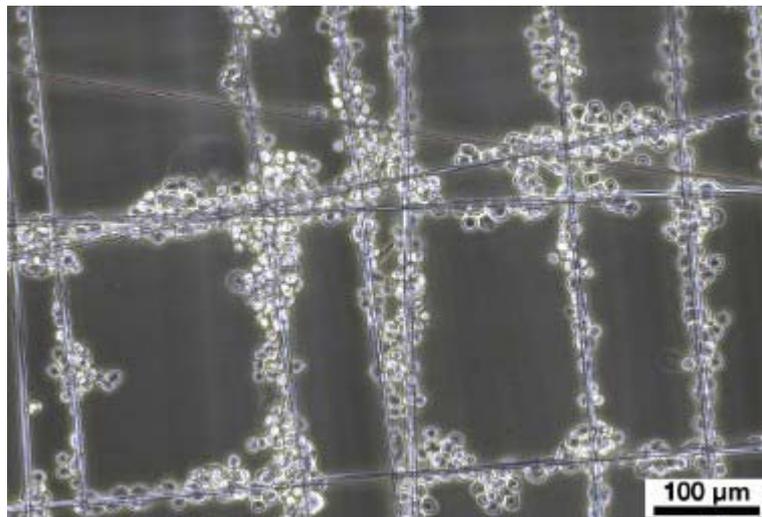


Figura A2. Imagen de un cultivo de Células de Schwann utilizando como guía seda de dragalina (Naghilou et al., 2020).

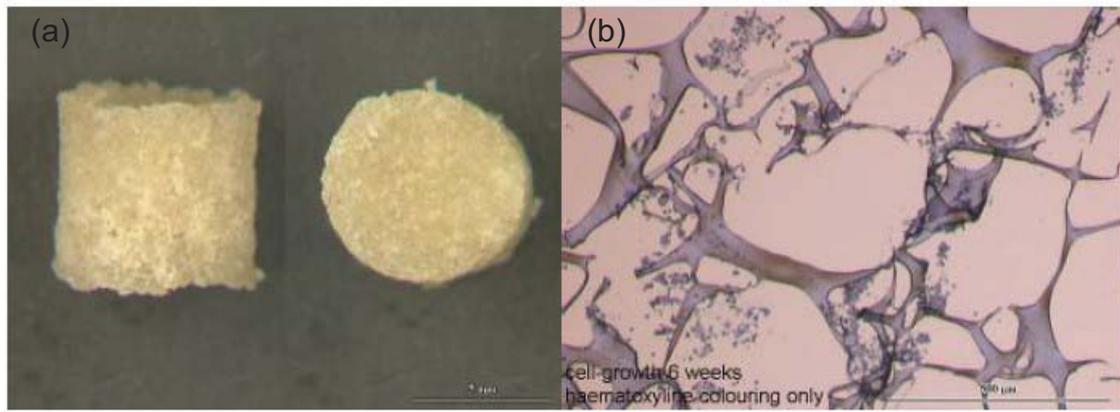


Figura A3. (a) Soporte poroso cilíndrico formado por tela de araña y (b) condrocitos creciendo en los poros del soporte (Gellynck et al., 2005).