



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y  
Teoría de Estructuras

PROYECTO FIN DE CARRERA

# Análisis de la topología de la tela de araña en su comportamiento frente a impacto

Autor: Alejandro Mahy Soler Trujillo

Tutor: Ramón Zaera Polo

Leganés, junio de 2013

## Índice

1	Introducción y objetivos .....	5
1.1	Objetivos.....	7
2	Antecedentes.....	9
2.1	Orígenes y topología.....	9
2.1.1	La tela de araña orb web.....	10
2.1.2	Tipos de seda .....	12
2.2	Propiedades de los hilos.....	13
2.3	Comportamiento estructural.....	20
2.4	Análisis sobre la geometría de las telarañas .....	26
3	Propiedades del modelo.....	29
3.1	Ecuación constitutiva.....	29
3.2	Fuerzas aerodinámicas .....	31
3.3	Tipo de elemento finito.....	32
3.3.1	Análisis de sensibilidad al tamaño del elemento finito .....	33
3.4	Fuerzas de pretensión.....	34
3.5	Modelado de la presa .....	34
3.6	Tipo de contacto presa / tela de araña.....	34
4	Generador del modelo .....	37
4.1	Modelo de referencia .....	37
4.2	Objetivos del modelo .....	37
4.3	Descripción del modelo .....	38
4.3.1	Geometría de la tela de araña .....	38
4.3.2	Definición de la esfera.....	42
4.3.3	Propiedades de los materiales.....	43
4.3.4	Definición del impacto .....	44
4.3.5	Ejecución del modelo .....	44
5	Análisis de resultados .....	47
5.1	Variables a tener en cuenta .....	47
5.2	Caso de referencia.....	47
5.3	Efecto del marco secundario.....	50
5.4	Efecto de la espiral central.....	52

5.5	Efecto del diámetro del hilo en las fuerzas aerodinámicas .....	56
5.6	Efecto de la proporcionalidad en las dimensiones de la tela .....	59
5.7	Efecto del intercambio de propiedades .....	60
5.8	Efecto de las longitudes de hilo radial a hilo espiral .....	62
5.9	Efecto del número de lados.....	65
5.10	Efecto de la longitud de los hilos de soporte.....	68
6	Conclusiones y trabajos futuros.....	72
6.1	Conclusiones.....	72
6.2	Trabajos futuros .....	73
7	Bibliografía.....	76



# 1 Introducción y objetivos

Tras 400 millones de años de evolución, las arañas se encuentran en el primer escalafón de la ingeniería por méritos propios, siendo capaces de producir uno de los biomateriales más resistentes que se conocen, superando en resistencia materiales tales como el Kevlar, la fibra de carbono, o el acero de alta resistencia (Gosline 1999; Sensenig 2012, Xia 2010), pero su fama no es sólo debida a que son productoras de este material si no al uso que hacen de él, formando estructuras elegantes que optimizan su producción y diseño para la captura de presas frente a impactos (L. S. Lin 1998; M. W. Alam 2007; Aoyanagi 2010; Cranford 2012). Todo esto unido a una gran adaptabilidad al medio y a sus condiciones, que han permitido su evolución e integración en la naturaleza. (F. D. Vollrath 1997)

Tales características han provocado que las telas de araña sean objeto continuo de estudio por parte de la comunidad científica, puesto que si se es capaz de entender las razones del éxito de las telas de araña podrían aplicarse esos conocimientos al cálculo de estructuras ligeras o a la creación de biomateriales con resistencias superiores a los actualmente disponibles.

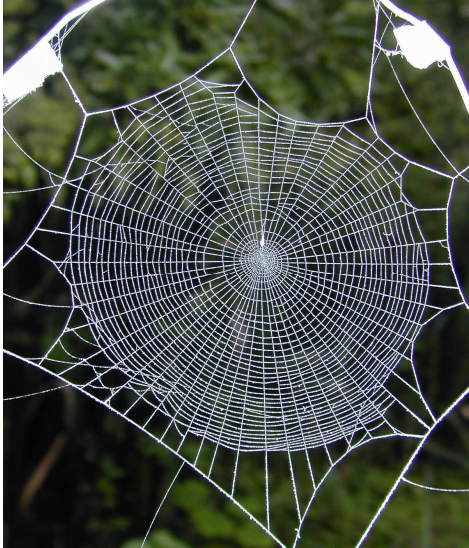
La resistencia de las telas de araña es tal, debida a dos factores, la primera la alta resistencia de los hilos que la componen, los cuales combinan una elevada tensión de rotura con una gran ductilidad, y la segunda a la arquitectura de las telas, que forma una optimizada estructura capaz de absorber los impactos de las presas eficazmente.

Los hilos están formados por cadenas de proteínas entrelazadas que son segregadas mediante unas glándulas que posee la araña. Las cuales son capaces de crear diferentes diámetros de hilos según la función a desarrollar en la tela. (L. S. Lin 1998), (Elices 2010)

La arquitectura de las telas puede ser muy variada y estar orientada tanto vertical como horizontal u oblicua, y se clasifican de la siguiente manera:

- Orb webs: telas definidas por hilos espirales e hilos radiales
- Tangle webs o cobwebs: telas con un aparente desorden pero muy eficaces en la captura
- Funnel webs: planas y horizontales con un túnel en el centro en el cual se aloja la araña (Figura 1.2)
- Tubular webs: con forma de tubo suelen encontrarse en las bases de los árboles o en el suelo (Figura 1.2)
- Sheet webs: presentes entre la vegetación con forma de hoja plana

Existen estudios que evidencian que los modelos de telas cobwebs (Figura 1.1) y los sheet web (Figura 1.3) proceden del modelo orb web (Agnarsson 2004; Arnedo 2004), como parte del proceso de evolución de las telas.



**Figura 1.1** Spiral orb web (izquierda) y Cobweb (derecha).



**Figura 1.2** Funnel web (izquierda) y Tubular web (derecha).



**Figura 1.3** Sheet web.

En el presente proyecto se estudiará la tela “orb web”, debido a que es la forma más conocida y presenta características estructurales universales que están conservadas entre las especies, lo que sugiere que se ha beneficiado de la selección natural a lo largo de su evolución (Aoyanagi 2010). La topología tan definida que tiene se presta a una modelización ideal más sencilla, observando una imagen se pueden identificar los elementos que la constituyen. Con esto se crearán modelos que permitan realizar un estudio de la topología observada y cómo afecta a su comportamiento estructural.

## 1.1 Objetivos

Existen múltiples estudios realizados sobre las telas de araña, su composición química, sobre el comportamiento mecánico de la estructura, de los hilos de seda, de la geometría en función del entorno, etc. Este proyecto abordará las siguientes líneas, aún inexploradas, las cuales se utilizarán para intentar entender el comportamiento frente a impacto de las telas “orb web” y la influencia de la topología:

- Influencia del marco secundario.
- Influencia de las fuerzas aerodinámicas en la tela.
- Influencia de las propiedades de los hilos.
- Influencia de los diámetros de los hilos.
- Influencia del número de lados de la tela.
- Influencia de la espiral central.
- Influencia de las longitudes de los distintos tipos de hilos presentes en la tela.
- Influencia del tamaño de la tela.

Estos análisis se realizarán a través de simulaciones mediante el método de elementos finitos creadas por un generador de modelos. Para este generador no se parte de cero, pues el compañero Jaime Teus Fernández en su Proyecto Fin de Carrera, “Modelado de la tela de araña y análisis de su comportamiento frente a impacto” desarrolló un primer programa en el que podía generarse telas de arañas de cuatro lados tras realizar una serie de pasos intermedios.

Para poder llevar a cabo un mayor número de análisis, se hace necesario un generador que introduzca el menor número de pasos a la hora de realizar cada uno de ellos, por tanto se han fijado los siguientes objetivos de cara a la mejora del modelo de Jaime Teus Fernández:

- Automatizar el generador de modo que su ejecución sea rápida y sencilla.
- Poder modificar el número de lados de cada modelo.
- Añadir un nuevo tipo de espiral logarítmica no contemplada en el modelo anterior.
- Poder crear modelos que conserven el volumen de material entre distintos tipos de hilos para realizar distintos análisis manteniendo el volumen constante.





## 2 Antecedentes

### 2.1 Orígenes y topología

En la actualidad más de 4600 tipos de especies de arañas construyen el modelo orb web (Platnick 2011), un modelo de telas que se encuentra en el linaje evolutivo de las arañas Orbicularie (Figura 2.1) y que en la actualidad es producido por siete familias de arañas.

Las arañas que tejen telas orb webs pueden dividirse en dos categorías, diferenciadas por el tipo de seda que utilizan para la espiral de captura, la cual puede ser adhesiva, provista por una seda viscosa de fibras recubiertas con un pegamento acuoso, o espirales “cribellate” consistente en fibras pseudoflageliformes rodeadas por hilos con espigas secas, que hacen que la presa se enreden en ella en vez de pegarse. (T. K. Blackledge 2011)

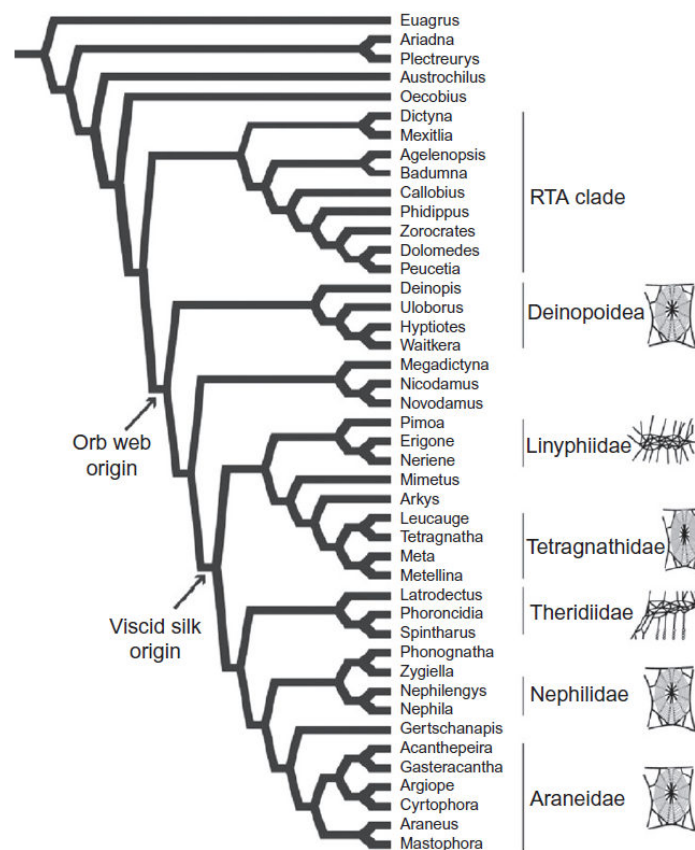


FIG. 1 Phylogeny of orb-weaving spiders based upon total evidence analysis. Modern orb web spiders belong to the Araneoidea, defined here by the origin of the viscid silk glue. However, orb spinning arose much earlier in the cribellate ancestor of all Orbiculariae (Deinopoidea + Araneoidea). After Blackledge et al. (2009c).

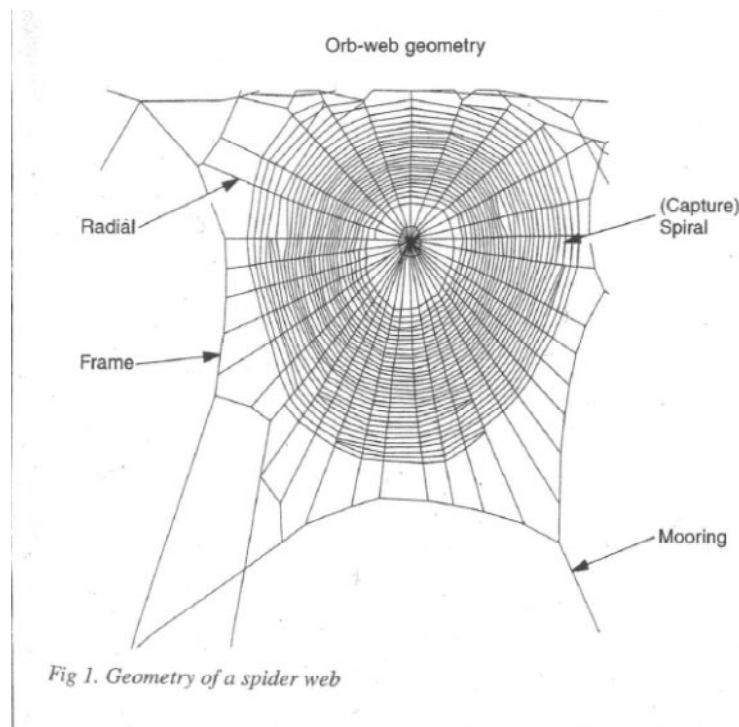
Figura 2.1 Linaje evolutivo de las telas orb web. Fuente:(T. K. Blackledge 2011)

Puesto que en la actualidad el 95 por ciento de las arañas que tejen telas tipo orb web, utilizan seda viscosa para la espiral de captura (pertenecientes a la superfamilia Araneoidea). (Tarakanova 2012), en el presente estudio se hablará sobre las telas orb webs pertenecientes a la familia Araneoidea y a su seda viscosa.

### 2.1.1 La tela de araña orb web

Cuando se adentra en un tema poco habitual, que está sometido frecuentemente a nuevas investigaciones, como lo es el estudio de las telas de araña, se hace necesario establecer una nomenclatura en común para evitar producir una terminología contradictoria.

El proceso de creación de una nomenclatura común se ha ido realizando conforme al paso del tiempo, en un primer lugar Zschokke (1999) aunó y resumió la nomenclatura disponible en la bibliografía hasta entonces y posteriormente Blackledge (2011) abogó por continuar con la nomenclatura de Zschokke exceptuando términos que se habían asentado en la literatura posteriormente.



**Figura 2.2 Geometría de una tela tipo orb web. Fuente:(L. S. Lin 1998).**

La geometría básica de una tela de araña se compone de hilos radiales, hilos del marco (frame), de apoyo (mooring) y espirales (también referidos como hilos de captura), la zona que se encuentra en el centro de la tela y donde suele estar la araña se conoce como el hub.

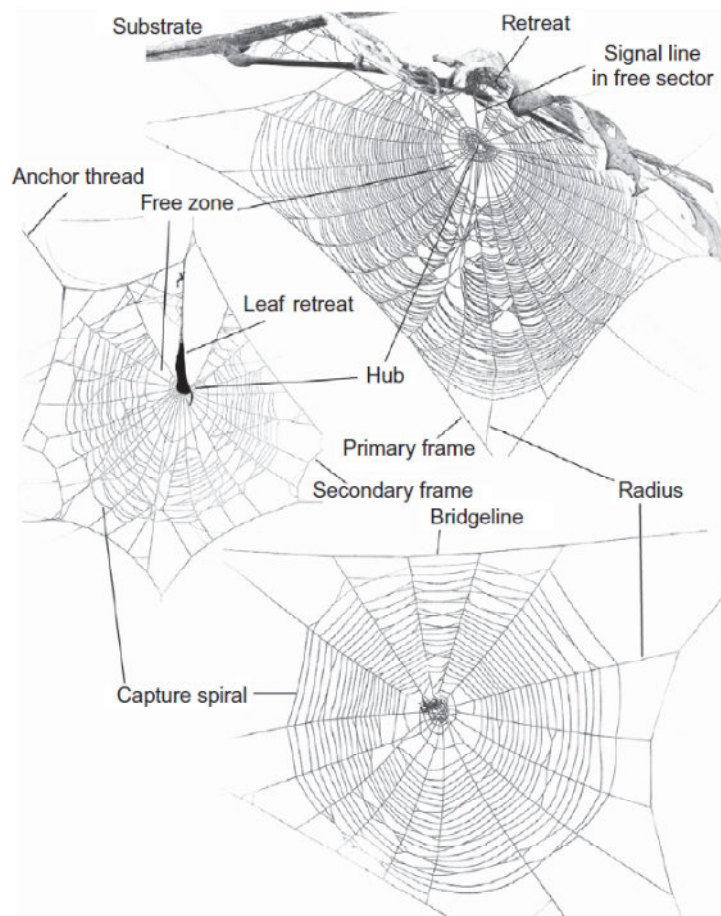


FIG. 2 Orb web terminology showing renderings of diverse araneid webs: an unknown juvenile from India (top), *Acusilas* sp. from China (middle) and *Caerostris darwini* from Madagascar (bottom).

**Figura 2.3 Terminología de las telas tipo orb. Fuente:(T. Z. Blackledge 2007)**

En la Figura 2.3, pueden verse algunos términos más específicos, como por ejemplo, una zona libre (free zone) en la cual no existe espiral de captura, o el marco secundario el cual tendrá una relevante importancia en este documento, aunque la configuración básica de una tela es la vista en la Figura 2.2

Las arañas, pueden incluso presentar decoraciones y señuelos en sus telas (Figura 2.4) mediante hilado e incluso por la adición de vegetación a las mismas, la función de estas decoraciones ha generado mucha controversia y actualmente solo se manejan hipótesis entre las que destacan dos; la primera asociada con la atracción de presas y la segunda, se asocia a la defensa de las arañas contra posibles depredadores. (T. K. Blackledge 2011)

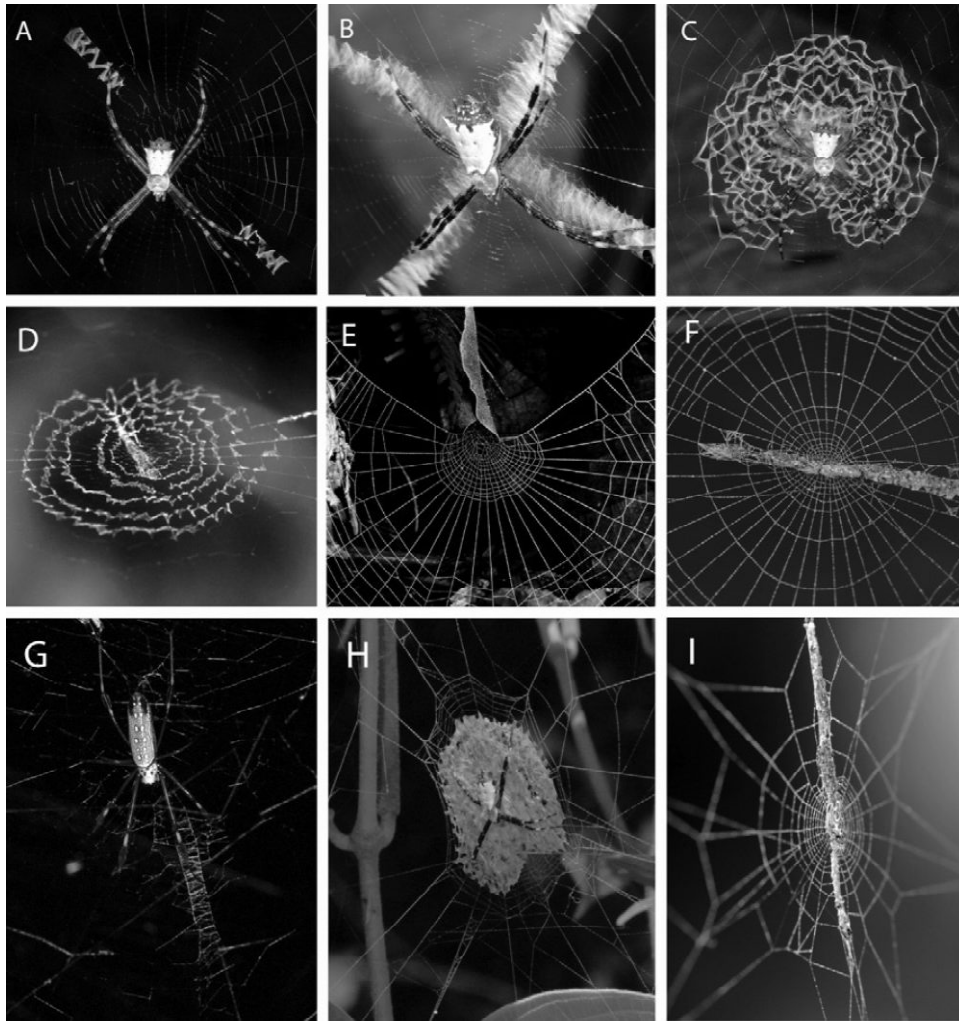


Figura 2.4 Decoraciones en telarañas. Fuente:(T. K. Blackledge 2011).

### 2.1.2 Tipos de seda

Los cuatro tipos de hilos que forman la tela tipo orb web, están formados por dos tipos de seda muy diferenciados, tanto en su producción, como en su comportamiento.

Los hilos correspondientes a la espiral de captura, están formados por una seda viscosa, esta seda se extrae de unas glándulas flageliformes y están cubiertas por gotas de pegamento acuosas, segregadas por dichas glándulas. Esta no es su única propiedad, pues posee una gran capacidad de deformación antes de la rotura, mayor que la observada en el resto de sedas (Gosline 1999).

El resto de hilos correspondientes a la tela (marco, radial y apoyo) están formados por un hilo más resistente pero que admite menos deformación que la seda viscosa (Gosline 1999), estas diferencias en las propiedades tendrán efectos en el comportamiento estructural de la tela. Este tipo de seda es extraída por la glándula “major ampullate” (MA) que es la misma que crea el drag-line, una seda a la que la araña está constantemente anclada y por la que se desplaza con seguridad a través de la tela, por la que se descuelga de los árboles, etc.

## 2.2 Propiedades de los hilos

En 1976 **Denny** estudió las propiedades físicas de las sedas y su papel en el diseño de las telas, para ello estudió a las *Araneus Sericatus* introduciéndolas en jaulas en un ambiente controlado con tamaño suficiente para que pudiesen crear telas con normalidad, de estos experimentos pudo sacar como resultado que tanto los hilos viscosos de la espiral como los hilos del frame mostraron una tensión de rotura de aproximadamente 1 GPa y una resiliencia inicial aproximadamente de 0.35. Evidenciando que la seda viscosa soporta una mayor deformación a rotura, correlacionándolas con el grado de cristalización de la proteína por la que están formadas.

Estas propiedades físicas en conjunto permiten que las telas funcionen eficazmente como elementos estructurales y asborbedores de impactos con un gasto mínimo de material y energía.

Posteriormente **With y Barth** en 1992 estudiaron las fuerzas que aplican a los hilos y sugirieron que las arañas son capaces de controlar la tensión sobre los hilos en su beneficio, mediante observaciones, tales como que la pretensión en los hilos aumenta con la masa de la araña y la contraposición de hilos radiales de manera que equilibran sus tensiones durante la construcción entre otros.

Por otro lado cuantificaron que la fuerzas presentes en las telas de la *Araneus Diadematus* disminuye desde los hilos de apoyo a los del marco y a su vez a los radiales con una relación 10:7:1, una relación que concuerda con los estudios anteriores de **Denny (1976)** en el cual para la *Nuctenea Esclopetaria* observó una relación de 6:4:1.

La seda conocida como drag-line ha constituido una fuente de interés puesto que es el material con el que construyen las telas y a su vez las soporta en sus desplazamientos verticales y permiten la captura de presas. **Cunnif et al.**, estudiaron en 1994 las propiedades térmicas y mecánicas de esta seda cuantificando mediante un ensayo de tracción, el módulo de Young promedio, tensión de rotura y la deformación de rotura de 22GPa, 1,1 GPa y 9% respectivamente. En cuanto a las propiedades térmicas fue caracterizada como estable térmicamente hasta 230°C.

**Osaki (1996)** estudió la relación entre el drag-line y el peso de la araña como coeficiente de seguridad, sugirió que encontrar una relación clara entre la resistencia mecánica y el peso de la araña serviría de base para aplicarlo como coeficiente de seguridad a otras estructuras tales como ascensores, cuerdas, aviones, puentes y fibras. Para ello utilizó los hilos segregados por la hembra de *Nephila Clavata* al caer desde una barra de madera, mostrando una curva tensión-deformación (Figura 2.5).

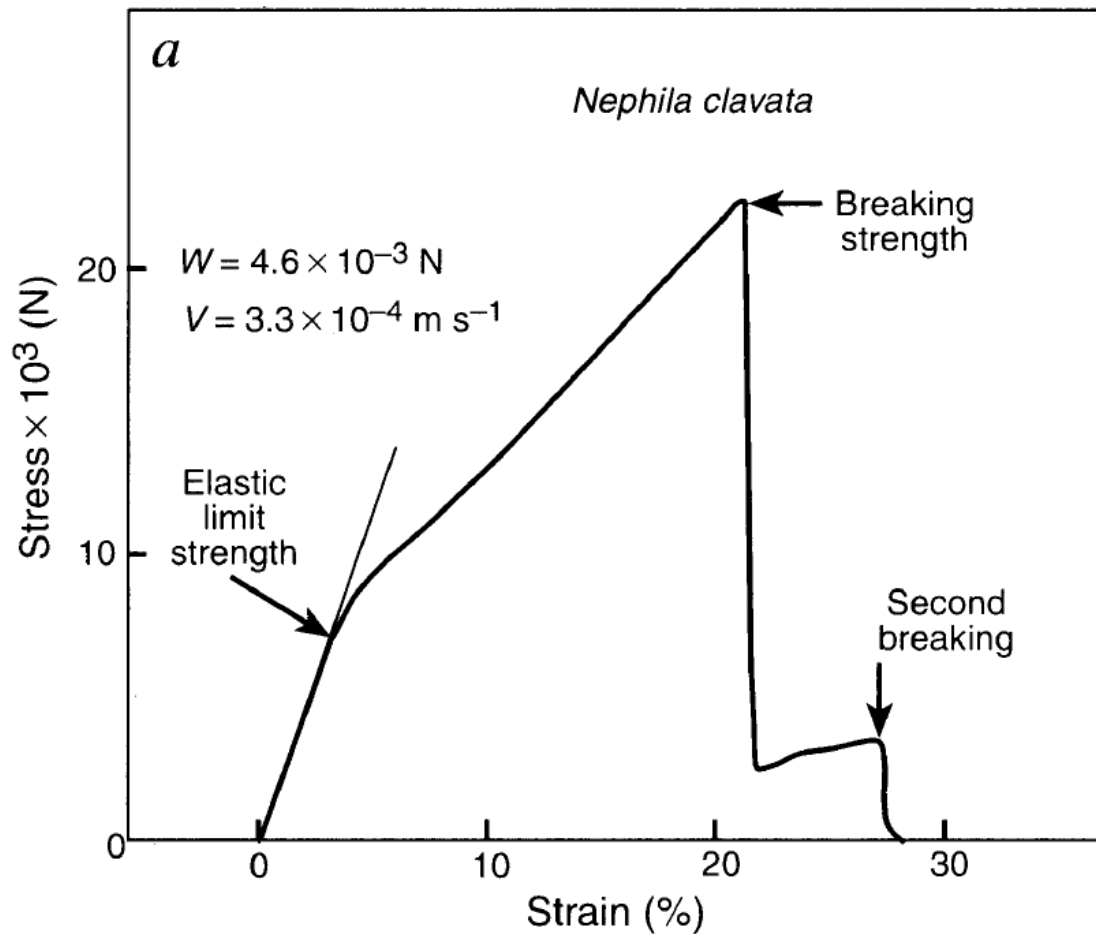


Figura 2.5 Curva tensión-deformación del drag-line. Fuente:(Osaki 1996)

Pudo observar que el límite elástico se incrementa linealmente con el aumento de peso de la araña con una pendiente alrededor de dos. La curva de tensión deformación del drag-line entra en una región no lineal cuando la tensión supera aproximadamente dos veces el peso de la araña. Esto significa que es seguro usar solo el drag-line para soportar su propio peso y el de la presa siempre y cuando no supere el doble de su peso. Este drag-line está formado por filamentos dobles, permitiendo que aunque se rompiera uno de estos filamentos el otro aun podría soportar el peso de la araña. Puede concluirse que el peso de la araña corresponder al límite elástico de estos filamentos y la rotura se alcanzaría al soportar un peso de 6 veces la araña.

**Gosline** (1999) cuantificó las propiedades de las sedas que forman las telas de arañas, separando propiedades de las sedas del drag-line y marco creadas por la glándula “major ampullate” y la seda viscosa de la espiral de captura (Figura 2.6).

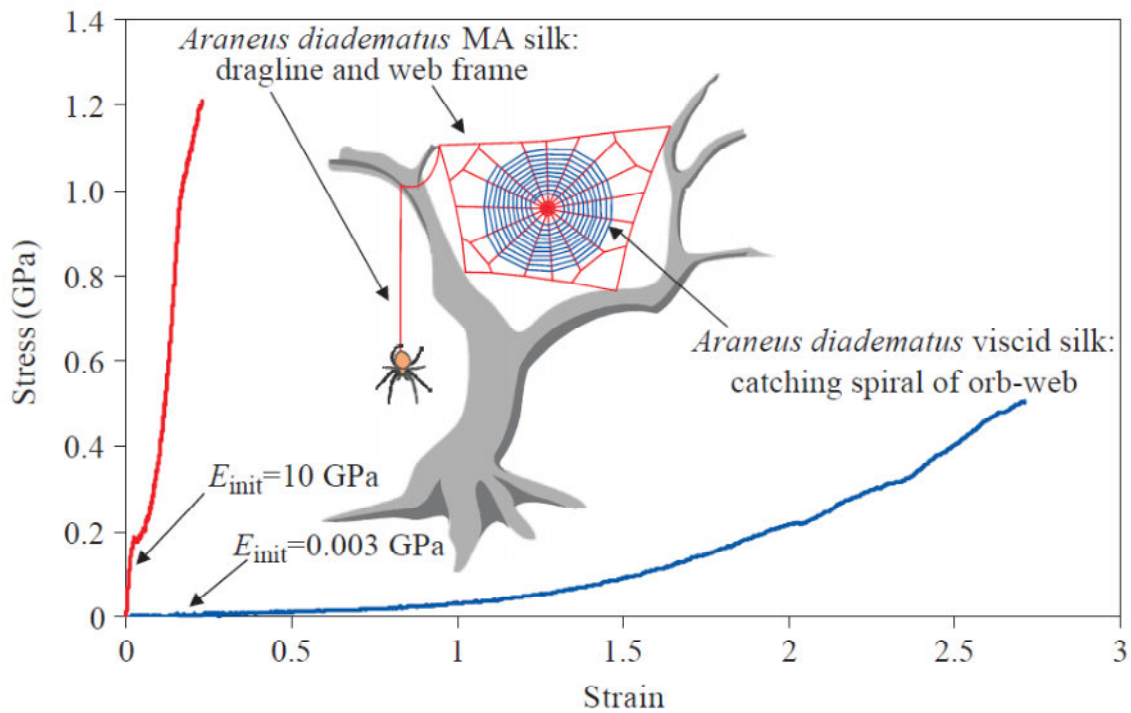


Figura 2.6 Curva tensión de formación de las dos sedas que forman las telas de arañas. Fuente:(Gosline 1999)

Puede observarse la diferencia entre las gráficas de Osaki y Gosline que presenta una curva no lineal para el comportamiento de las sedas.

Posteriormente comparó las propiedades de las telas con la de otros materiales poliméricos (Tabla 2.1). En un principio si comparamos rigidez y resistencia puede parece que sus propiedades son inferiores al Kevlar, a la fibra de carbono o al acero de alta resistencia, pero cuando uno se fija en la deformación máxima que es capaz de soportar supera en varios órdenes de magnitud a éstos.

Table 1. Tensile mechanical properties of spider silks and other materials

Material	Stiffness, $E_{init}$ (GPa)	Strength, $\sigma_{max}$ (GPa)	Extensibility, $\epsilon_{max}$	Toughness ( $MJ m^{-3}$ )	Hysteresis (%)
<i>Araneus</i> MA silk	10	1.1	0.27	160	65
<i>Araneus</i> viscid silk	0.003	0.5	2.7	150	65
<i>Bombyx mori</i> cocoon silk	7	0.6	0.18	70	
Tendon collagen	1.5	0.15	0.12	7.5	7
Bone	20	0.16	0.03	4	
Wool, 100% RH	0.5	0.2	0.5	60	
Elastin	0.001	0.002	1.5	2	10
Resilin	0.002	0.003	1.9	4	6
Synthetic rubber	0.001	0.05	8.5	100	
Nylon fibre	5	0.95	0.18	80	
Kevlar 49 fibre	130	3.6	0.027	50	
Carbon fibre	300	4	0.013	25	
High-tensile steel	200	1.5	0.008	6	

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de las telas de arañas y otros materiales. Fuente:(Gosline 1999).

La diferencia también es notoria entre la seda MA y la viscosa pues la rigidez de ésta última es mucho menor que la de la MA pero de nuevo la deformación máxima admisible por la seda viscosa es diez veces superior. Estas propiedades en conjunto permiten que sean capaces de absorber una cantidad de energía específica no asumible por el resto de materiales de la lista, y muy similar entre ambos a pesar de las diferencias existentes entre ambas.

El comportamiento histórico del material (Figura 2.7) es importante, esto es, la diferencia entre el área de las gráficas tensión deformación cuando las sedas son sometidas a ciclos de carga y descarga. En ambas sedas está sobre el 65% (Denny 1976), quiere decir que es capaz de absorber el 65% de la energía de impacto de las presas.

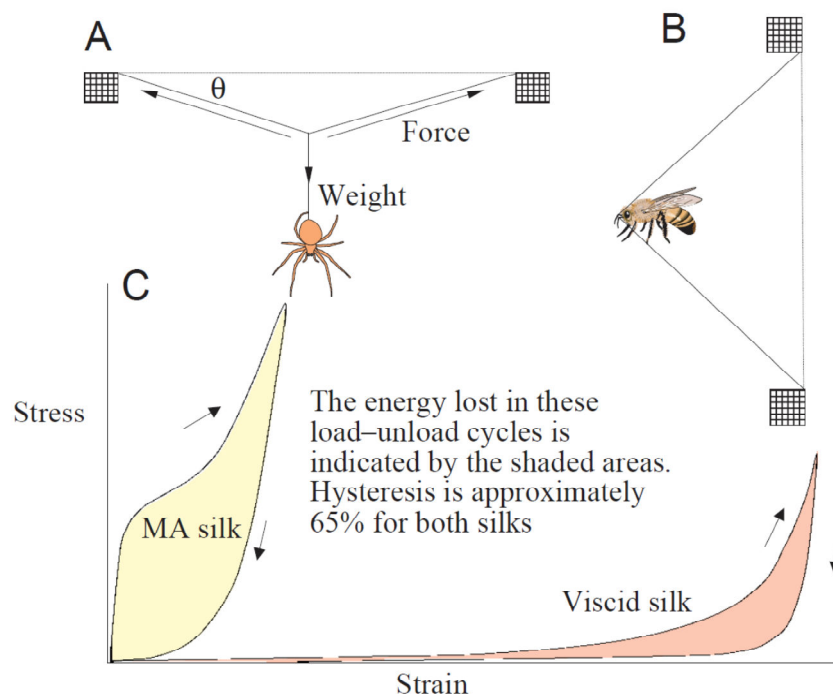


Figura 2.7 Comportamiento frente a histórico. Fuente:(Gosline 1999).

En 2003 Pérez Rigüero, J. et al, caracterizaron por primera vez las propiedades mecánicas y el comportamiento a la fractura de la seda de la araña *Argiope lobata* (Figura 2.8), esto se realizó mediante la técnica de hilado forzoso y los datos se compararon con los obtenidos previamente para la araña *Argiope trifasciata* los cuales resultaron estar en concordancia. Presentando los hilos obtenidos mediante hilado o forzoso de la tela de *A. lobata* más rigidez y menos deformaciones a rotura que los hilos de *A. trifasciata*.



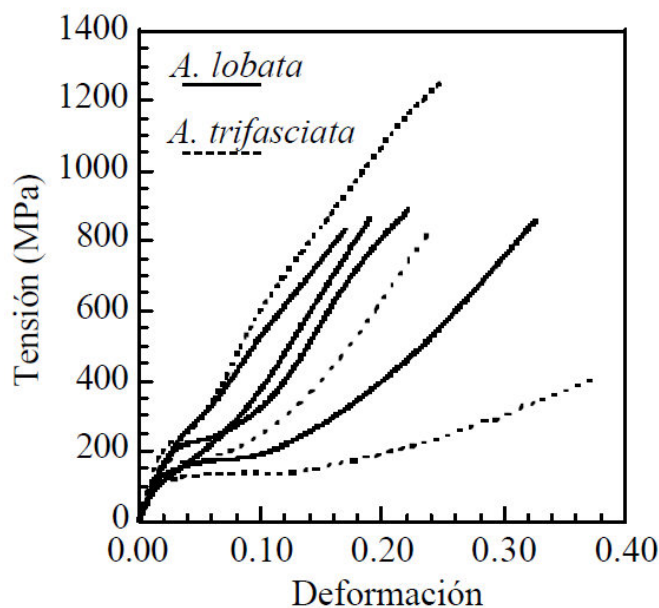


Figura 2.8 Gráfica tensión deformación de *A. lobata* y *A. trifasciata*. Fuente:(J. Pérez Rigueiro. 2003).

**Ko y Jovicic** realizaron un estudio en el que desarrollaron un modelo por elementos finitos de una tela de araña, la cual pudieron caracterizar tras haber realizado mediciones experimentales gracias a un equipo de micro test donde obtuvieron curvas de tensión deformación de la sedas bajo, tensión, compresión transversal y deformación torsional. Posteriormente compararon las propiedades mecánicas de las sedas de la araña *Nephile Clavipes* con curvas tensión-deformación de otros materiales creados por el humano (Figura 2.9).

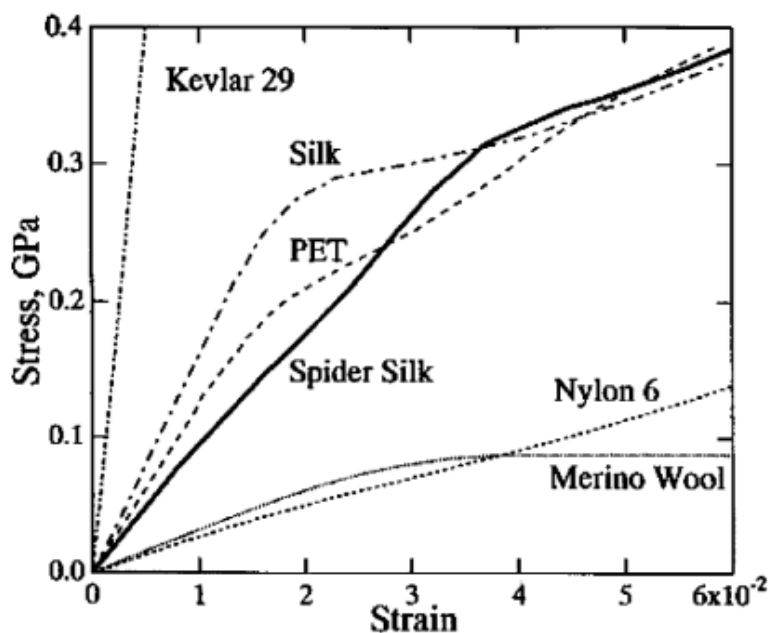
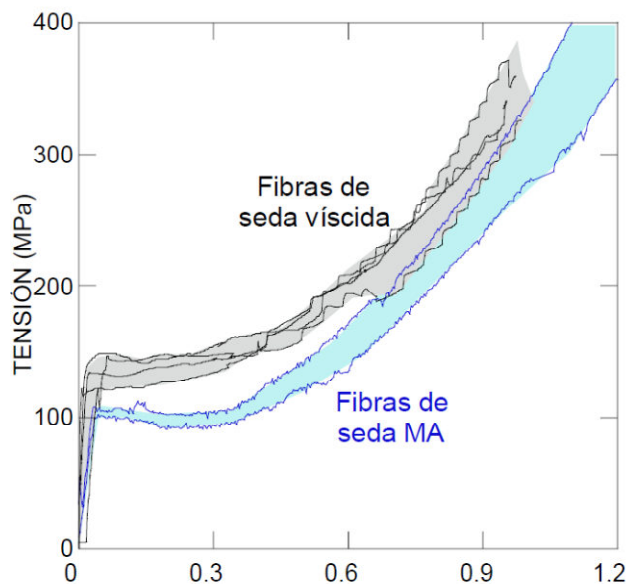


Figura 2.9 Curva tensión deformación, comparando distintos materiales. Fuente:(Ko 2004).

Este estudio pone de manifiesto de nuevo que la seda de las araña es un material con propiedades de resistencia y deformación singular, del cual poder aprender para desarrollar los materiales del futuro.

**Plaza et al.** (2008) desarrolló una metodología para estudiar las propiedades de los hilos viscosos perteneciente a la espiral de captura. En el estudio encontró una gran variabilidad en los valores y ninguna correlación de las propiedades en función de su posición en la tela, lo que debe tener en cuenta en los análisis estructurales. Esto abre un camino a la hora de desarrollar estudios más profundos capaces de definir un mapa de la resistencia de los hilos en todas las regiones de captura.

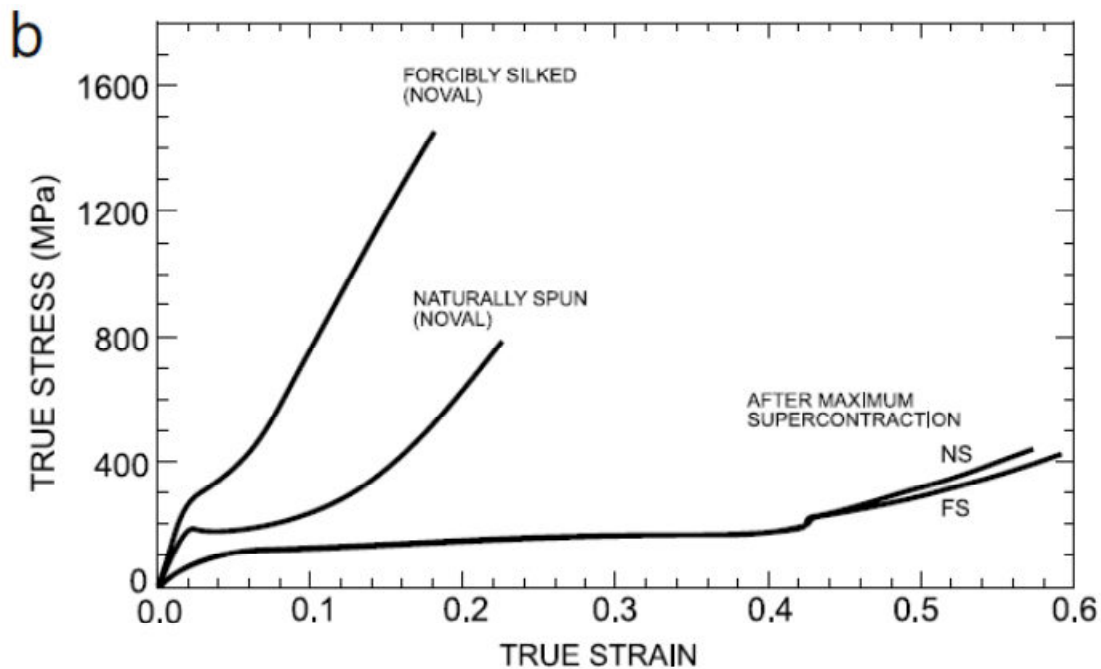
La supercontracción es un fenómeno producido al introducir las sedas en agua provocando una contracción de hasta el 40% de su longitud. Aprovechando este fenómeno realizaron un ensayo de las propiedades mecánicas de la seda viscosa y la seda “major ampullate” presentando sorprendentemente una curva tensión deformación muy similar (Figura 2.10).



**Figura 2.10** Curva tensión deformación de la seda viscosa y major ampullate. Fuente:(Plaza 2008)

**Boutry y Blackledge.**, (2009) manifestaron de nuevo las diferencias existentes entre las sedas viscosas y las creadas en la glándula “major ampullate” para telas cobwebs creadas por las arañas *A. tepidariorum*. Para ello recolectaron sedas tanto de hilos de soporte como de la espiral para posteriormente analizarlas por métodos experimentales. Los resultados fueron que ambas sedas presentaron diferencias tanto en las propiedades mecánicas como en las propiedades estructurales. Estas propiedades pueden ser modificadas mientras teje la tela tanto a nivel de propiedades mecánicas como nivel de propiedades estructurales. Por tanto demuestran que las arañas son capaces de modificar a las propiedades de los hilos mientras tejen sus telas, de manera que puedan crear en todo momento un tipo de hilo u otro en función del rol que vaya a tener en la tela.

**Elices et al.**, (2010) realizaron una revisión sobre los resultados de la bibliografía existente hasta entonces sobre las propiedades mecánicas de las fibras sometidas a la supercontracción, debido a este fenómeno las variabilidades observadas anteriormente en otros estudios de cada tipo de seda desaparecían, permitiendo una clasificación de toda la gama de propiedades a tracción de manera coherente. Para ello entienden que las propiedades mecánicas finales de los hilos guardan mucha relación con el procesamiento de las fibras y diferentes autores han tratado de establecer una relación entre la supercontracción y las propiedades mecánicas de las sedas.



**Figura 2.11** Curva tensión-deformación comparando sedas antes y después de aplicarles el proceso de supercontracción. Fuente:(Elices 2010)

En la Figura 2.11 se puede ver el efecto de la supercontracción en sedas obtenidas mediante hilado forzado o sedas tejidas naturalmente en las telarañas. En un primer análisis se observan diferencias notables en el comportamiento de ambas sedas, y una vez que se ha sometido al proceso de súper contracción las curvas de tensión deformación de ambas se igualan, evidenciando que éste fenómeno borra el historial de la seda.

**Tarakanova y Buehler** (2012), estudiaron las diferencias entre los dos tipos de sedas producidas por las arañas para la espiral de captura, la seda cribellate y la viscosa. En él evidenciaron que la seda cribellate es generalmente más fuerte pero menos extensible que la seda viscosa y sugieren que puede ser debido a que esta última procede de una evolución de la seda cribellate, que la espiral de captura cambio su rol de captura de presas a otras funciones estructurales.

Para ellos el principio evolutivo de las telas de araña es el mecanismo de deformación en vez de un aumento en la capacidad de absorber energía por las telas. Para ello atribuyen esta disminución en la capacidad de absorción de energía en una deformación efectiva de los hilos espirales. Esto se consigue por que unos hilos espirales con mayor

deformación requieren mínima resistencia para optimizar su efecto. Por lo tanto la deformación domina sobre la resistencia en la seda de captura, puesto que en las telas la resistencia de los hilos disminuye al aumentar la deformación soportable por éstos.

Para concluir, en la Tabla 2.2 Tabla 2.2 Resumen de las propiedades de las telas de arañas. Fuente: se puede ver una tabla resumen de las propiedades de las telas de arañas encontradas en la bibliografía y realizada por Jaime Teus Fernández para su Proyecto Fin de Carrera, en la cual se puede tomar una idea general de lo mostrado hasta ahora.

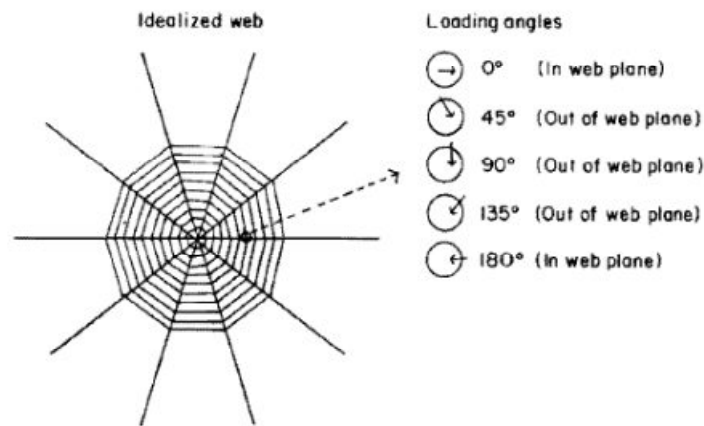
Autor	Año	Región de los hilos	Especie de araña	Tensión de rotura (GPa)	Deformación de Rotura	Módulo de Young (GPa)
Blackledge et al.	2005b	Marco	Latrodectus Hesperus	1.5	0.35	11
		Radial & Espiral	Latrodectus Hesperus	1.45	0.39	9
Gosline et al.	1999	Marco & Radial	Araneus Diadematus	1.1	0.27	10
		Espiral	Araneus Diadematus	0.5	2.7	0.003
Lin & Sobek	1998	Espiral		0.8		0.5
		Radial		1.2		2.6
		Marco		1.25		5.555
		Suspensión		1.3		7
Moore & Tran	1999	Media	Latrodectus Hesperus	1.1	0.22	6
		Marco	Nephila Maculata	1.1	0.46	
		Marco	Araneus Serratus	0.81	0.24	
		Radial	Araneus Diadematus	1.2	0.4	
		Espiral	Araneus Serratus	1	2	
Blackledge et al.	2005a	Espiral	Latrodectus Hesperus	0.6	5	
		Marco	Latrodectus Hesperus	1.9	0.3	
Boutry & Blackledge	2009	Marco	Achaearanea tepidariorum	1.638	0.35	11.4
		Radial & Espiral	Achaearanea tepidariorum	1.569	0.44	9.9
		Radial & Espiral	Latrodectus Hesperus	1.316	0.39	8.9
		Radial & Espiral	Latrodectus Hesperus	0.957	0.47	9.2
		Marco	Latrodectus Hesperus	1.069	0.42	10.7
		Marco	Latrodectus Hesperus	1.1	0.22	6
Cunniff et al.	1994	Media	Nephila Clavipes	1.1	0.09	22
		Media	Nephila Clavipes (Controlled)		0.181	12.7
		Media	Nephila Clavipes (Natural)		0.167	10.9
		Media	Argiope Aurantia (Controlled)		0.2	9.7
		Media	Argiope Aurantia (Natural)		0.206	9.9
		Media	Nephila Cruentata		0.199	3.6
		Media	Parawixia Audax		0.212	3.1
		Media	Argiope Argentata		0.172	4
		Marco	Araneus Diadematus		0.31	2.8
Espiral	Araneus Diadematus		5.17			
Elices et al.	2010	Media	Argiope Trifasciata	0.78	0.26	
Rigueiro et al.	2003	Media	Argiope Lobata	0.77	0.22	7
		Media	Argiope Trifasciata	0.6	0.2	7

Tabla 2.2 Resumen de las propiedades de las telas de arañas. Fuente:(Teus Fernández 2012)

### 2.3 Comportamiento estructural

Craig (1987) estudió la relación entre la arquitectura y las sedas de las telas de arañas y sus propiedades para la absorción de energía. Para realizar este análisis en primer lugar

midió la energía cinética que era capaz de absorber distintas telarañas por dos métodos, uno artificial cargando las telas y otro estimando las energías cinéticas de presas ya capturadas por la tela. En segundo lugar realizó mediante un programa de ordenador una tela ideal en la que realizar simulaciones y estudiar su comportamiento estructural (Figura 2.12).



**Figura 2.12** Tela ideal creada para análisis estructurales. Fuente:(Craig 1987)

Sobre este modelo varió diferentes propiedades de la arquitectura de las telas para analizar su comportamiento, tales como la pretensión radial, el número de vueltas de la espiral en relación al número de hilos radiales y varió el ángulo de aplicación de la carga y desplazando las uniones entre hilos espirales y radiales. No obstante no encontró relación entre la capacidad para absorber energía por las telas y el número de hilos radiales, o el número de hilos espirales que permitiese predecir su comportamiento. Sin embargo sí pudo asociar características de la tela que indican el mecanismo de absorción de energía y que podría ser usadas para predecir qué tipo de insectos pueden interceptar. Manifestando que la relación de hilos radial entre las vueltas del hilo espiral pueden indicar que tipo de presas captura esa tela. Para relaciones mayores que uno se asocian con telas de alta absorción de energía mientras que telas con relaciones menores que uno son asociadas a telas de abaja absorción de energía.

**Lin et al.,** (1995) mostraron para la revista Nature un análisis de la ingeniería estructural de una tela utilizando simulaciones por ordenador en el cual observaron el importante efecto que tiene la fuerza aerodinámica en la captura de presas, observación que confirmaron con métodos empíricos sobre telas reales.

El comportamiento de histéresis de los hilos radiales cuando se estiran y relajan conduce a una disipación de energía. Sin embargo, las simulaciones y experimentos muestran que esta forma de disipación de energía es demasiado débil para explicar toda la energía absorbida por una tela, y que sólo mediante la inclusión del trabajo realizado por las fuerzas aerodinámicas puede entenderse tal disipación de energía. La arquitectura de las telas se aprovecha de la amortiguación aerodinámica,

proporcionando una red fina que cubre un área grande, pero sin penalización por usar hilos muy finos. (L. E. Lin 1995)

Posteriormente **Lin y Sobek** (1998) hablaron sobre la jerarquía estructural presente en las telas y que domina su comportamiento presentadas en el siguiente orden:

- Fuerzas de pretensión.
- Rigidez relativa de los hilos
- Rigidez geométrica de la tela

A través de diversos experimentos evidenciaron la influencia potencial de estos factores a la hora de distribuir las tensiones dentro de la tela. Especialmente la rigidez relativa de los hilos es explicada mediante el principio por el cual los elementos más rígidos soportan la mayor proporción de cargas aplicadas y cuanto mayor sea la diferencia entre las rigideces de los hilos mayor será este efecto. Por tanto en una tela de araña la distribución de las fuerzas resultantes es causada por la interacción entre las fuerzas de pretensión la rigidez relativa de los hilos y la rigidez geométrica de la tela en conjunto.

A partir de estos análisis, se observó que las fuerzas promedio se distribuyeron gradualmente entre hilo espiral, radial, marco y de apoyo. Este es el orden jerárquico por el cual la rigidez y la pretensión de los hilos aumenta. Finalmente sugirieron que estas rigideces relativas pueden otorgar a las telas una mayor seguridad estructural, permitiendo que zonas más importantes para la tela tengan una mayor resistencia y el fallo se produzca en zonas menos relevantes de fácil reposición por las arañas y que la proteína más importante de la tela no se pierda y pueda ser reciclada. (L. S. Lin 1998)

**Alam et al**, (M. W. Alam 2007; M. J. Alam 2005) estudiaron la relevancia de la presencia de elementos rotos en telas de arañas y se encontraron que en telas con pretensión la rotura de cualquier hilo radial sólo tiene efectos locales permitiendo que la telaraña mantuviese sus función de captura, poniendo de nuevo en evidencia la importancia de la pretensión en los hilos capaz de aumentar la rigidez transversal de las telas.

En este estudio realizaron simulaciones por elementos finitos sobre una telaraña ideal (Figura 2.13) y comparada posteriormente con estudios experimentales. Los resultados apoyaron las conclusiones obtenidas por otros autores en cuanto a que la amortiguación aerodinámica juega un papel crucial en la vibración de la tela (L. E. Lin 1995) y por otro lado la distribución jerárquica de la rigidez a lo largo de la geometría y la pretensión inicial mejoran la tolerancia al daño de las telas (L. S. Lin 1998).

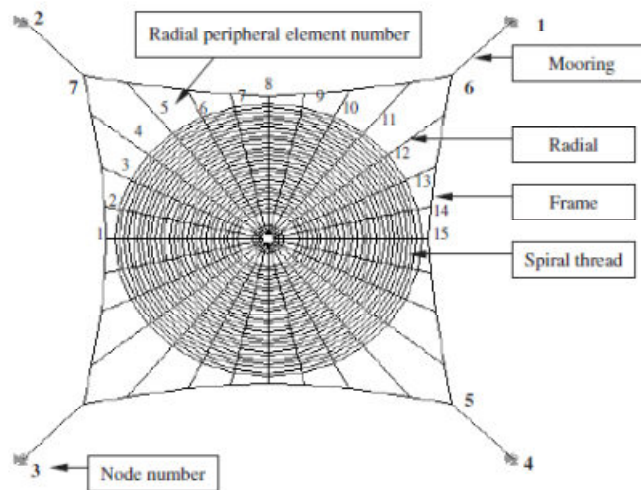


Figura 2.13 Modelo por elementos finitos de la tela de araña. Fuente:(M. J. Alam 2005).(M. W. Alam 2007)

Más adelante **Cranford** (2012) en un estudio mediante simulaciones por ordenador y experimentales, evaluó la capacidad de respuesta de las telas cuando se eliminan secciones de ésta y se les aplica una carga. La eliminación de hasta el 10% de los hilos en diferentes zonas, tuvo poco impacto sobre la respuesta de las telarañas, es más, se comprobó que la capacidad de carga de las telas aumentaba de un 3 a un 10% con la introducción de defectos.

Se observó que en todos los casos el fallo se limitaba al hilo en el que se aplicaba la carga, esto provocaba que cuando el hilo era de tipo espiral la distorsión en la tela era prácticamente aislada, mientras que la carga de un hilo radial dio lugar a deformaciones más grandes. Aunque en ambos casos el fallo permaneció siendo localizado.

**Aoyanagi y Okumura**, (2010) en un estudio similar al de (M. W. Alam 2007) desarrollaron un modelo para describir las telas de araña y estudiar su comportamiento. Este modelo tiene una solución analítica formal cuando no hay hilos rotos. En este estudio afirman que cuando los hilos radiales son lo suficientemente resistentes en comparación con los espirales el modelo está libre de concentración de tensiones, incluso si hay elementos rotos (Figura 2.14). Según esto las arañas pueden aumentar la longitud del hilo espiral para hacer telas más densas (capaces de atrapar pequeños insectos) o a justar el número de hilos radiales sin disminuir la resistencia a impacto de la tela.

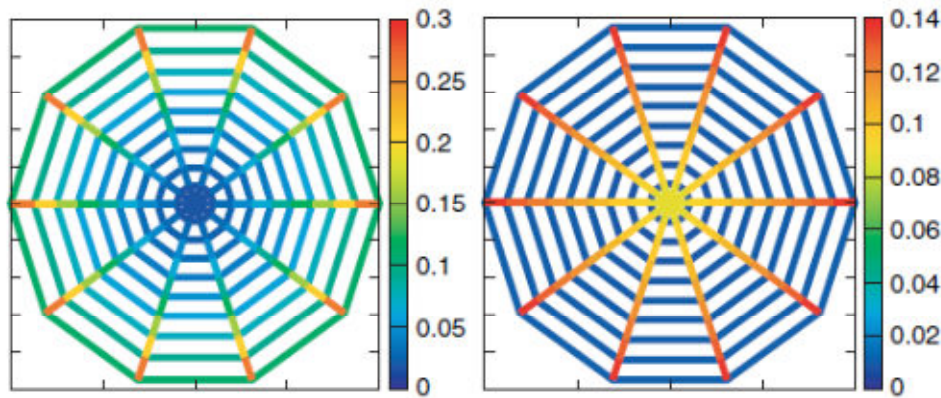


Figura 2.14 Distribución de las fuerzas en una escala de colores. A la izquierda una tela con misma rigidez para hilos radiales y espirales, y a la derecha una tela con una rigidez radial 10 veces superior a la espiral. Fuente:(Aoyanagi 2010)

**Cranford** (2012) publicó para Nature un estudio donde explica cómo la respuesta no lineal de las telas de araña es la clave del comportamiento estructural tan eficiente y elogiado de las telarañas. Para ello realizó modelos de telas de arañas con comportamientos reológicos distintos para los hilos de las telas; uno derivado atómicamente, un comportamiento elástico lineal y un comportamiento elástico perfectamente plástico (Figura 2.15). Todos ellos con misma deformación y tensión de rotura.

En la Figura 2.15 puede verse que para un comportamiento reológico no lineal de la seda de araña, el fallo se produce de manera localizada en la zona de carga, mientras que en el resto de los casos induce el fallo de las zonas adyacentes. Esto lo explica cómo parte de la evolución de las sedas de araña, las cuales han evolucionado hacia la localización de daños, introduciendo un nuevo concepto de “elementos de sacrificio”. Debido al esfuerzo metabólico que requiere reconstruir una tela entera, el fallo localizado de estos “elementos de sacrificio” es la opción preferencial puesto que le permite seguir funcionando y capturando presas en otras zonas de la tela y por otro lado permitiría una reconstrucción de esa zona, lo cual sería menos costoso que recrear la tela entera.



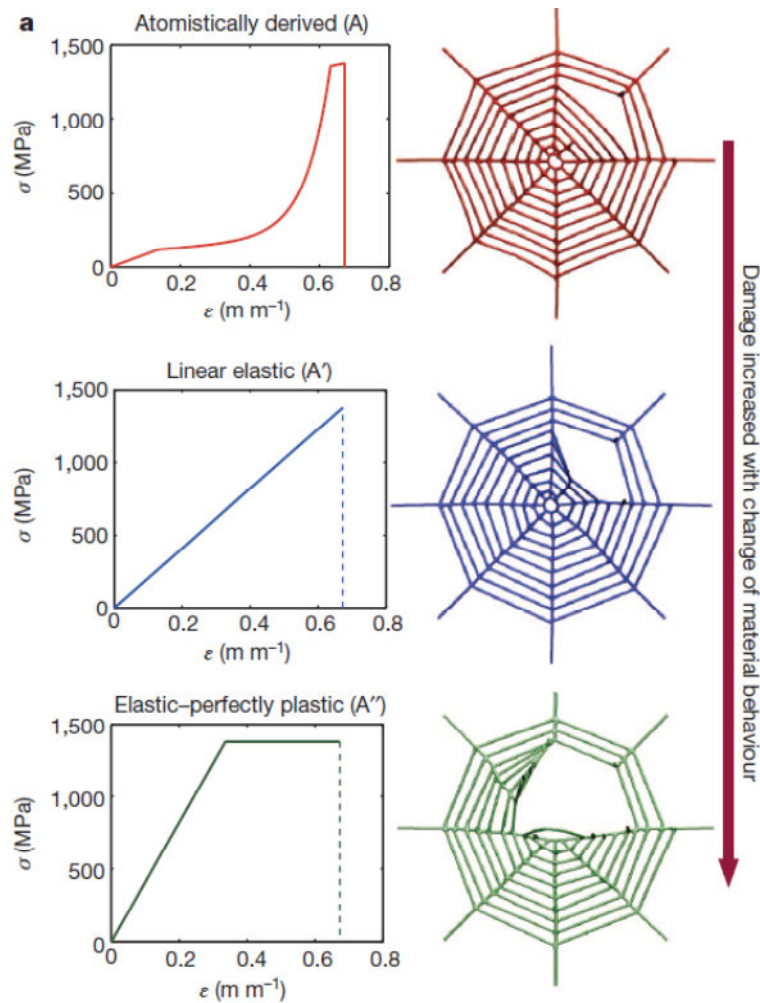


Figura 2.15 Comparación de los resultados para mismos estados de carga. Fuente: (Cranford 2012).

Sensenig et al., (2012) integraron datos de vídeo de alta velocidad de presas siendo capturadas por telarañas y estudió la disipación de energía por trabajo aerodinámico de las telas y por los hilos radiales y espirales.

La disipación de energía por las telarañas tipo orb pueden dividirse en tres componentes:

- Disipación interna de la seda radial
- Disipación interna de la seda espiral
- Resistencia aerodinámica al movimiento de la tela

Los resultados de los distintos análisis determinaron que la seda radial es la que domina los efectos de absorción de energía en las telas de araña, siendo aproximadamente el 100 por cien del trabajo en las telas más grandes. La seda espiral y el trabajo aerodinámico aportan en los casos más favorables de un 30 a un 10 por cien, respectivamente del trabajo total para detener la presa. El autor sugiere que esto puede explicar la evolución de las sedas viscosas dado que su papel no es clave estructuralmente y pueden adaptarse a otras condiciones tales como mantener la presa adherida a la tela. Por ejemplo, la baja rigidez de la seda espiral promueve la envoltura

de presa durante su captura, de modo que una mayor densidad espiral puede favorecer este efecto.

## 2.4 Análisis sobre la geometría de las telarañas

**Vollrath** ha estudiado durante muchos años el mundo de las arañas, siendo numerosas sus aportaciones a esta rama de la ciencia. En 1985 publicó un artículo junto a **Mohren** en el que analizaban la geometría de las telas pertenecientes a *Areaneus diadematus*.

Estas arañas tejen telas tipo orb y en dicho artículo tratan de despejar la controversia existente hasta el momento sobre el tipo de espiral presente en las telas de arañas, pues a la vista de su geometría es claro que presenta dos tipos de espirales geoméricamente distintas; tipo logarítmica o aritmética (Figura 2.16). Para ello analizaron fotografías por ordenador mediante digitalización calculando las coordenadas XY de las telas y comparando según la definición de ambos tipos a cuál se asemejan más desde un punto de vista matemático. En la mayor parte de imágenes encontraron una espiral de captura de tipo arquimedea (aritmética) y sugirieron que la espiral de tipo logarítmica pertenecía a una espiral provisional que desarrolla la araña al tejer la telaraña. Ambas espirales también son creadas por glándulas diferentes y presentan propiedades mecánicas diferentes.

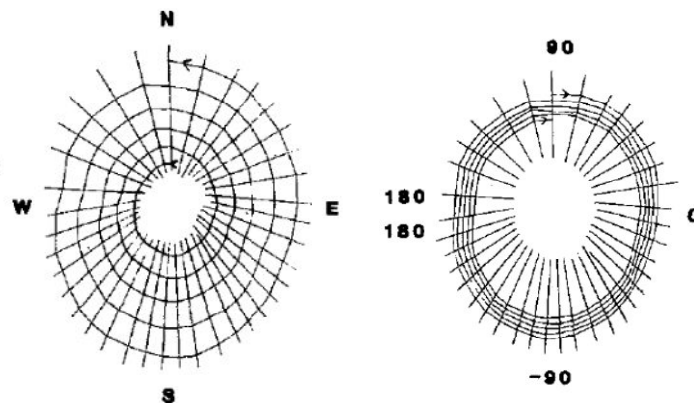


Figura 2.16 Espiral logarítmica (izquierda) y aritmética o arquimedea (derecha). Fuente:(F. M. Vollrath 1985)

**Vollrath et al** (1997) estudiaron más adelante el efecto de diversas variables ambientales en la geometría de las telas de la misma especie de araña, para ello utilizaron cinco variables de control:

- Soporte de la tela.
- Viento incidente en la tela.
- Temperatura.
- Humedad.
- Suministro de seda.

Todas afectaron a la geometría de la telaraña de tal manera que la araña siempre trató de adaptarse a las condiciones ambientales, aunque no pudieron dar explicaciones sobre

cuál es la razón por la que frente a todos estos cambios modifican la geometría, si se demostró que las condiciones ambientales afectan al diseño geométrico de la telaraña. En este mismo análisis midieron los diámetros de los hilos para cada tipo de hilo y los presento en una tabla utilizada por (Teus Fernández 2012) para los parámetros geométrica de las telas de araña, los cuales pueden verse en la Tabla 2.3.

	Normal	Small	Horizontal	Vertical
Frame area	900 cm <sup>2</sup>	225 cm <sup>2</sup>	300 cm <sup>2</sup>	300 cm <sup>2</sup>
No. of spiders	106	16	11	9
No. of webs	310	27	21	18
Radii number	33.4 ± 0.29	33.1 ± 1.11	24.8 ± 0.94*	27.9 ± 0.92*
Radial length	3383 ± 48	2240 ± 84*	1605 ± 121*	1860 ± 61*
Spiral length	9487 ± 211	7471 ± 390	4847 ± 400*	5934 ± 292*
Mesh				
number:				
top	26.5 ± 0.44	27.3 ± 1.14	16.3 ± 1.33*	23.8 ± 1.09
bottom	33.3 ± 0.47	34.4 ± 1.36	18.9 ± 1.23*	30.7 ± 1.22
right	28.1 ± 0.48	29.1 ± 1.15	21.5 ± 1.44*	19.4 ± 1.04*
Mesh spacing:				
top	2.46 ± 0.041	1.51 ± 0.040*	2.01 ± 0.104	2.26 ± 0.097
Bottom	2.40 ± 0.037	1.66 ± 0.075*	1.89 ± 0.095	2.05 ± 0.081
right	2.24 ± 0.040	1.49 ± 0.057*	2.11 ± 0.140	1.45 ± 0.071*

Tabla 2.3 Parámetros geométricos de la tela de araña *Araneus diadematus*. Fuente:(F. D. Vollrath 1997)



### 3 Propiedades del modelo

El comportamiento dinámico presente en la captura de presas por las telas de araña, (debido a la rapidez del impacto y a la respuesta no lineal de la tela) ha llevado a utilizar el código de elementos finitos explícito, ABAQUS/EXPLICIT, puesto que es idóneo para problemas dinámicos no lineales como los que se presentan en este documento.

#### 3.1 Ecuación constitutiva

Muchos autores, han destacado el papel no lineal del comportamiento de la seda de araña (Cranford, 2012; Boutry, 2009), en el modelo utilizado en el presente proyecto, se ha utilizado una ecuación constitutiva que representa dicho comportamiento. La ecuación constitutiva se caracteriza por una fase inicial hasta fluencia, donde se produce una marcada disminución de su endurecimiento por deformación, debido a la estructura de nanocompuestos de los hilos. Finalmente éstos se rigidizan antes de la rotura.

Esta ecuación constitutiva (Figura 3.1) fue desarrollada e implementada en una subrutina en FORTRAN para el programa ABAQUS por el profesor Ramón Zaera.

El comportamiento de los hilos ha sido definido mediante la ley de Hooke (Ecuación 3.1).

$$\dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon}$$

**Ecuación 3.1 Ley de Hooke.**

El criterio de fluencia adoptado (Ecuación 3.2), es el correspondiente al caso unidimensional

$$f(\sigma, \xi) = |\sigma| - \sigma_Y(\xi)$$

**Ecuación 3.2 Criterio de fluencia. Fuente: R. Zaera.**

Donde la tensión de fluencia  $\sigma_Y(\xi)$  es proporcional a un parámetro de endurecimiento  $\xi$  y queda definida mediante una expresión (Ecuación 3.3) que se ajusta a la curva propuesta por (Cranford 2012).

$$\sigma_Y(\xi) = C + \beta\xi + \alpha_0 \exp(\alpha_1\xi)$$

**Ecuación 3.3 Función de endurecimiento. Fuente R. Zaera.**

Donde  $C$ ,  $\beta$  y  $\alpha_0$  son parámetros del material. Por último, se emplea una regla de flujo plástico asociada, definida por la Ecuación 3.4,

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\xi} \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \dot{\xi} \text{sign}(\sigma)$$

Ecuación 3.4 Flujo de deformación plástica. Fuente: R. Zaera

A continuación, puede observarse (Figura 3.1) la forma de la gráfica tensión deformación, para los tres tipos de materiales considerados en el estudio (espira, radial y marco/apoyo), y definido por las ecuaciones constitutivas desarrolladas por el profesor R. Zaera.

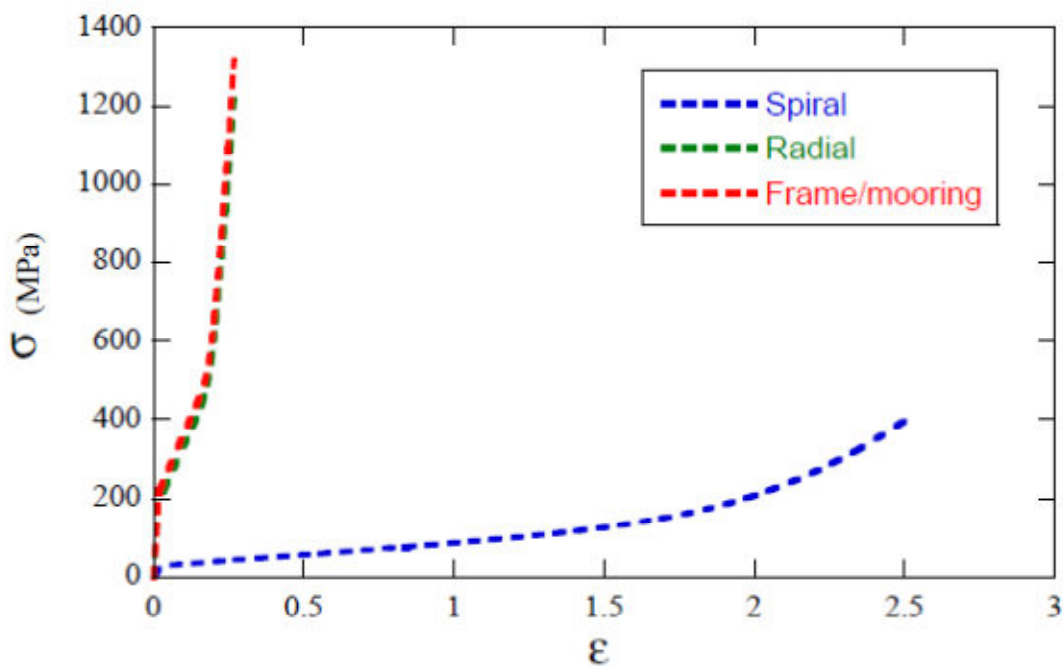


Figura 3.1 Ecuación constitutiva del comportamiento de los hilos. Fuente: (Zaera 2013)

En la Tabla 3.1 pueden verse los parámetros que definen esta ecuación constitutiva donde:

- $\Phi$  es el diámetro de los hilos.
- $E$  representa el módulo elástico correspondiente a la fase inicial
- $\sigma_{Y0}$  representa el límite de fluencia inicial.
- $\beta$ ,  $\alpha_0$ , y  $\alpha_1$  son parámetros del material.
- $\varepsilon_{fail}$  es la deformación de rotura.

	$\phi$ ( $\mu\text{m}$ )	$E$ (GPa)	$\sigma_{Y0}$ (MPa)	$\beta$ (MPa)	$\alpha_0$ (Pa)	$\alpha_1$ -	$\varepsilon_{fail}$ -
Mooring/frame	5.0	12.0	220	2060	0.19	140.2	0.27
Radial	3.5	12.0	190	1980	3.1	115.5	0.27
Spiral	2.3	1.2	30	58.9	$1.123 \cdot 10^5$	3.53	2.5

**Tabla 3.1** Diámetros y propiedades del material que definen su comportamiento tensión-deformación utilizada en las simulaciones. Fuente: R. Zaera.

### 3.2 Fuerzas aerodinámicas

Las fuerzas aerodinámicas han sido implementadas por el profesor Ramón Zaera en el modelo de elementos finitos desarrollado. Para ello, se ha idealizado la geometría de los hilos, como cilindros circulares de sección transversal constante, para cada tipo de hilo.

A partir de la idealización de la geometría, suponiendo sección constante en cada tipo de hilo, se puede calcular el coeficiente de resistencia aerodinámica  $C_D$ . Este coeficiente se define para un cilindro infinito de diámetro  $\phi$  y dispone de tres regímenes de comportamiento en función del número de Reynolds (Ecuación 3.5) (Tritton 1988).

$$Re = \frac{|\vec{v}_n| \phi}{\kappa}$$

**Ecuación 3.5** Número de Reynolds.

Donde:

- $|\vec{v}_n|$  componente normal de la velocidad de los hilos, relativa al aire que los rodea. Valores del orden de 1 m/s (Craig 1987)
- $\kappa$  es la viscosidad cinemática del aire y toma valor de  $16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  para aire a 300 K de temperatura y presión atmosférica

El coeficiente  $C_D$ , para valores entre 0,1 y 10 es aproximadamente inversamente proporcional al número de Reynolds en una escala biogarítmica. Con los datos de velocidad, diámetro y viscosidad cinemática aportados, el número de Reynolds toma valores cercanos a la unidad, y por tanto puede definirse la resistencia aerodinámica,  $C_D$ , como inversamente proporcional al número de Reynolds como indica la Ecuación 3.6Ecuación 3.5:

$$C_D = B \cdot Re^{-m}$$

**Ecuación 3.6** Coeficiente de resistencia aerodinámica. Fuente: R. Zaera.

Donde B y m son parámetros constantes tomados experimentalmente por (Tritton 1959) con valores 12.18 y 0,629 respectivamente. La fuerza aerodinámica ejercida por longitud de hilo, se define en la Ecuación 3.7 como:

$$\vec{\Psi}_D = -\frac{1}{2}C_D\rho_a\phi|\vec{v}_n|^2\vec{u}_n = -\frac{B}{2}\kappa^m\rho_a\phi^{1-m}|\vec{v}_n|^{2-m}\vec{u}_n$$

Ecuación 3.7 Expresión de la fuerza aerodinámica. Fuente: R. Zaera.

### 3.3 Tipo de elemento finito

Es importante seleccionar un tipo de elemento finito que represente el comportamiento de hilo/cable en las sedas de las telarañas. El elemento que se ha seleccionado es el tipo barra T3D2, el cual dispone de dos nodos por elemento, cada uno de ellos con tres grados de libertad correspondientes a los tres desplazamientos. Este tipo de elemento sólo transmite cargas en dirección axial y no transmite momentos por lo que es el más idóneo para representar el comportamiento de los hilos.

Tan importante como el tipo de elemento finito empleado, lo es el tamaño de este elemento y cuántos habrá por segmento de hilo. Utilizar un tamaño de elemento excesivamente grande puede crear en segmentos de hilos pequeños un solo elemento finito. Como se ha comentado el elemento seleccionado sólo transmite cargas en dirección axial, esto incluye tanto cargas de tracción (deseadas) como de compresión que no tienen sentido si se quiere representar el comportamiento de un hilo/cable. Para evitar cargas de compresión, se ha determinado que el tamaño de elemento debe ser tal que cada segmento de hilo esté dividido al menos en dos o tres elementos. (Figura 3.2).



Figura 3.2 Modelo generado con dos (izquierda) y tres (derecha) elementos por segmento.



Seleccionar el menor elemento de cada modelo, necesita que el generador desarrollado almacene y compare los elementos más pequeños creados en cada simulación.

El menor elemento, no necesariamente ha de ser siempre el mismo segmento de la tela, por ello, se estudiaron qué elementos pueden crearlo potencialmente, de manera que se pudiese programar el tamaño del elemento en función del menor de los siguientes valores:

- Paso de la espiral arquimedean
- Menor segmento espiral creado en la espiral arquimedean
- Menor segmento espiral creado en la espiral logarítmica
- Tamaño del segmento radial creado entre el nodo inicial de la espiral logarítmica y el siguiente nodo al cabo de una vuelta de la espiral logarítmica

### 3.3.1 Análisis de sensibilidad al tamaño del elemento finito

Se han realizado dos análisis sobre el modelo de referencia con dos y tres elementos respectivamente, para comprobar qué diferencias existen, pues si éstas no son significativas, elegir el modelo de dos elementos reduce considerablemente el tiempo de cálculo y con ello el coste computacional.

Para tomar una decisión han de definirse qué variables son vinculantes en los análisis y sobre las cuáles no deben existir diferencias significativas, estas son:

- Trabajo externo total
- Trabajo plástico total y en cada tipo de hilo
- Energía disipada por deformación total y en cada tipo de hilo

	Tiempo de simulación	Trabajo de las fuerzas aerodinámicas (J)	Energía plástica disipada (J)	Energía de deformación elástica (J)
2 Elementos	1:24:02	-2,55E-05	1,05E-05	2,70E-05
3 Elementos	2:27:46	-2,46E-05	1,02E-05	2,70E-05
Error relativo		3,70%	2,29%	0,13%

Tabla 3.2 Resultados análisis del tamaño del elemento.

A la vista de los resultados (Figura 3.2) con un 3,7% de error relativo máximo entre ambas simulaciones y un ahorro computacional de algo más de una hora, se decide por implementar el modelo de división en dos elementos la menor longitud de hilo creada.

En el Proyecto Fin de Carrera de Jaime Teus Fernández, realizó un análisis de sensibilidad al tamaño del elemento, y pudo comprobar que un tamaño de elemento menor a 0,02 metros no variaban significativamente los resultados obtenidos.

Este valor es superior en un orden de magnitud a todos los valores de los elementos claves estudiados para determinar el tamaño del elemento, por tanto, se acepta el algoritmo creado para determinar el tamaño de elemento.

### 3.4 Fuerzas de pretensión

Las fuerzas de pretensión juegan un importante papel en el comportamiento de las telas de araña (L. S. Lin 1998), por esto se incluyeron desde el primer modelo desarrollado por Teus Fernández (2012) en el que ideó el siguiente sistema para crear fuerzas de pretensión en ABAQUS de manera estable:

- Se desplazan los cuatro extremos de la tela de araña en los ejes X e Y
- Se crean apoyos en esos puntos y se finaliza el desplazamiento
- Se espera un tiempo adecuado para que la tela de araña se estabilice (Teus Fernández 2012).

### 3.5 Modelado de la presa

La presa ha sido modelada como una superficie sólida analítica, representada geoméricamente por una esfera. Jaime Teus Fernández (2012) realizó un estudio para estimar la masa de la presa, que se representa en la Tabla 3.3.

Autor	Año de publicación	Insecto	Masa (g)	Longitud del cuerpo (mm)	Longitud de las alas (mm)	Velocidad máxima (m/s)
Prokop	2006	Damselfly	0,034	33,6	-	-
		Honey Bee	0,078	14,89	-	-
Denny	1976	Mosquito	0,00189	-	3,5	3,6
		Fruit fly	0,006	-	4	1,7
		House fly	0,012	-	5,5	1,9
		Honey Bee	0,097	-	9	2,33
		Bumble Bee	0,388	-	16	1,3
		Dragonfly	0,958	-	48	0,35
Blackledge & Zevenbergen	2007	Hangingflies	0,0201	14,3	16,4	0,97
		Deer flies	0,0153	9,0	7,6	1,72
		Small grasshoppers	0,164	17,4	-	2,49
		Large grasshoppers	0,355	24,4	-	2,43

Tabla 3.3 Recopilación de la masa de las presas disponible en la literatura. Fuente: (Teus Fernández 2012).

Para el modelo de referencia se ha utilizado una presa de masa 0,03 g y un diámetro de 20 mm, aunque el generador permite modificar ambos parámetros.

### 3.6 Tipo de contacto presa / tela de araña

El contacto entre la presa y la tela de araña es una variable importante en el modelado. Este estudio ha sido realizado basándose en las telas de arañas que trabajan con hilos espirales de seda viscosa. A pesar de que el efecto del pegamento que incorporan no se

haya tenido en cuenta durante el modelado, se ha elegido un contacto que permita un comportamiento similar al que sufren las presas de estas telas.

Para ello Teus Fernández (2012) definió el tipo de contacto presa / tela de araña como:

- Contacto tangencial tipo “Rough”: presenta un coeficiente de rozamiento  $\mu$  infinito y no permite deslizamiento relativo entre ambos cuerpos.
- Contacto normal tipo “Hard contacto”: en el momento en que las distancias entre presa y tela se anulan puede transmitirse cualquier valor de tensión.

En la Figura 3.3 puede observarse el resultado de el contacto presa / tela de araña en una simulación realizada por (Teus Fernández 2012).

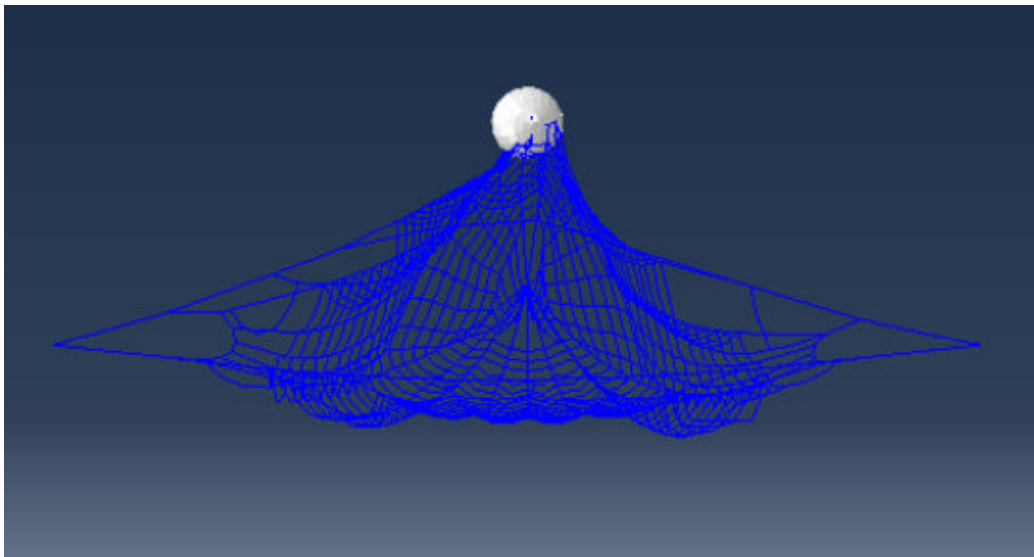


Figura 3.3 Simulaciones mostrando el tipo de contacto presa / tela. Fuente: (Teus Fernández 2012).



## 4 Generador del modelo

Debido al elevado número de análisis que se realizan en el presente documento, resulta muy costoso generar manualmente cada uno de ellos, pues aumentaría el tiempo de computación y podría inducir a errores con motivo de los numerosos pasos que han de llevarse a cabo en el modelo. Para realizar el generador se ha utilizado el programa ABAQUS por su potencia para programar scripts en lenguaje PYTHON.

### 4.1 Modelo de referencia

El generador utilizado parte del modelo creado por el compañero Jaime Teus Fernández en su proyecto fin de carrera, en el cual utiliza tres scripts con unos pasos manuales intermedios para definir el modelo de la siguiente manera:

- Primer script: define la geometría de la tela de araña.
- Segundo script: ensambla las diferentes regiones de hilos de tela de araña y crea los “steps” necesarios, el modelo del insecto y las propiedades de contacto.
- Tercer script: crea las fuerzas y condiciones de frontera del modelo. (Teus Fernández 2012)

Estos scripts toman los datos de una tabla Excel en la que se introducen los parámetros necesarios para definir el modelo.

“La tela de araña que puede ser creada con este generador tiene las siguientes características:

- Cuatro puntos de anclaje
- Marco cuadrado
- Hilos radiales equiespaciados
- Los hilos radiales siguen una espiral arquimedea (Vollrath & Mohren, 1985)
- Tres diferentes zonas en la espiral (aunque finalmente solo se haya utilizado una).“ (Teus Fernández 2012)

### 4.2 Objetivos del modelo

Para potenciar este trabajo previo y poder aplicarlo a mayores análisis se han planteando unos objetivos a mejorar en los scripts:

1. Mantener la filosofía de una tabla Excel para definir todos los parámetros necesarios en la definición del modelo.
2. Unir los tres scripts en uno solo a fin de facilitar la ejecución de casos.
3. Automatizar el proceso de creación del modelo para eliminar los pasos manuales intermedios.
4. Adaptarlo para permitir modificar el número de lados de la tela de araña.
5. Cambiar la definición de la espiral y pasar de tres espirales arquimedeanas a una espiral del hub logarítmica o arquimedea y una espiral exterior arquimedea.

6. Permitir seleccionar si se aplican fuerzas aerodinámicas.
7. Crear una variación del script que permita, manteniendo una longitud de espiral total constante variar la proporción espiral hub/espiral exterior.

Con estos objetivos se busca que a la hora de definir un nuevo caso solo sea necesario modificar el archivo Excel con los nuevos parámetros y ejecutar un único script.

### 4.3 Descripción del modelo

#### 4.3.1 Geometría de la tela de araña

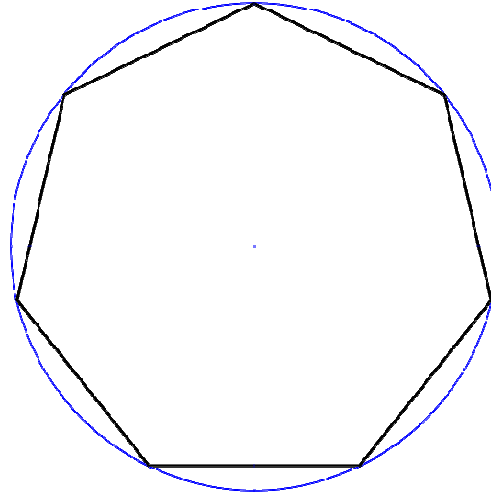
A la hora de crear un modelo con el script programado es necesario entender que datos hay que introducir y cómo éstos afectan al modelo (Tabla 4.1).

GEOMETRÍA DE LA TELA DE ARAÑA			
Propiedades	Nº de hilos radiales	Marco Secundario	Long. Hilos Susp.(m)
	33	1	4,00E-02
Longitud hub (m)	Radio interno del hub (m)	Radio interno espiral exterior (m)	Longitud espiral total (m)
0,5	7,50E-03	4,00E-02	8,73E+00
	Radio externo del hub (m)	Radio externo espiral exterior (m)	Paso espiral exterior (m)
	3,00E-02	1,10E-01	4,00E-03
Radio del marco (m)	Número de lados del marco	Lado del marco (m)	Ángulo marco Secundario (rad)
0,14142135	5	1,66E-01	0,3

Tabla 4.1 Datos necesarios para crear la geometría de la tela de araña.

##### 4.3.1.1 Radio y número de lados del marco

La geometría de la tela de araña se ha modelado como un polígono regular (Tabla 4.1) y estos por definición pueden inscribirse en una circunferencia. El valor “radio del marco” es entonces el radio de dicha circunferencia, siendo el parámetro que domine la dimensión de la tela de araña.



**Figura 4.1 Polígono circunscrito.**

El otro parámetro que va a completar la creación del polígono es el valor de número de lados del marco, este valor puede tomar cualquier valor deseado.

Esta configuración permite variar el número de lados del polígono regular manteniendo constante el radio del marco, para realizar, por ejemplo, un análisis de la influencia del número de lados.

Por lo tanto el valor “lado del marco” solo es mostrado como información para el usuario pues es un valor dependiente del radio y del número de lados del marco.

**4.3.1.2 Espiral del hub.**

El hub está formado por una espiral logarítmica (Figura 4.2), que es aquella espiral en la que su radio aumenta de forma exponencial con el ángulo recorrido por ésta. Estas espirales se definen mediante la Ecuación 4.1:

$$r = ab^\theta$$

**Ecuación 4.1 Fórmula de la espiral logarítmica.**

Donde r es el radio en función del ángulo  $\theta$  y unos parámetros constantes a y b. Estos parámetros son calculados en el script mediante una aproximación matemática conociendo la longitud, el radio interno y el radio externo de la espiral del hub (Ecuación 4.2).

$$\int_0^j ds = \int_0^j \sqrt{(dr)^2 + (r d\theta)^2} = \int_0^j \sqrt{1+b^2} r_0 e^{b\theta} d\theta = \frac{\sqrt{1+b^2}}{b} r_0 (e^{b\theta} - 1) = \frac{\sqrt{1+b^2}}{b} (r - r_0)$$

**Ecuación 4.2 Longitud del arco de una espiral logarítmica entre  $\theta=0$  y  $\theta$ .**

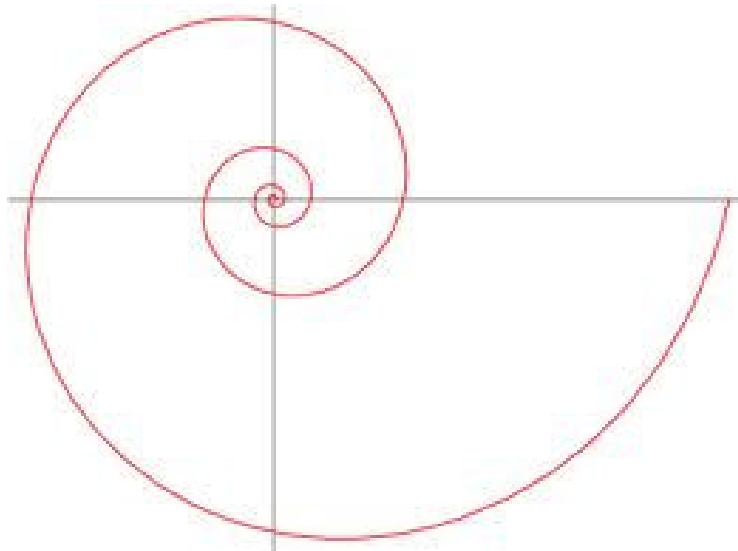


Figura 4.2 Espiral logarítmica.

#### 4.3.1.3 Espiral exterior

La espiral exterior está definida por una de tipo arquimedeano (Figura 4.3), en este tipo de espirales el radio aumenta de forma constante con el ángulo recorrido, como se puede observar en ecuación que la define:

$$r = a + b\theta$$

Ecuación 4.3.

Los parámetros a y b son números reales y  $\theta$  se refiere de nuevo al ángulo recorrido. En la hoja Excel se va a definir esta espiral mediante cuatro valores, radio interior, radio exterior, paso y longitud. El paso de la espiral define cuanto aumenta el radio de la espiral en una vuelta completa.

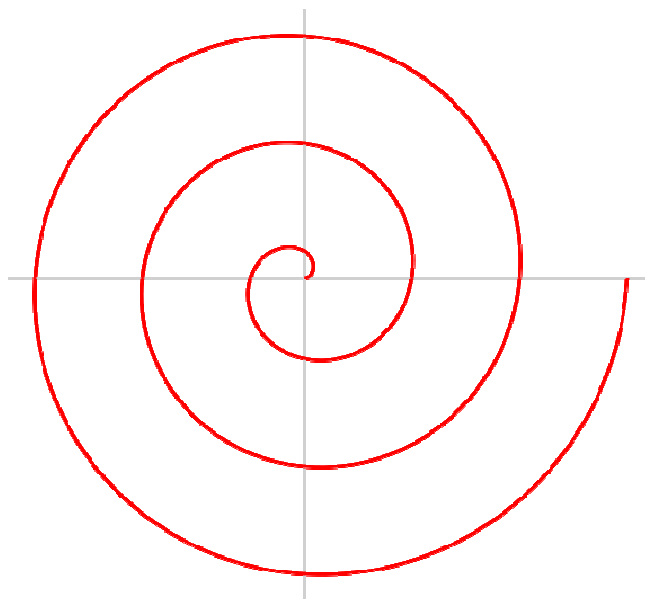


Figura 4.3 Espiral arquimedeano.



#### 4.3.1.4 Hilos radiales

Los hilos radiales se distribuyen equi-espaciados angularmente por la tela de araña y solo ha de introducirse el número de hilos que se desean.

El script se ha programado teniendo en cuenta que la longitud de los hilos radiales varía en cada tramo de ángulo recorrido y del número de lados de la tela de araña. Esta longitud también varía en caso de existir marco secundario, pues los hilos radiales que se encuentre entre éste, tendrán una longitud distinta.

#### 4.3.1.5 Marco secundario

Esta opción permite crear un marco secundario perpendicular a los hilos de suspensión de la tela de araña de manera que los hilos radiales no lleguen hasta los apoyos (Figura 4.4).

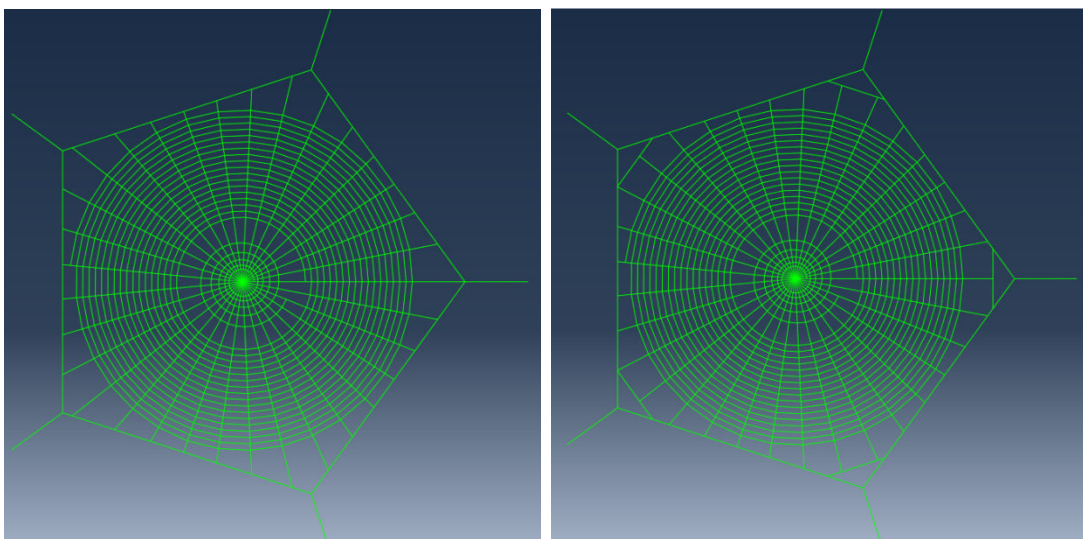


Figura 4.4 Tela sin marco secundario (izquierda) y tela con marco secundario (derecha).

Si se introduce un “1” en la opción Marco Secundario se indicará que se debe crear dicho marco. El segundo valor necesario es el ángulo del marco secundario que crea el hilo del marco secundario con respecto al centro de la tela de araña como puede observarse en la Figura 4.5.

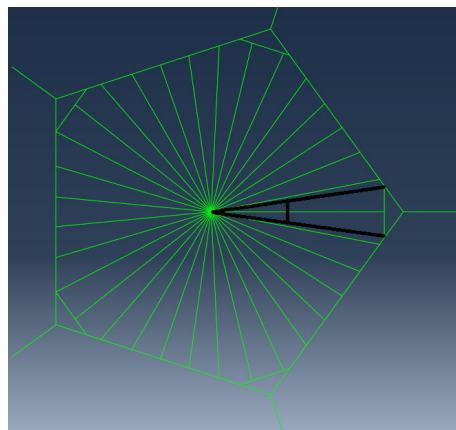


Figura 4.5 Ángulo del marco secundario.

**4.3.1.6 Hilos de suspensión**

Los apoyos de la tela de araña se sitúan en los vértices del polígono regular a través de unos hilos de suspensión, los cuales tienen la misma longitud, que ha de introducirse en la tabla Excel del modelo.

Puede seleccionarse si estos hilos tienen pretensión y el valor de éstos en el eje X o Y (Tabla 4.2).

PRETENSIÓN		
Pretensión	Eje X	Eje Y
0	10	10

**Tabla 4.2 Valores para la definición de la pretensión de los hilos de suspensión.**

**4.3.2 Definición de la esfera**

A la hora de definir la esfera han de especificarse cuatro parámetros referidos a propiedades de masa, posición y velocidad (Tabla 4.3).

ESFERA			
	Masa insecto (kg)		
	0,00003		
Posición de la esfera	Longitud Radial (m)	Ángulo (rad)	Traslación en Z (m)
	7,50E-02	0,628318531	0,012
	Inercia 1	Inercia 2	Inercia 3
	1,20E-09	1,20E-09	1,20E-09
	Velocidad en X (m/s)	Velocidad en Y (m/s)	Velocidad en Z (m/s)
	0	0	-2

**Tabla 4.3 Datos necesarios para la definición de la esfera.**

Para la definición de la posición ha de tenerse en cuenta que esta se define de forma polar en el eje X-Y, tomando como origen de coordenadas el centro de la tela de araña.

La “longitud radial” es la distancia desde el centro de coordenadas hasta el centro de la esfera en el plano X-Y.

El “ángulo” se define desde el primer hilo radial creado en 0 radianes en sentido contrario a las agujas del reloj (Figura 4.5). Traslación en Z es la distancia perpendicular al plano X-Y desde la tela de araña hasta la esfera.

El volumen de la esfera es un valor constante solo modificable a través del script y los parámetros de inercia son meramente informativos y no han de modificarse.

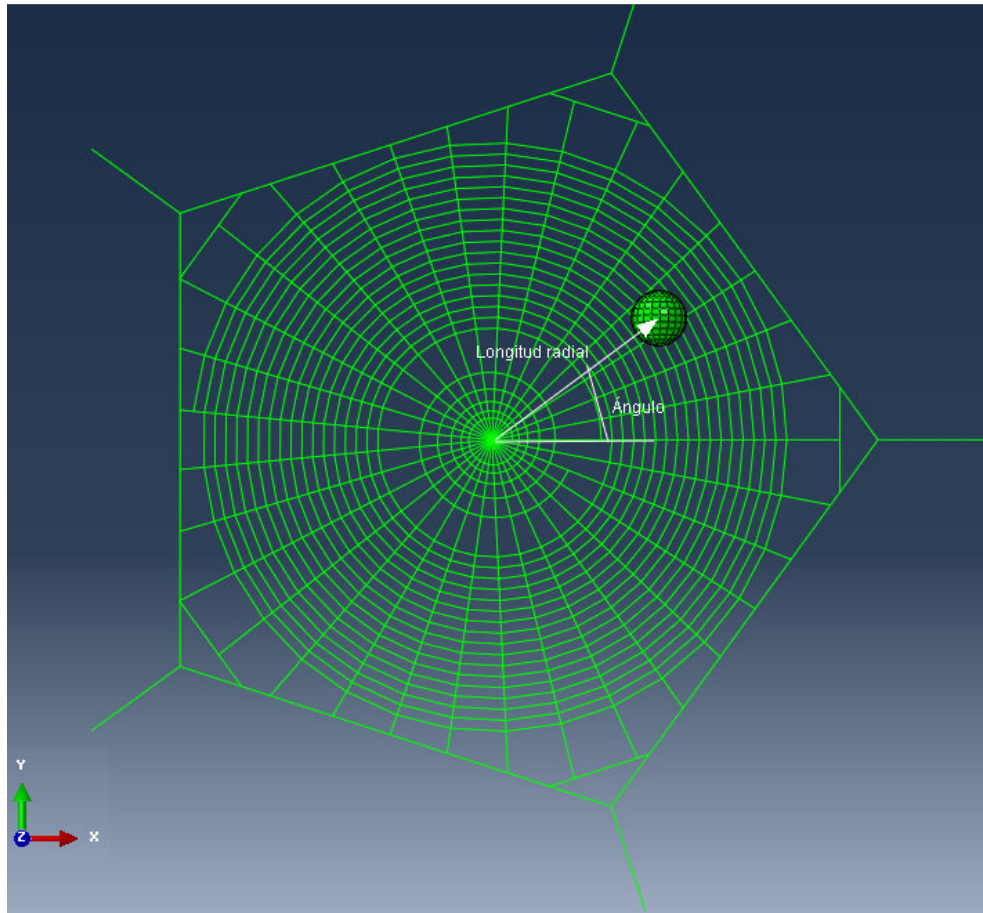


Figura 4.6 Posición de la esfera respecto al centro de la tela de araña

### 4.3.3 Propiedades de los materiales

Una vez definidos las propiedades de cada hilo simplemente han de introducirse en la tabla Excel (Tabla 4.4). Los parámetros Alfa cero, Alfa 1, Beta son constantes necesarias para la subrutina “VUMAT.Truss.ElastoPlastic.J-shape.new.v0”, del profesor Dr. Ramón Zaera Polo.

Propiedades	Espiral	Radial	Soporte
Diámetro	2,3000E-06	3,5000E-06	5,0000E-06
Área	4,1548E-12	9,6212E-12	1,9635E-11
Módulo de elasticidad	1,2000E+09	1,2000E+10	1,2000E+10
Límite elástico	30000000,0000	190000000,0000	220000000,0000
Alfa cero	1,1286E+05	3,1000E+00	1,9000E-01
Alfa 1	3,5305	115,4900	140,2000
Beta	5,8900E+07	1,9800E+09	2,0600E+09
Def. de rotura	2,5000	0,2700	0,2700

Tabla 4.4 Propiedades de los materiales.

### 4.3.4 Definición del impacto

Definida la geometría y propiedades de la tela de araña y los parámetros referentes a la esfera, queda definir el tipo de impacto para poder generar el modelo (Tabla 4.5).

STEPS			
Propiedades	Step 1	Step 2	Step 3
Tiempo	1,00E-12	0,1	1
Linear Viscosity	0,06	0,06	0,06
Quad. Viscosity	1,2	1,2	1,2
N. Intervalos	1	100	3

Tabla 4.5 Parámetros del impacto.

El impacto se define mediante tres Steps que definen cómo se comporta la simulación.

- Step 1: Acelera la esfera propiciando el impacto.
- Step 2: Detiene la aceleración de la esfera y deja que impacte libre contra la tela de araña.
- Step 3: Solo se ejecuta si existe pretensión en los hilos de suspensión.

El parámetro tiempo define la duración del Step, Linear y Quad. Viscosity la viscosidad de la simulación. El número de intervalos divide el tiempo de simulación a la hora de realizar el cálculo.

#### 4.3.4.1 Fuerza aerodinámica

Puede resultar interesante prescindir del efecto de las fuerzas aerodinámicas para determinados análisis. Por ello puede indicarse si se desea que se active introduciendo un 1, y un 0 en caso contrario (Tabla 4.6).

FUERZA AREODINÁMICA
1

Tabla 4.6 Fuerza aerodinámica.

### 4.3.5 Ejecución del modelo

Antes de ejecutar el Script se ha de colocar el archivo Excel en el Work Directory que tiene configurado el programa ABAQUS, como puede verse en la Figura 4.7, puede comprobarse la ruta actual o modificarse.

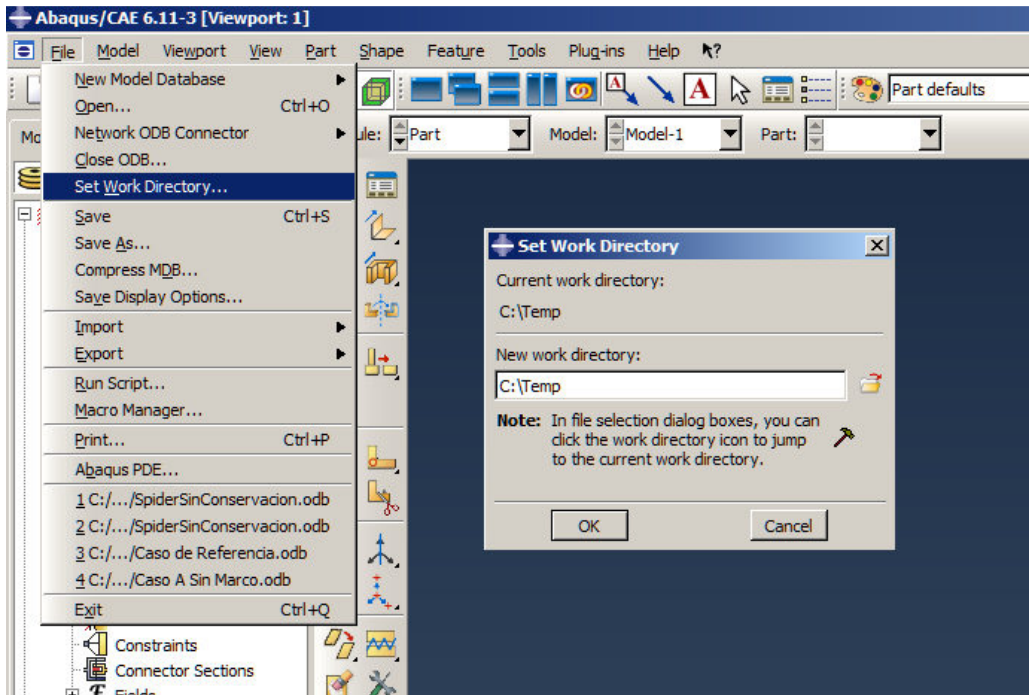


Figura 4.7 Comprobar o modificar la carpeta de trabajo actual.

Una vez se ha introducido el archivo Excel en la carpeta de trabajo solo queda ejecutar el Script como se indica. Cabe decir que todos los parámetros introducidos en las tablas pueden ser modificados a través del programa ABAQUS, aunque suele resultar más sencillo modificarlo en el archivo Excel y ejecutar de nuevo el script (Figura 4.8).

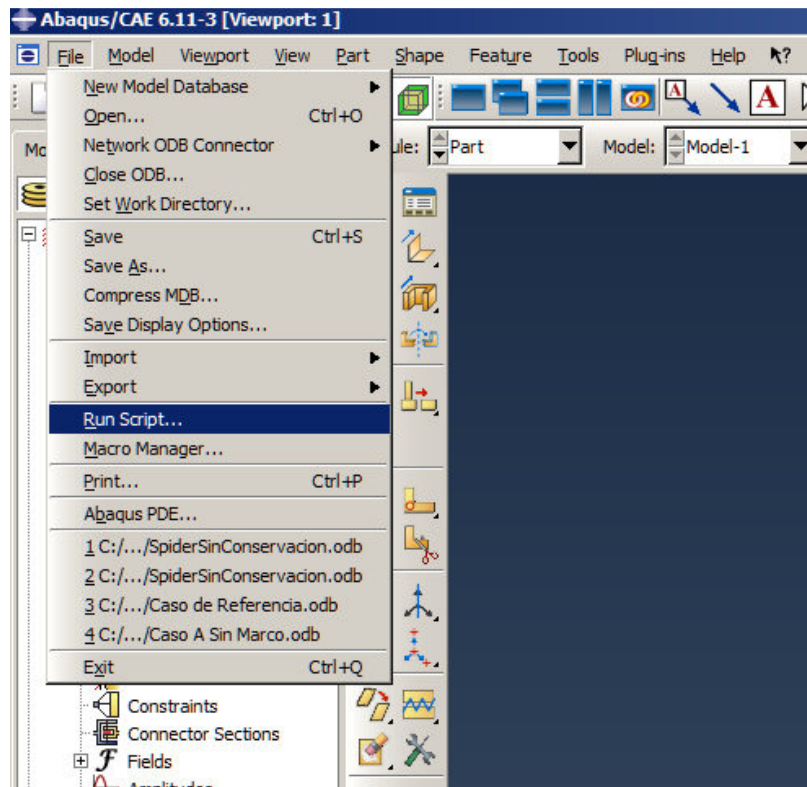


Figura 4.8 Menú de ABAQUS para la ejecución de un script.



## 5 Análisis de resultados

### 5.1 Variables a tener en cuenta

Antes de realizar cualquier análisis de resultados, han de especificarse qué variables quieren estudiarse, para así poder agruparlas e identificarlas de manera clara y concisa. En todos y cada uno de los análisis se han tomado las siguientes:

- Trabajo externo de las fuerzas aerodinámicas.
- Energía plástica disipada por tipo de hilo.
- Energía de deformación elástica por tipo de hilo.
- Media, desviación típica, y desviación media de la energía plástica específica por tipo de hilo.
- Velocidad y desplazamiento de la esfera en cada instante de tiempo.
- Máximo valor de la tensión de tracción en cada elemento.

Para el cálculo del trabajo externo y de la energía de deformación elástica, se utiliza el valor de tiempo para el cual la velocidad del insecto es cero, de este modo se estudia solo el comportamiento elástico del material y se evita entrar en descargas que complicarían el análisis.

La energía plástica disipada, toma el valor correspondiente al finalizar la simulación, el cual es el máximo valor de ésta.

Tanto la media, la desviación media y la desviación típica, son datos que permiten saber si se producen plastificaciones locales o si plastifica de manera homogénea.

A la hora de determinar los resultados de los análisis, se ha de tener clara la jerarquía de la estructura, es decir, que tipos de hilos resultan esenciales para el comportamiento de ésta y cuáles por el contrario no comprometen su integridad. A continuación se exponen por orden de relevancia:

1. Hilos de Apoyo
2. Hilos del Marco (frame)
3. Hilos Radiales
4. Hilos Espirales

De este modo, se puede entender que a igualdad de deformación total en dos casos, aquel que tenga menor deformación plástica en los hilos de apoyo o del marco, estará siendo más eficiente que otro análisis con mayores deformaciones en estos hilos.

### 5.2 Caso de referencia

Los análisis presentes en este documento, se comparan en base a un caso de referencia, creado a partir de los valores de geometría y mecánicos encontrados en los estudios e investigaciones presentes en los antecedentes.

La Tabla 5.1 puede encontrarse en la siguiente página y en ella se pueden comparar los valores de los análisis pues los parámetros se modificarán en base a ellos.



MATERIALES

Propiedades	Espiral	Radial	Soporte
Diámetro	2,30E-06	3,50E-06	5,00E-06
Área	4,15E-12	9,62E-12	1,96E-11
Módulo de elasticidad	1,20E+09	1,20E+10	1,20E+10
Límite elástico	30000000	190000000	220000000
Alfa cero	1,13E+05	3,10E+00	1,90E-01
Alfa 1	3,5305	115,49	140,2
Beta	5,89E+07	1,98E+09	2,06E+09
Def. de rotura	2,5	0,27	0,27

FUERZA AREODINÁMICA

1

STEPS

Propiedades	Step 1	Step 2	Step 3
Tiempo	1,00E-12	0,1	1
Linear Viscosity	0,06	0,06	0,06
Quad. Viscosity	1,2	1,2	1,2
N. Intervalos	1	100	3

GEOMETRÍA DE LA TELA DE ARAÑA

Propiedades	Nº de Radios	Marco Secundario	Long. Hilos Susp.
	33	1	4,00E-02
Longitud tramo 1	Radio interno tramo 1	Radio interno tramo 2	Longitud tramo 2
0,5	7,50E-03	4,00E-02	8,73E+00
	Radio externo tramo 1	Radio externo tramo 2	Paso espiral zona 2
	3,00E-02	1,10E-01	4,00E-03
Radio Marco	Número de apoyos Marco	Lado Marco Primario	Ángulo Marco Secundario
0,1414214	5	1,66E-01	0,3

ESFERA

	Masa insecto	Radio insecto	
	0,00003	0,01	
Posición de la esfera	Longitud Radial	Ángulo	Traslación en Z
	7,50E-02	0,6283185	0,012
	Inercia 1	Inercia 2	Inercia 3
	1,20E-09	1,20E-09	1,20E-09
	Velocidad en X	Velocidad en Y	Velocidad en Z
	0	0	-2

PRETENSIÓN

Pretensión	Eje X	Eje Y
0	10	10

Tabla 5.1 Valores del caso de referencia utilizado en los análisis.

### 5.3 Efecto del marco secundario

En este análisis, se pretende comprobar la importancia del marco secundario, presente en la práctica totalidad de las telas de arañas tipo orb web, y en la cual se basa este proyecto. Básicamente, se simula el caso de referencia y otro exactamente igual pero con la función del marco secundario deshabilitada.

Teus Fernández (2012) ya realizó y pudo comprobar que la presencia del marco provocaba un aumento en la energía disipada por efecto aerodinámico, lo que hace aumentar el efecto de la energía por deformación plástica. La segunda conclusión que obtuvo fue que la presencia de un marco secundario homogeneizó la tensión de los hilos radiales debido a que evita que se alineen hilos radiales con hilos de soporte.

Los resultados obtenidos en este análisis son los siguientes (Tabla 5.2) para energías plásticas disipadas:

	Con Marco	Sin Marco	
	Instante final	Instante final	
Set	Energía plástica disipada (J)	Energía plástica disipada (J)	Error relativo
Spiral	5,06722E-07	1,31725E-06	159,96%
Radial	0,00000E+00	5,59361E-08	∞
Frame	9,96702E-06	1,30103E-05	30,53%
Total	1,04737E-05	1,43835E-05	37,33%
	Trabajo fuerzas aerodinámicas (J)	Trabajo fuerzas aerodinámicas (J)	
	-2,15493E-05	-1,78659E-05	17,09%

Tabla 5.2 Energía plástica disipada, trabajo de las fuerzas aerodinámicas y error absoluto.

Puede verse, que la energía plástica disipada en el caso sin marco secundario, aumenta en total un 37,33% y comprobar así, que la presencia de un marco secundario evita que plastifique un porcentaje mayor de material. Inclusive para los hilos radiales, la energía plástica disipada varía de 0 a 5,59E-8 J.

Para obtener una idea más gráfica sobre lo que sucede, en la Figura 5.1 puede verse una escala a color, sobre las tensiones máximas de tracción en cada elemento de la tela. En éstas, si se observa la diferencia de tensión en los hilos radiales que tienen misma dirección que los hilos de apoyo, puede advertirse una amplia disminución de la tensión de tracción para el caso con marco secundario. De esta manera se distribuyen más homogéneamente las tensiones a lo largo de los hilos radiales, y se descargan los hilos de suspensión, así como los hilos radiales que tienen su misma dirección. Estos datos, concuerdan con los resultados obtenidos por (Teus Fernández 2012) en sus análisis a pesar de las diferencias entre ambos modelos.

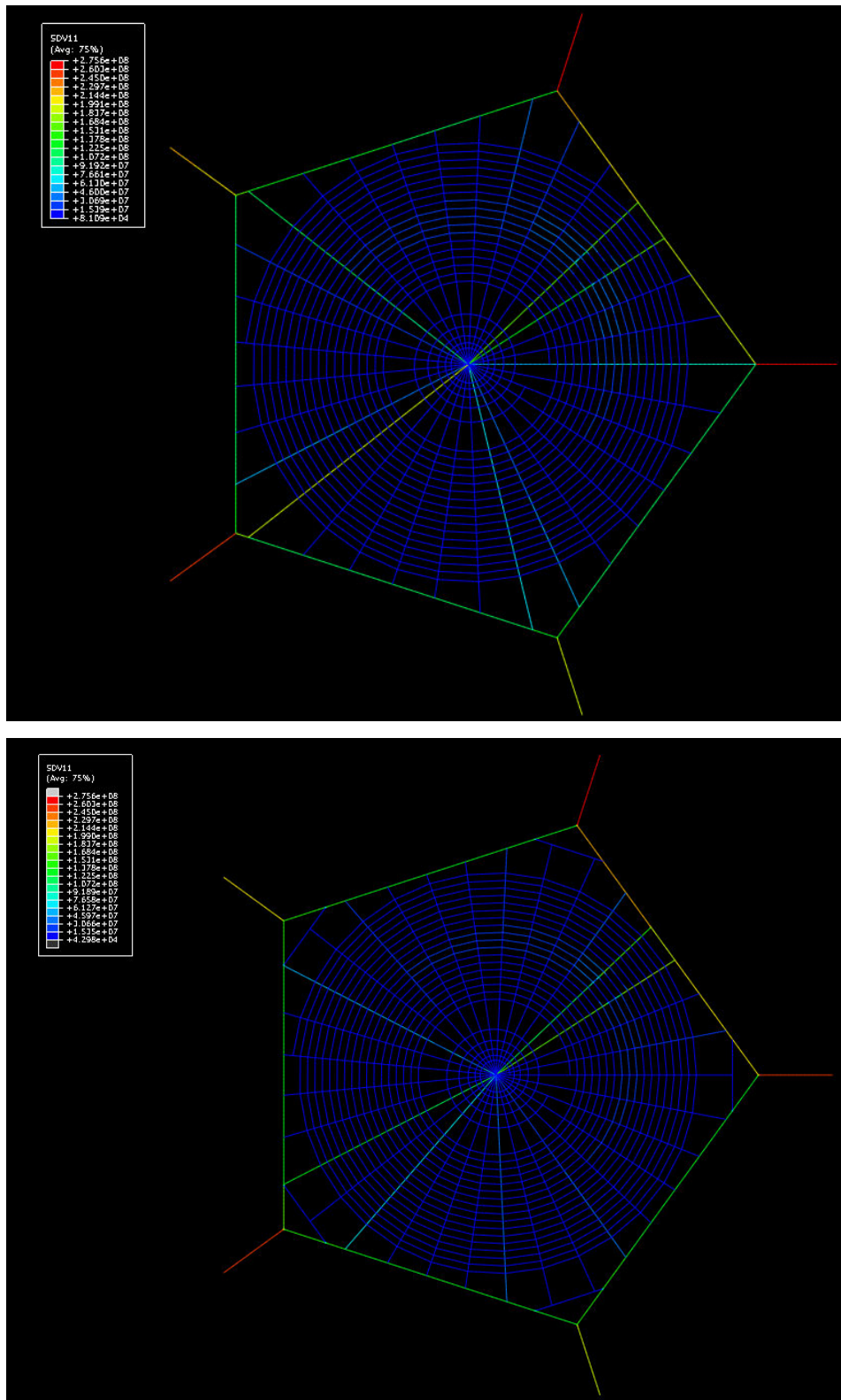


Figura 5.1 Tensión de tracción máxima en cada elemento para el caso sin marco (superior) y con marco (inferior).

#### 5.4 Efecto de la espiral central

Un aspecto que despierta el interés cuando se muestran imágenes sobre las telas de araña, es conocer el motivo, por el cual se encuentra dos tipos de espirales diferenciadas, en este análisis, se tratará de analizar qué posibles consecuencias estructurales tiene elegir un tipo de espiral u otro para el hub, para ello se han realizado cuatro modelos (Figura 5.2 y Figura 5.3) en los que se modifican a su vez la geometría de la tela de la siguiente manera:

- Geometría de referencia (espiral central logarítmica).
- Geometría sin espiral central.
- Espiral central arquimedea.
- Espiral arquimedea en toda la tela (de inicio a fin).

En estos cuatro modelos, se ha mantenido constante el volumen de tela de araña, a fin de poder comparar los datos obtenidos.

Con estas cuatro geometrías, se van a modificar en base al modelo de referencia las zonas de impacto de la esfera “insecto”, para poder realizar distintos análisis:

- Impacto de la esfera en la zona de referencia.
- Impacto de la esfera a la mitad de distancia de referencia.
- Impacto en el centro de la tela de araña.
- Impacto oblicuo a  $45^\circ$  en la zona de referencia.

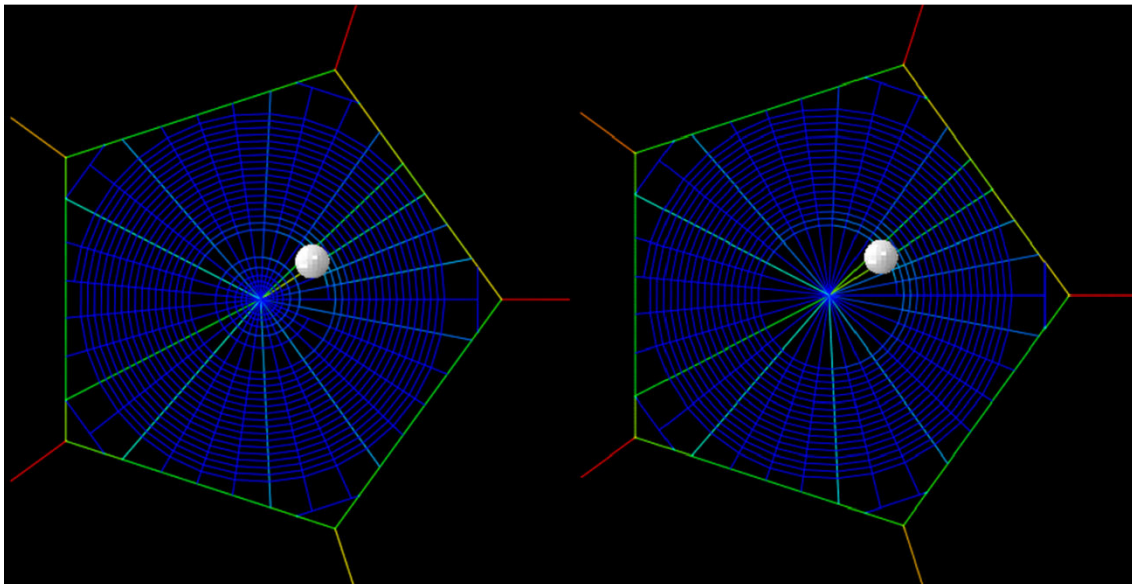


Figura 5.2 Caso de referencia (izquierda) y caso sin espiral derecha).

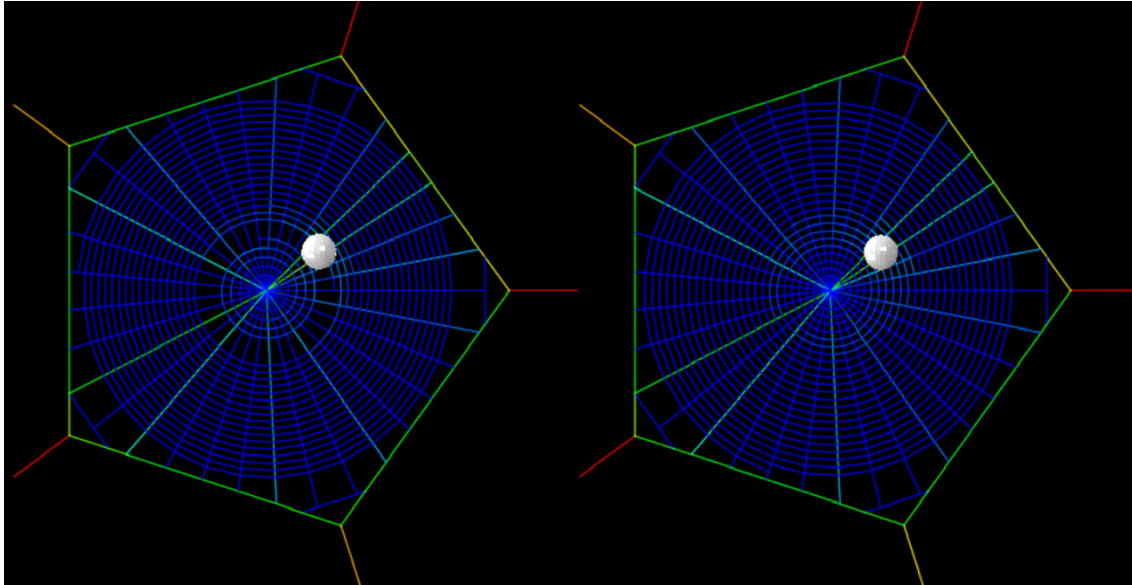


Figura 5.3 Espiral central arquimedeaana (izquierda) y espiral arquimedeaana en toda la tea (derecha).

En el primer análisis, a vista de los resultados en la Figura 5.4, no puede determinarse una diferencia en el comportamiento de los materiales, salvo que, para impactos en la zona de referencia, no existen diferencias entre el comportamiento de las distintas topologías.

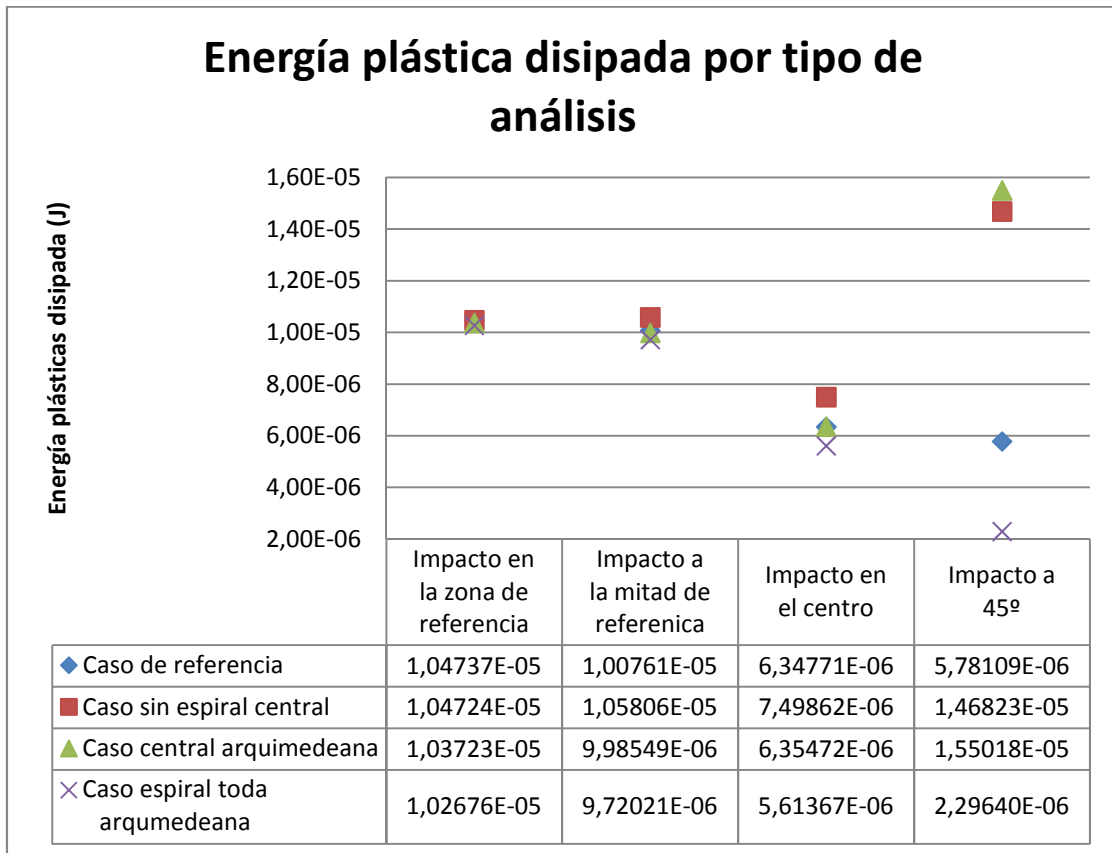


Figura 5.4 Energía disipada por tipo de análisis (J).

A medida que el impacto se acerca al centro de la tela de araña (Figura 5.4), se acentúan las diferencias entre energías plásticas disipadas. Si bien en los tres análisis de impactos perpendiculares, (zona de referencia, a la mitad y en el centro) entre el caso de referencia (que utiliza una espiral central logarítmica) y el caso que tiene espiral central arquimedea no existe una diferencia clara. Entre el caso de espiral arquimedea en toda la tela, si que se encuentran diferencias, pues parece disipar menor energía plástica, cuanto más cerca del centro se realiza el impacto.

En cuanto al caso sin espiral central, puede parecer normal que cuanto más cerca del centro sea el impacto, mayor energía plástica disipe, al disponer de menor volumen de tela en esa zona. Si este razonamiento fuera válido, para el primer caso de impacto en la zona de referencia, debería tener mejor comportamiento, pues el volumen está concentrado en la espiral exterior. Pero este no es el resultado, pues disipa la misma cantidad de energía plástica que el resto de casos.

El caso de impacto a  $45^\circ$ , es peculiar pues en un principio se realizó en la zona de referencia y rompieron todos los casos, salvo el caso sin espiral central, al cual se puede atribuir este comportamiento al razonamiento anterior, debido al mayor volumen de tela en la zona de impacto.

Para poder analizar de manera más profunda el efecto de un impacto oblicuo, se realizó otro análisis con impacto a  $45^\circ$ , pero en la mitad de la distancia de referencia como ya se hizo anteriormente, y son los datos aportados en la Figura 5.4. Para este análisis, se puede ver que se mantiene el caso de espiral en toda la tela como la que menor energía plástica disipa. Se aprecia una nueva diferencia entre energías disipadas por el caso de referencia y el caso de espiral central arquimedea, que se sitúa como la que peor comportamiento tiene. En este caso, se puede apreciar en la Figura 5.5 y Figura 5.6, el desplazamiento de la esfera en el eje Z (perpendicular al plano de la tela), y X para cada topología frente a el impacto oblicuo. El desplazamiento de la esfera en el eje X (Figura 5.6) para el caso sin espiral se diferencia del resto en que la esfera tiende a volver hacia el centro de la tela mientras que en los otros la esfera tiene un desplazamiento positivo hacia el exterior de la tela. Aunque no se puede asociar el desplazamiento de la esfera en el eje X con una mejor resistencia, pues el caso con espiral central arquimedea se comporta de manera similar al caso con espiral arquimedea, aún teniendo el peor comportamiento en cuanto a energía de deformación plástica.

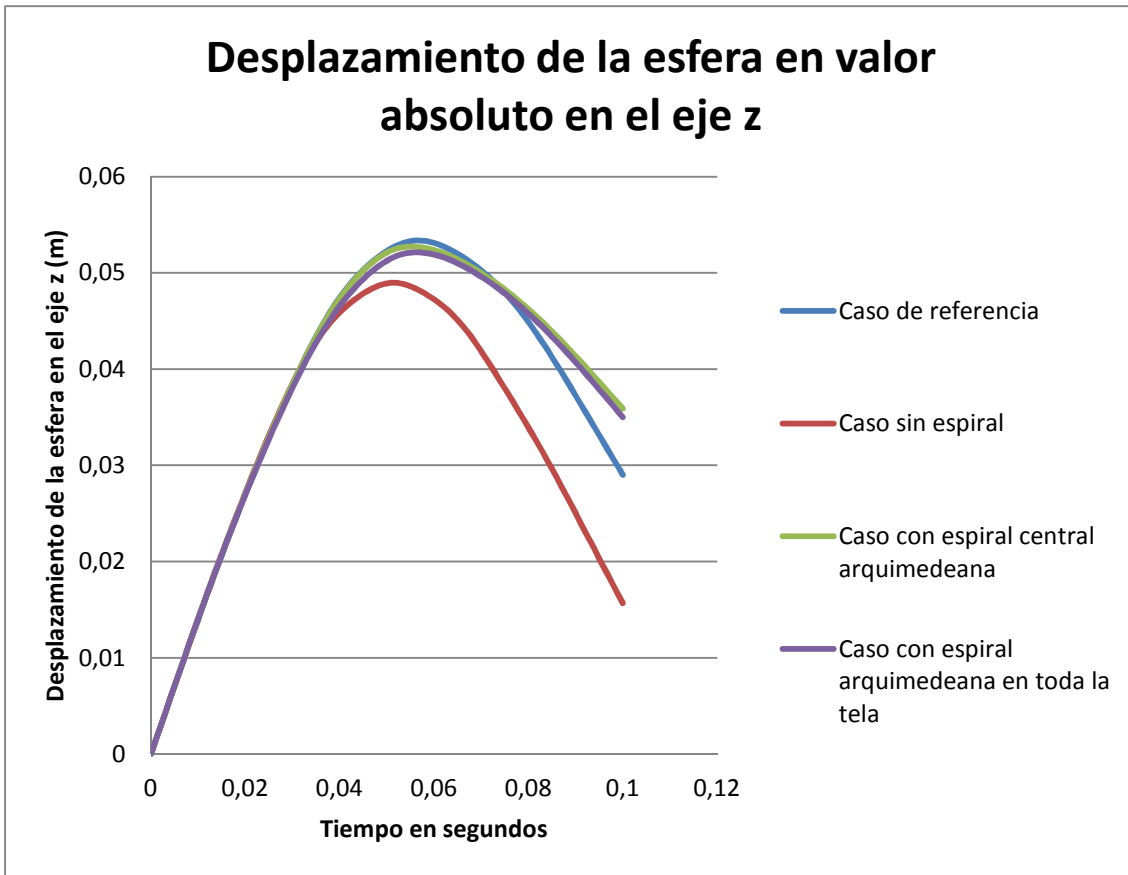


Figura 5.5 Desplazamiento de la esfera en valor absoluto en el eje z para un impacto oblicuo a 45°.

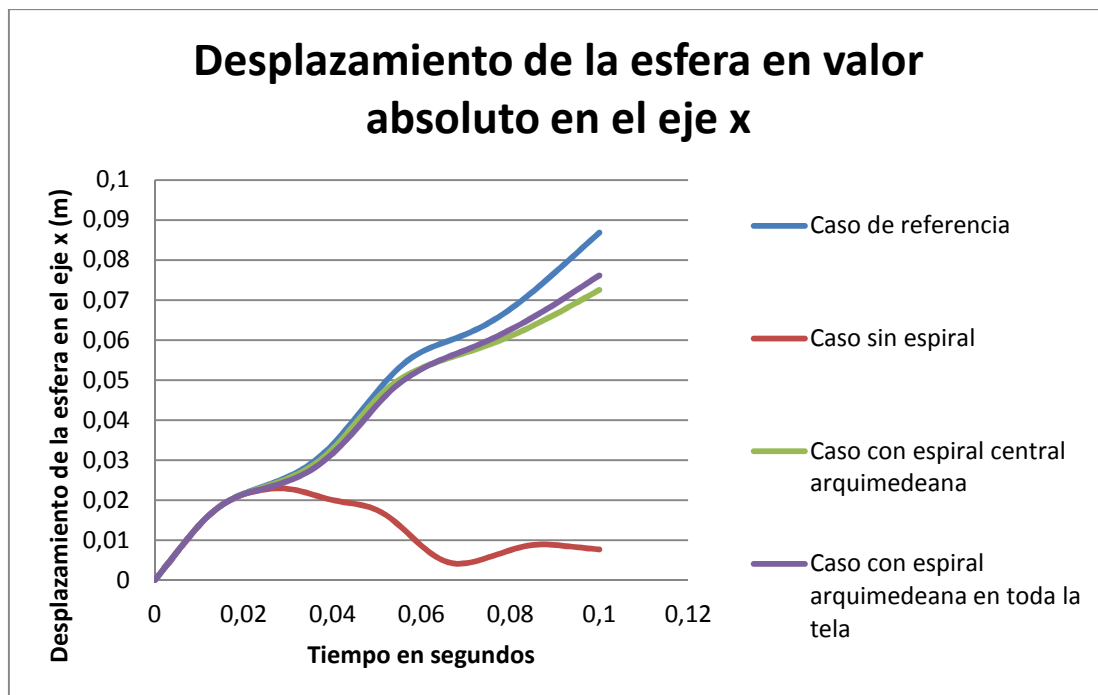


Figura 5.6 Desplazamiento de la esfera en valor absoluto en el eje x para un impacto oblicuo a 45°.

Puede determinarse, que la topología que mejor se comporta desde un punto de vista frente a impactos, es la espiral arquimedean en toda la tela, pues es la que menos energía plástica disipa en todos los análisis. A este comportamiento le precede el caso

de referencia, solo diferenciado del caso con espiral central arquimedeano en el análisis oblicuo a 45°. Por último, si puede afirmarse que la que peor comportamiento tiene en todos los análisis es el caso sin espiral central.

Cabe comentar, que se han analizado la media de energía plástica disipada por tipo de hilo, para comprobar que las energías tomadas se distribuyen de manera uniforme y no pertenecen a valores muy desviados.

### 5.5 Efecto del diámetro del hilo en las fuerzas aerodinámicas

En este caso, se pretende analizar el efecto del diámetro del hilo en las fuerzas aerodinámicas, para ello, se simularán 7 casos conservando el volumen total de tela para cada tipo de hilo, y variando tanto en hilos radiales como espirales, el área de sección transversal. Esta variación se realizará en función de un factor, dado por el cociente entre el área de la sección transversal, y el área de la sección transversal de referencia (Ecuación 5.1).

$$F^i = \frac{A_{radial}^i}{A_{radial}^{ref}} = \frac{A_{espiral}^i}{A_{espiral}^{ref}}$$

**Ecuación 5.1 Factor "F" de relación de áreas.**

- F=0,7
- F=0,8
- F=0,9
- F=1 Caso de referencia.
- F=1,1
- F=1,2
- F=1,3

Cada uno de estos casos, se simulará con fuerzas aerodinámicas aplicadas y sin ellas, a fin de comprobar cómo afectan estas fuerzas en la estructura de la tela de araña.

Teus Fernández (2012), realizó este análisis y del cual pudo sacar las siguientes conclusiones: cuanto menor sea el factor de multiplicación menor será el porcentaje de energía disipada total por deformación plástica, independientemente de la masa de la presa. La energía disipada por efecto aerodinámico aumenta al disminuir el factor de multiplicación. Cuando no se incluyen las fuerzas aerodinámicas, la energía plástica disipada es mayor y no varía con el factor de multiplicación. Por tanto sugirió que la tela de araña es más efectiva cuanto menor lo son los diámetros de sus hilos.

Los resultados del presente análisis en cuanto a energía plástica disipada (Figura 5.7), revelan una tendencia con pendiente positiva a medida que aumenta la relación de áreas, salvando excepciones locales en algún hilo por separado. Puede observarse, que a igualdad de volumen, la estructura se comporta peor con hilos de mayor área transversal y menor longitud.



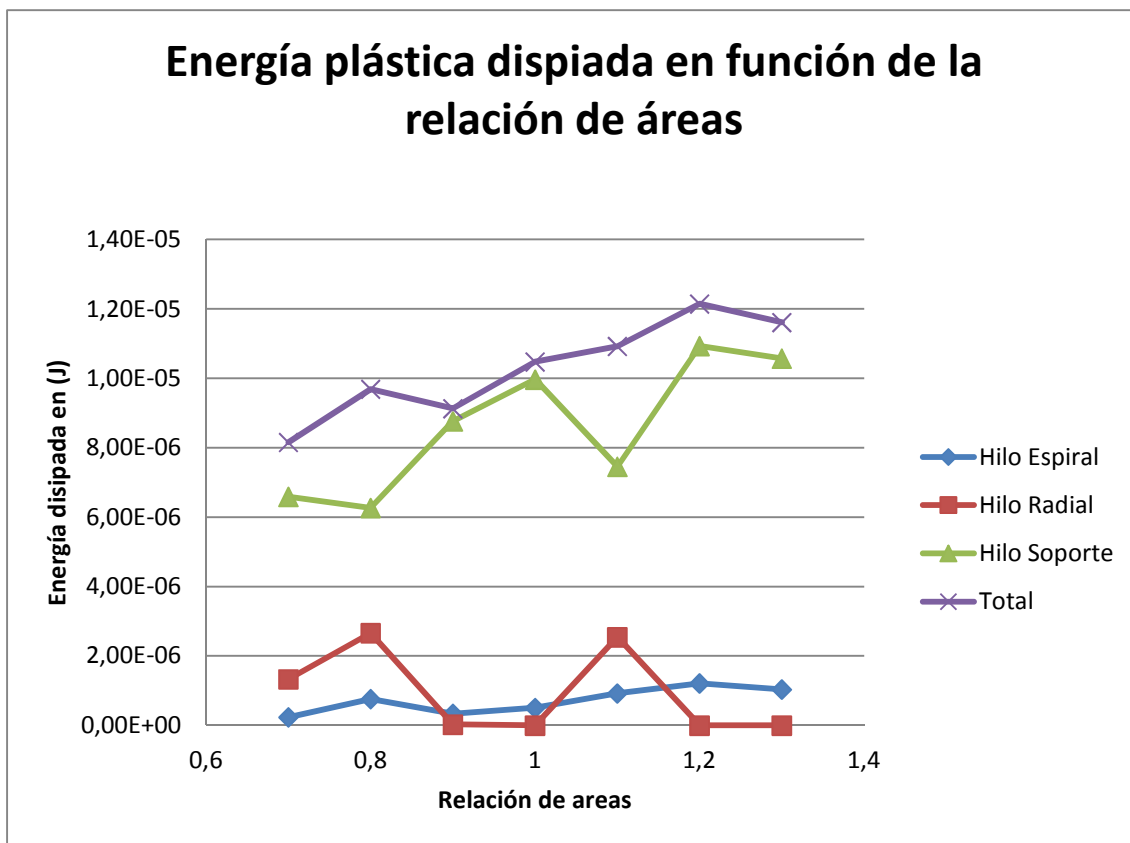


Figura 5.7 Energía plástica disipada en función de la relación de áreas.

Esto, puede deberse a que sean más eficientes, telas de hilos más finos en diámetro pero mayores longitudes. En la figura de energía disipada por efecto de las fuerzas aerodinámicas (Figura 5.8), se observa que esta es menor a medida que aumenta la relación de áreas.

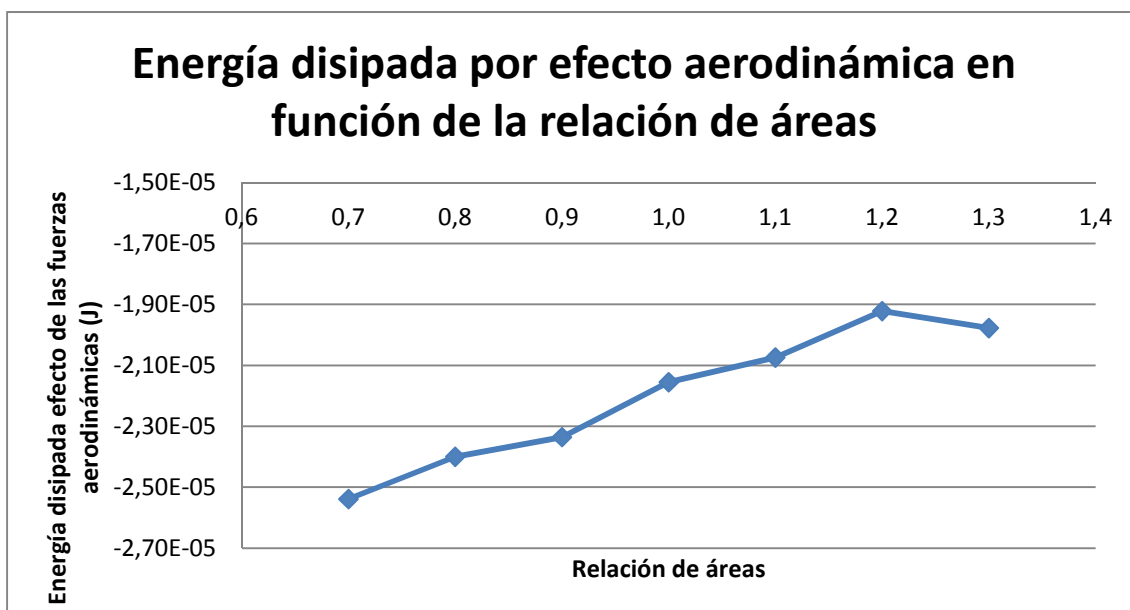


Figura 5.8 Energía disipada por efecto de las fuerzas aerodinámicas.

Esta tendencia, es mucho más clara al analizar las energías de deformación elásticas (Figura 5.9), que aumentan con el área de los hilos.

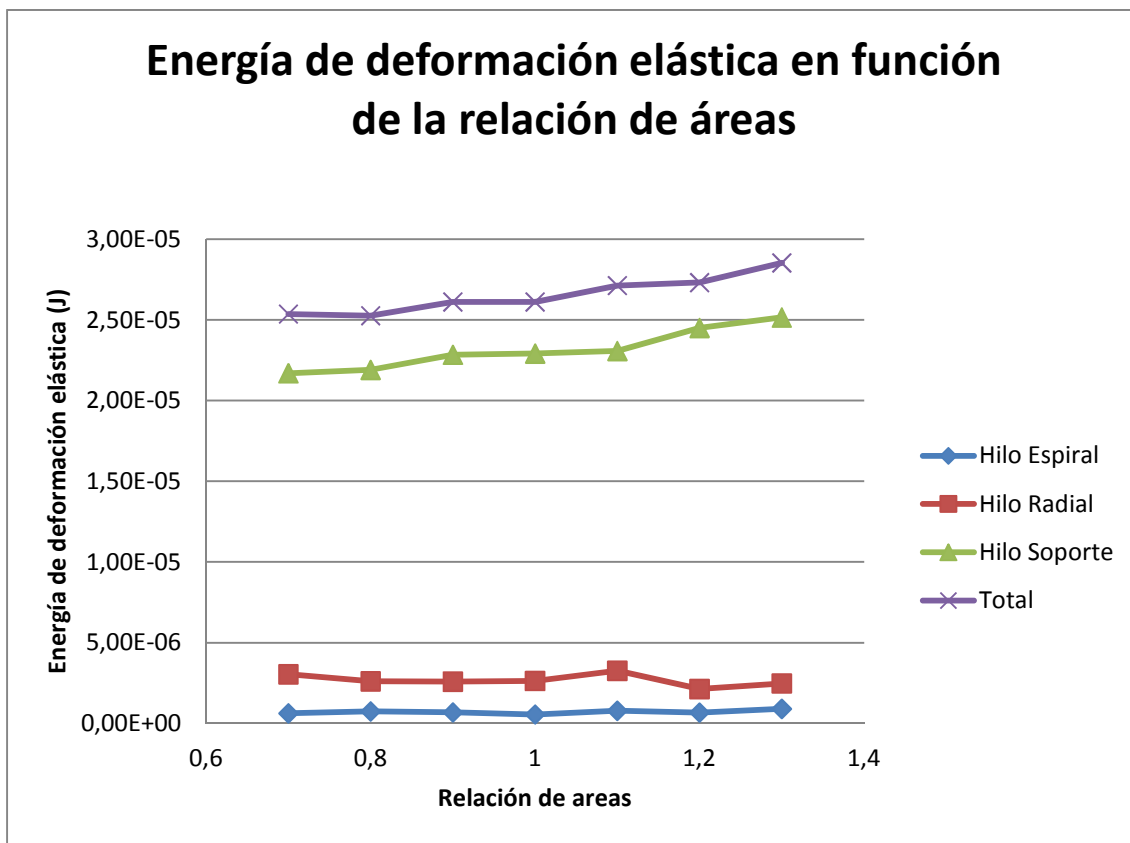


Figura 5.9 Energía de deformación elástica.

En cuanto se desactivan las fuerzas aerodinámicas, estos valores pasan a mostrar una diferencia clara en la tendencia, debido a la influencia de ésta en la estructura de la tela de araña. Si se comparan en función de la energía potencial inicial de la esfera-insecto que impacta (Figura 5.10) en ella, puede verse, que las tendencias observadas con la fuerza aerodinámica activada desaparecen, y los valores de energías tienen a oscilar entre un valor medio de 40,5% para las energías plásticas y 56,7% en las energías de deformación elásticas.

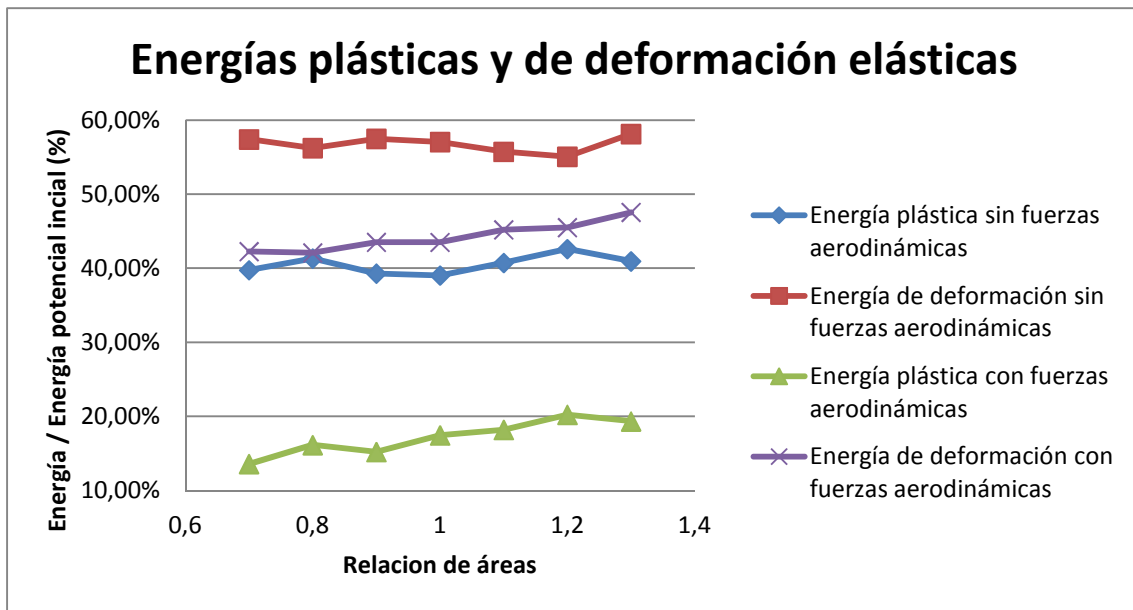


Figura 5.10 Energías plásticas y de deformación elástica.

Al margen de estos valores porcentuales, puede determinarse que las fuerzas aerodinámicas, y su distribución a través de los hilos, otorgan de una mayor resistencia a la estructura cuanto menor es el área del hilo (y por tanto su diámetro). Esto permite destacar el importante papel de las fuerzas aerodinámicas en el comportamiento frente a impacto de la telas de arañas, tal y como otros autores ya han sugerido (Sensenig 2012; M. W. Alam 2007).

### 5.6 Efecto de la proporcionalidad en las dimensiones de la tela

Como continuación del análisis del efecto del diámetro del hilo, se realiza un análisis de la proporcionalidad en las dimensiones de la tela de araña, para ello, se llevarán a cabo tres simulaciones, en las cuales se variará la proporción de la geometría de la tela de araña y de la esfera, manteniendo constantes los valores de las propiedades de los materiales.

Los factores de proporción con respecto al caso de referencia serán:

- R=0,5
- R=1 (Caso de referencia)
- R=1,5

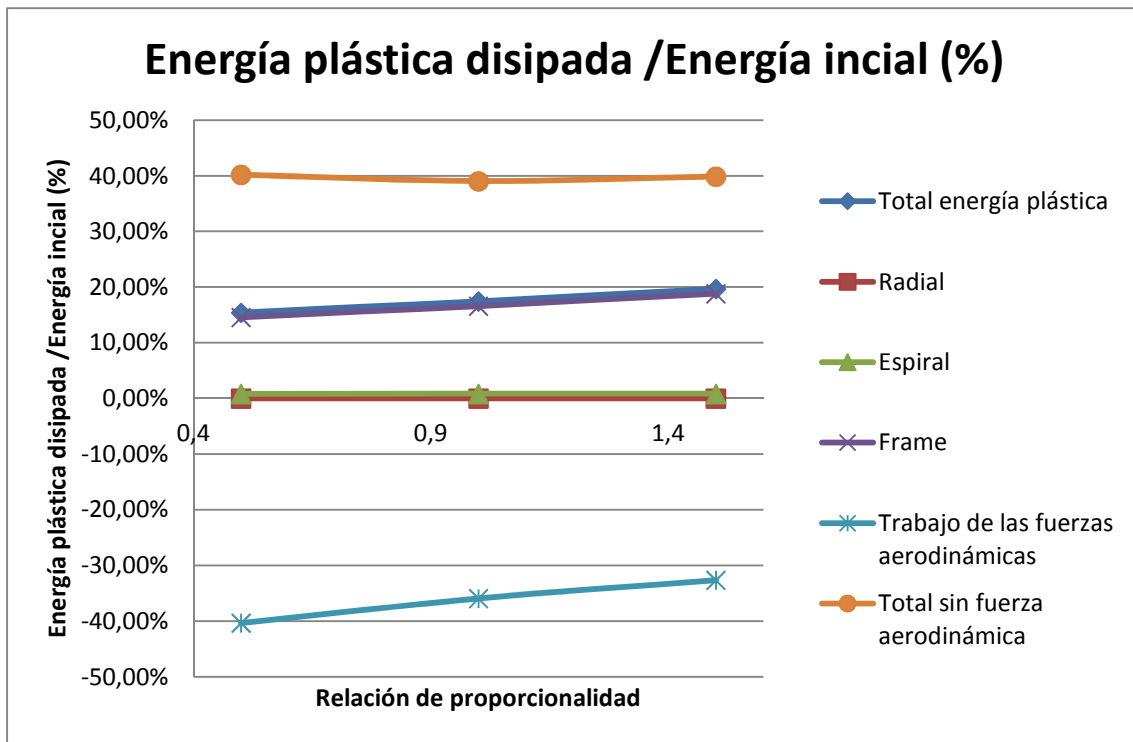


Figura 5.11 Energía plástica disipada.

Las tendencias se mantienen en la Figura 5.11 con respecto al análisis anterior, para el cual una relación de proporcionalidad menor, implica un mejor comportamiento desde el punto de vista de la energía plástica disipada, y del trabajo de las fuerzas aerodinámicas. Esto ocurre, teniendo en cuenta que si el modelo se encuentra en un estado sin fuerzas aerodinámicas, el comportamiento de las tres telas es el mismo frente a plastificación, pero supuestas estas fuerzas activadas existe una diferencia y una tendencia a un mejor comportamiento al disminuir la relación de proporcionalidad.

### 5.7 Efecto del intercambio de propiedades

Una manera de entender las razones por las que los hilos tienen distintos tipos de diámetros, puede realizarse intercambiando las propiedades de los hilos de la tela y viendo cómo afectaría esto frente a los impactos que debe soportar dicha tela, para esto se van a sustituir los diámetros de los hilos radiales con los espirales, manteniendo igual la geometría de toda la tela de araña.

Es claro que aumentan las tensiones al intercambiar ambos diámetros de los hilos (Tabla 5.3), de tal manera que se produce la rotura de los hilos radiales en la zona adyacente al impacto de la esfera (Figura 5.12). La rotura de estos hilos es tan prematura, que no permite que los hilos espirales y del marco absorban energía suficiente para plastificar.

Jaime Teus Fernández (2012) realizó el mismo análisis con su modelo de cuatro lados y espiral arquimedeano, donde obtuvo resultados parecidos. En su análisis el trabajo por fuerzas aerodinámicas también resultó muy similar para ambos hilos, puesto que la fuerza aerodinámica no depende de las propiedades mecánicas sino de las propiedades geométricas. El porcentaje de deformación plástica con respecto a la energía cinética

inicial, aumentó en su análisis de un 17% a un 26%, mientras que en el relativo al presente proyecto, paso de un 17% para el caso de referencia a un 46% al intercambiar las propiedades. El cambio entre ambos resultados es importante, pero hay que tener en cuenta que se han utilizado modelos distintos (de cuatro a cinco lados y sin espiral central a una logarítmica) y ecuaciones constitutivas distintas (de lineal a no lineal) aunque si es verdad que representan el mismo efecto, la importancia de la rigidez relativa entre los hilos(L. S. Lin 1998). En el análisis de Jaime Teus Fernández obtuvo una mayor plastificación de hilos espirales en el caso de referencia y de hilos radiales en el caso con propiedades mecánicas intercambiadas. En el presente análisis el hilo que mayor energía plástica disipa para el caso de referencia es el de soporte seguido del espiral mientras que el hilo radial no presenta plastificación. Para el caso con propiedades intercambiadas toda la deformación plástica es aportada por los hilos radiales, puesto que rompen antes de que termine la simulación como puede observarse en la Figura 2.12.

Caso de referencia	Set	Trabajo externo (J)	Energía plástica disipada (J)
	Spiral	-2,15493E-05	5,06722E-07
	Radial		0,00000E+00
	Frame		9,96702E-06
	Total		1,04737E-05
Propiedades y diámetro de hilos radiales y espirales intercambiadas	Set	Trabajo externo (J)	Energía plástica disipada (J)
	Spiral	-2,18073E-05	0,00000E+00
	Radial		2,73016E-05
	Frame		0,00000E+00
	Total		2,73016E-05

Tabla 5.3 Trabajo externo y energía plástica disipada.

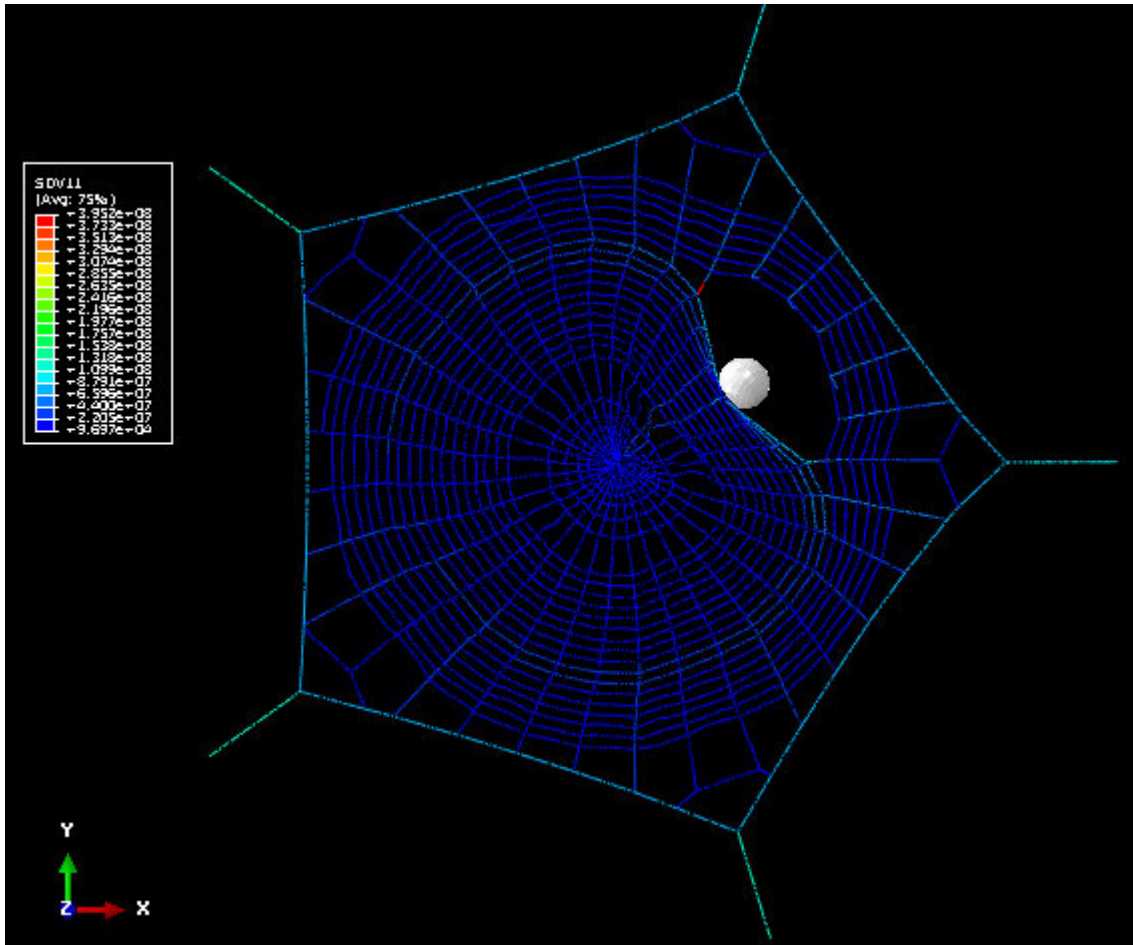


Figura 5.12 Rotura de la tela en el caso con propiedades intercambiadas.

### 5.8 Efecto de las longitudes de hilo radial a hilo espiral

Manteniendo el volumen total de hilos radiales y espirales, se modifica la proporción de ambos en cada caso. La proporción de volumen, de hilo espiral arquimedea a espiral logarítmico, permanecen constantes a lo largo de todas las simulaciones. El factor de relación de volumen viene dado por la Ecuación 5.2.

$$R^i = \frac{V_{radial}^i}{V_{espiral}^i}$$

Ecuación 5.2 Factor "R" de relación de volumen radial/volumen espiral.

- Simulación 1:  $R^1 \approx 0.4$ .
- Simulación 2:  $R^2 \approx 0.6$ .
- Simulación 3:  $R^3 \approx 0.8$ .
- Simulación 4:  $R^4 \approx 1$  (caso de referencia).
- Simulación 5:  $R^5 \approx 1.2$ .
- Simulación 6:  $R^6 \approx 1.4$ .
- Simulación 7:  $R^7 \approx 1.6$ .

En este caso, no se tendrá en cuenta la simulación correspondiente al factor  $R=0,4$ , pues para ella, se produce la rotura de la tela en la zona espiral en el punto de impacto de la esfera.

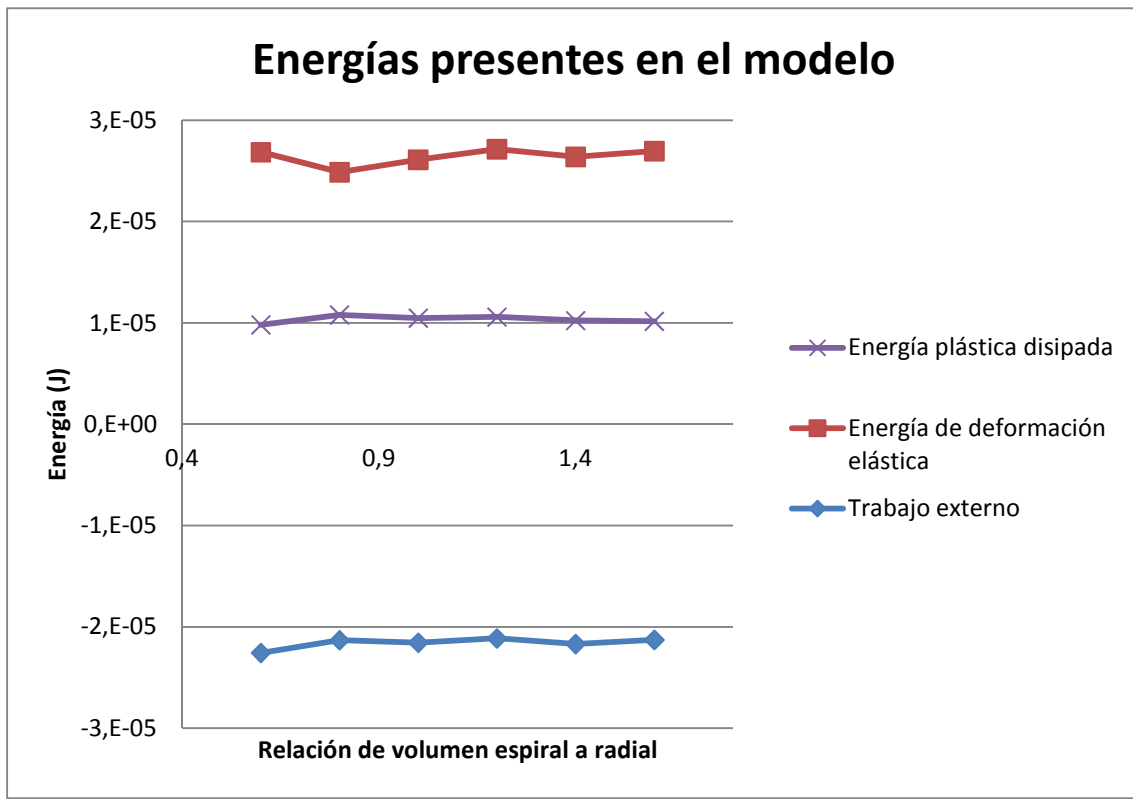


Figura 5.13 Energías presentes en relación de volumen espiral a radial.

A la vista de los datos presentes en la Figura 5.13 no es posible determinar una relación entre la proporción de volumen radial/espiral.

Al variar la proporción de R (Figura 2.14), se produce una gran modificación de la geometría de la tela de araña de un caso a otro, esto puede hacer intervenir en los análisis, más factores de los previstos y que no se están teniendo en cuenta. Por estos hechos se ha decidido descartar este análisis del estudio.

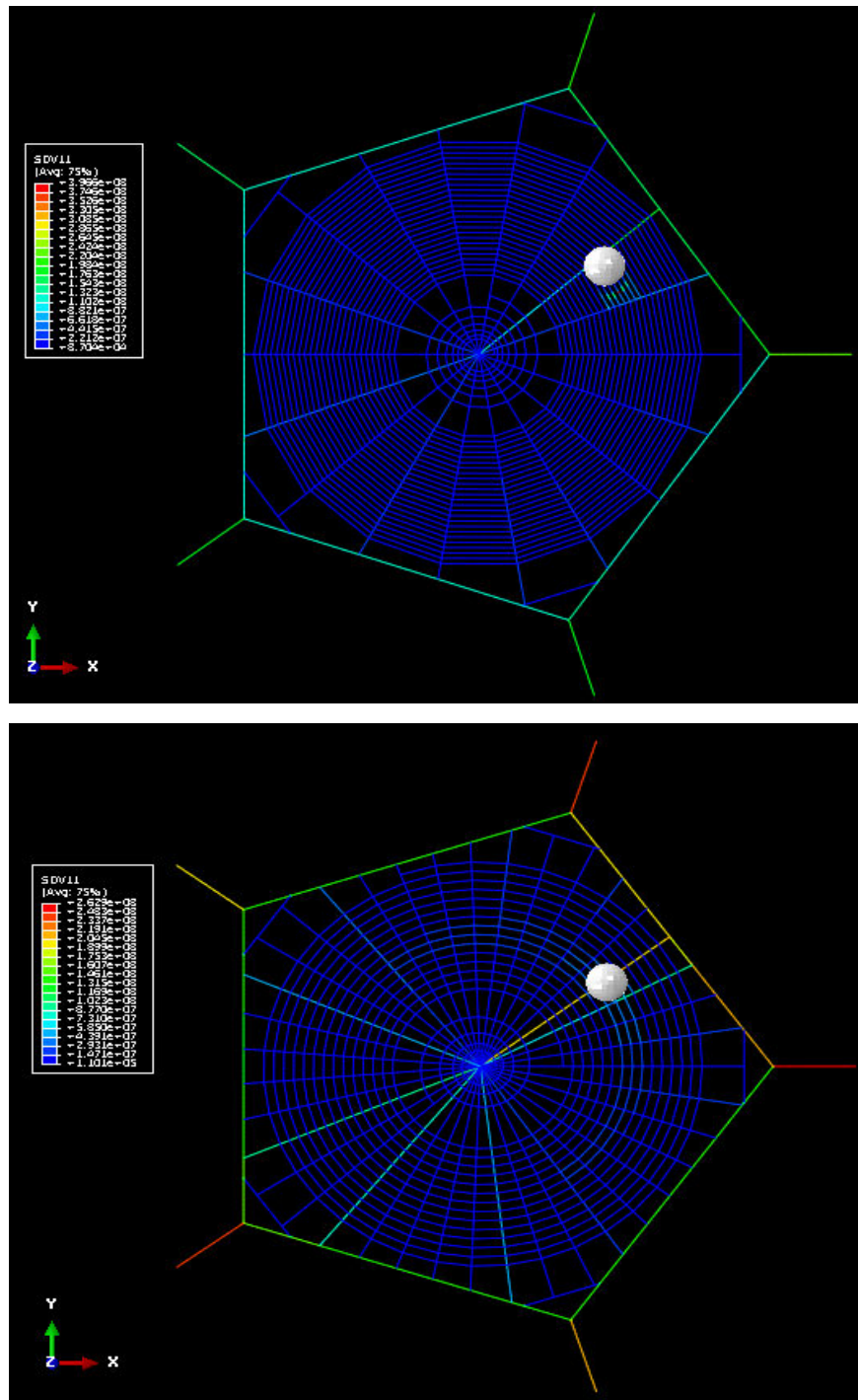


Figura 5.14 Máxima tracción en cada elemento para R=0,4 (superior) y R=1,6 (inferior).



### 5.9 Efecto del número de lados

En este caso, se va a estudiar cómo afecta a las simulaciones, el número de lados que se le asigne al polígono de la tela de araña, para ello se han propuesto las siguientes:

- Simulación 1: Marco de 3 lados.
- Simulación 2: Marco de 4 lados.
- Simulación 3: Marco de 5 lados (caso de referencia).
- Simulación 4: Marco de 6 lados.
- Simulación 5: Marco de 7 lados.
- Simulación 6: Marco de 8 lados.
- Simulación 7: Marco de 9 lados.
- Simulación 8: Marco de 10 lados.

En los análisis de tres y cuatro lados, se observó que se modificaba en exceso la geometría (Figura 5.15), ya que manteniendo el radio de la circunferencia circunscrita constante, la tela de la espiral de captura sobrepasa el marco. Esto hace necesario una modificación de la geometría (cambiar el número de paso de la espiral y reducir la espiral central) demasiado grande, que no permitiría comparar resultados. Por estas consideraciones se ha decidido descartarlos de los análisis.

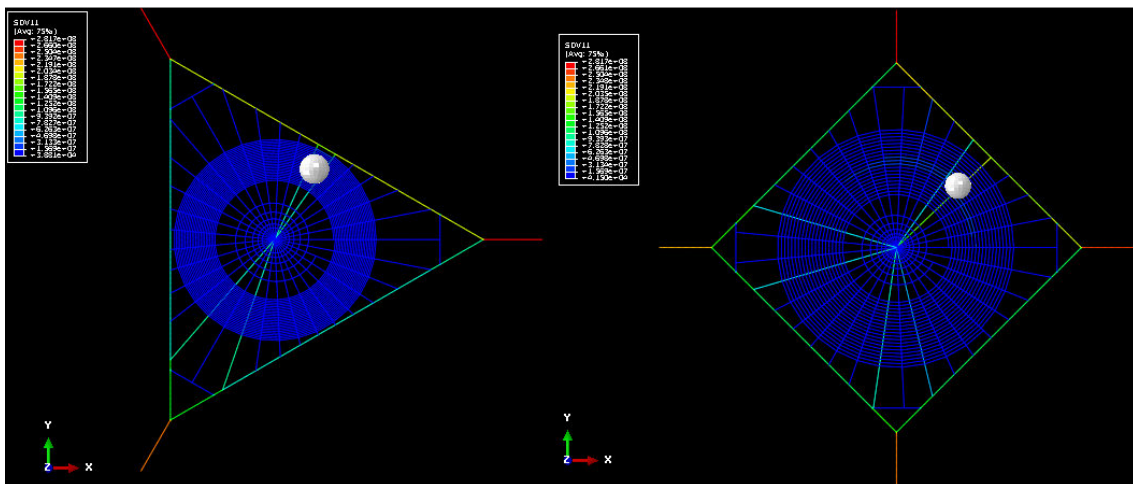


Figura 5.15 Simulaciones descartadas con 3 y 4 lados.

La energía de deformación elástica (Figura 5.16), aumenta con ligera pendiente positiva, al aumentar el número de lados para los tres tipos de hilo, lo cual es positivo si ello hace que disminuya la energía plástica disipada.

El hilo de soporte (que incluye los resultados de los hilos del marco e hilos de apoyo de la tela), presenta una drástica disminución de la energía de plastificación al aumentar el número de lados, hasta llegar a cero para la simulación de 10 lados.

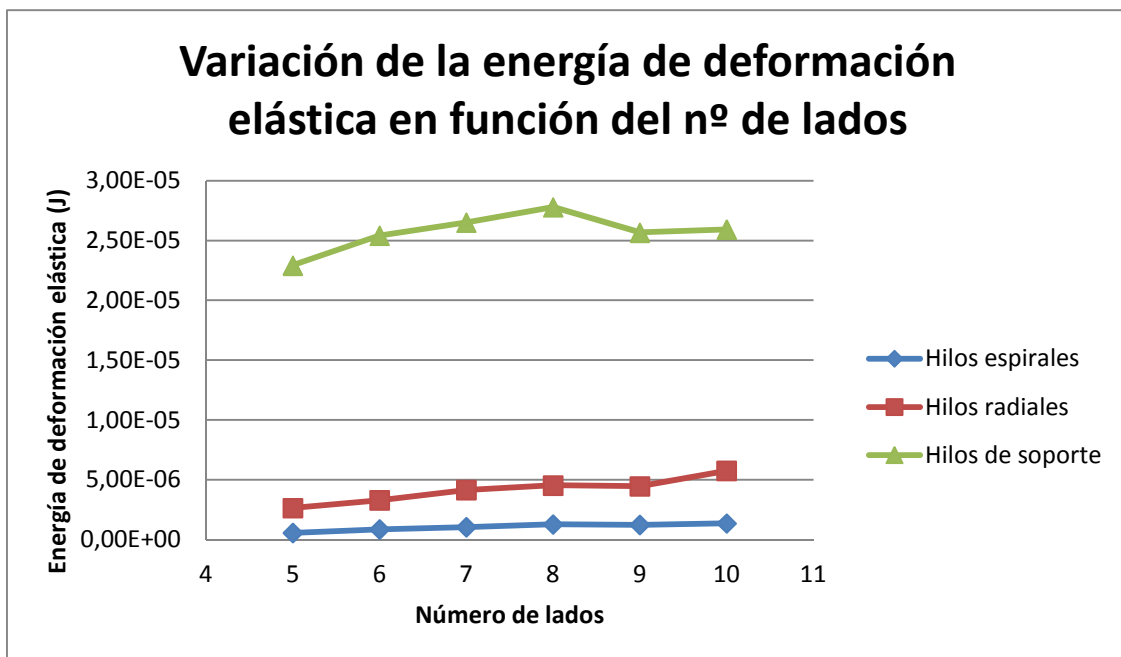


Figura 5.16 Variación de la energía deformación en función del número de lados.

Los hilos radiales y espirales presentan un comportamiento bastante similar entre ambos, aumentando la energía plástica disipada (Figura 5.17) con el número de lados, al contrario de lo que sucede en los hilos de soporte.

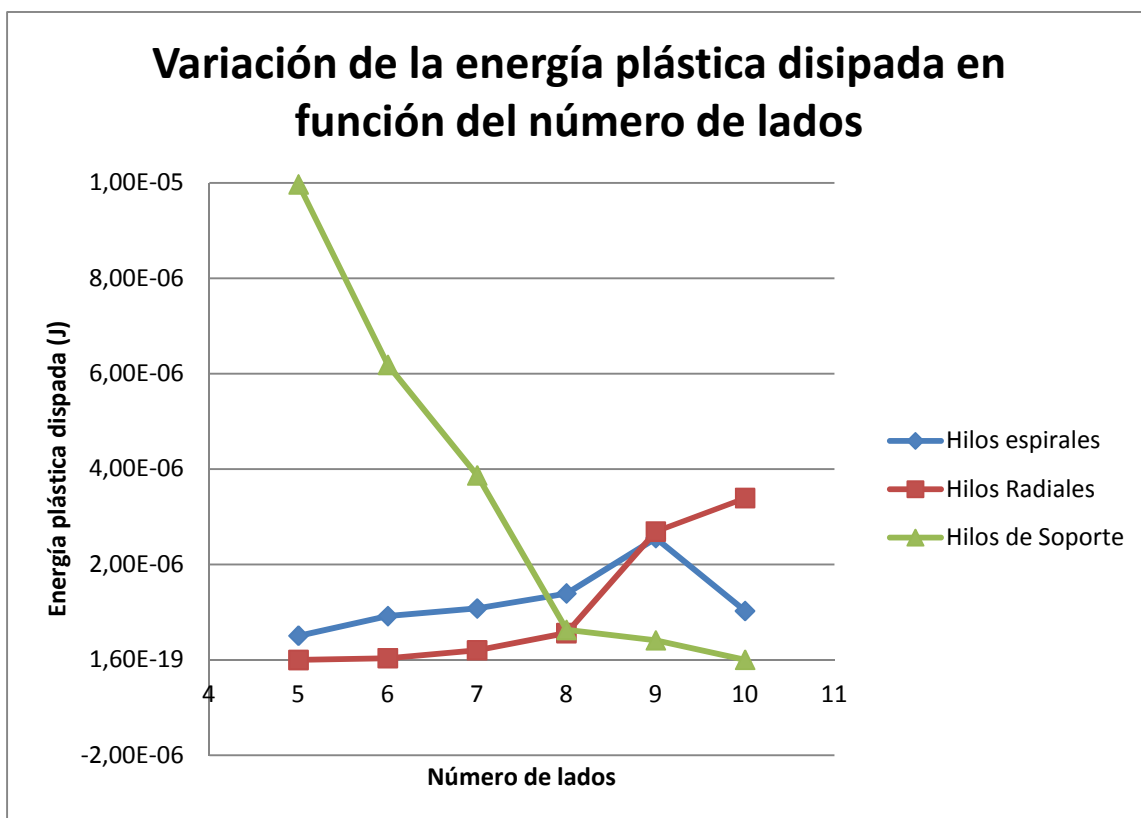


Figura 5.17 Variación de la energía plástica disipada en función del número de lados.

Atendiendo a la jerarquía de la estructura de la tela, se puede decir que un aumento del número de lados favorece el comportamiento de la estructura, pues permite que hilos más importantes como los de soporte, disminuyan su plastificación acosta de un aumento de la energía de deformación elástica. Por el contrario, hilos menos comprometedores para la estructura, como los radiales y espirales, compensan la plastificación de los hilos de soporte aumentando la propia.

Analizando los valores estadísticos, tomados para cada simulación, se observa que un mayor número de lados conlleva una homogenización en la energía plástica disipada (Figura 5.18), llegando a tomar valores de media de plastificación específica, muy similares entre los tres tipos de hilos para el caso de 10 lados.

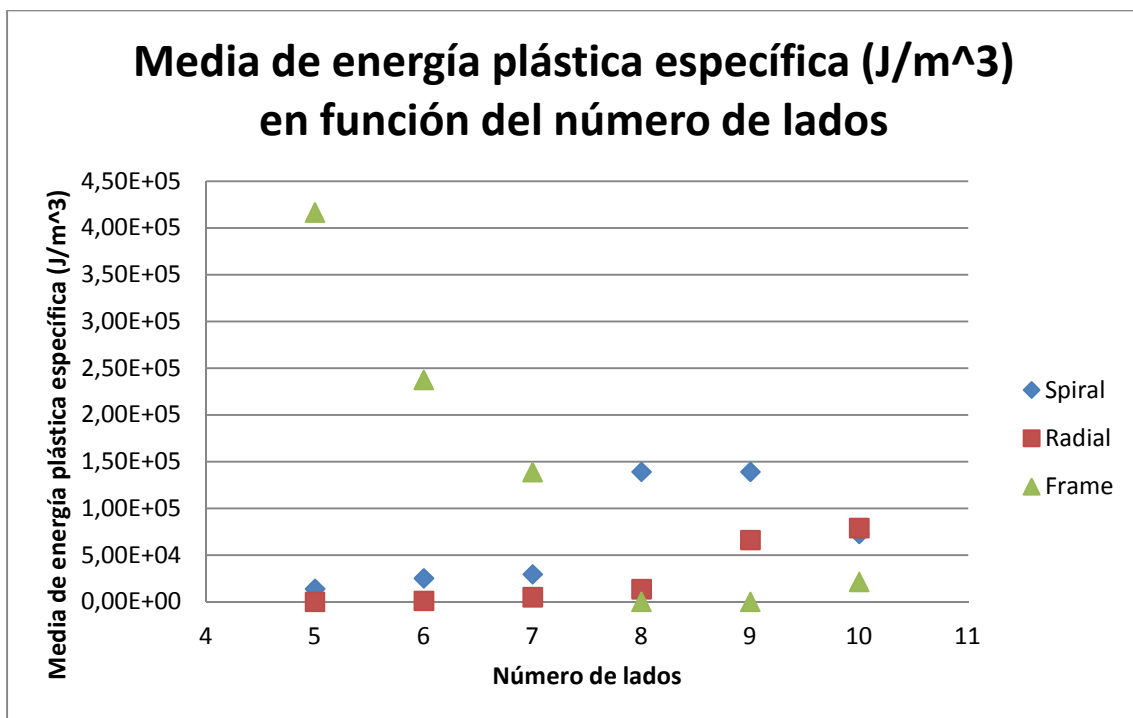


Figura 5.18 Media de energía plástica específica (J/m³) en función del número de lados.

Un aspecto importante, es conocer si ésta media viene dada por valores muy dispares o se produce por una plastificación homogénea. Para ello, se ha representado la desviación media plástica específica (J/m³), en función del número de lados (Figura 5.19), que permite cuantificar lo alejado que se encuentran los valores de la media, para lo cual, valores altos significarán una distribución heterogénea de la energía plástica.

Puede asumirse, que un aumento en el número de lados, disminuye la desviación de los resultados de la media y por tanto un mejor comportamiento, al cargar toda la estructura por igual.

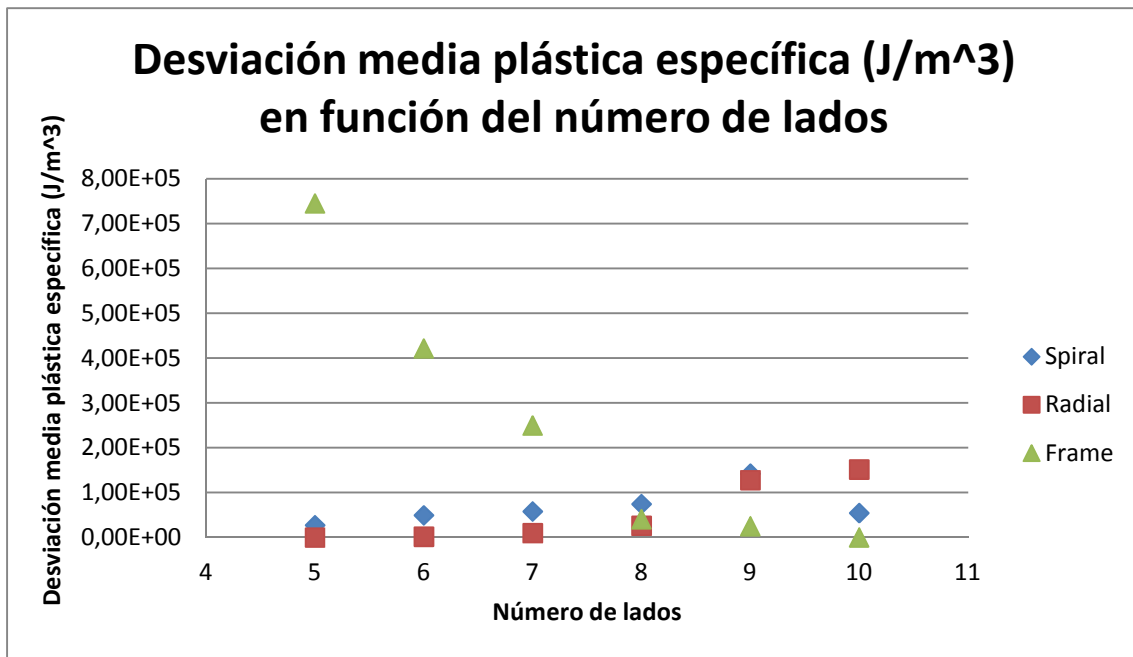


Figura 5.19 Desviación media plástica específica en función del número de lados.

### 5.10 Efecto de la longitud de los hilos de soporte

Una variable natural, es la longitud de los hilos de soporte, para tratar de entender cómo afecta, se variará dicha longitud comprobando la manera en que varían las tensiones y energías, frente al impacto de referencia. Para ello se realizarán las siguientes 5 simulaciones.

- Simulación 1: Longitud de referencia multiplicada por 0.25.
- Simulación 2: Longitud de referencia multiplicada por 0.5.
- Simulación 3: Longitud de referencia (caso de referencia).
- Simulación 4: Longitud de referencia multiplicada por 2.
- Simulación 5: Longitud de referencia multiplicada por 4.

Una manera de analizar el efecto de la longitud del hilo de apoyo, es a través del análisis de la máxima tensión de tracción, debido a que se ha modelado como una estructura articulada mediante cables (hilos). Para ello se puede observar en la Figura 5.20, a través la escala de colores, que a medida que se aumenta el hilo de apoyo, disminuye dicha tensión de tracción.

Las gráficas de energías corroboran estos resultados con una tendencia clara en el descenso de la energía de la plastificación a medida que aumenta el hilo de apoyo (Figura 5.21). Por el contrario la energía de deformación elástica aumenta sobre todo para los hilos del marco (Figura 5.22). Este comportamiento puede deberse a que para que se detenga la esfera se necesita un determinado espacio y al aumentar el hilo de apoyo mayor es éste, con la consecuencia de un mejor comportamiento de la estructura.

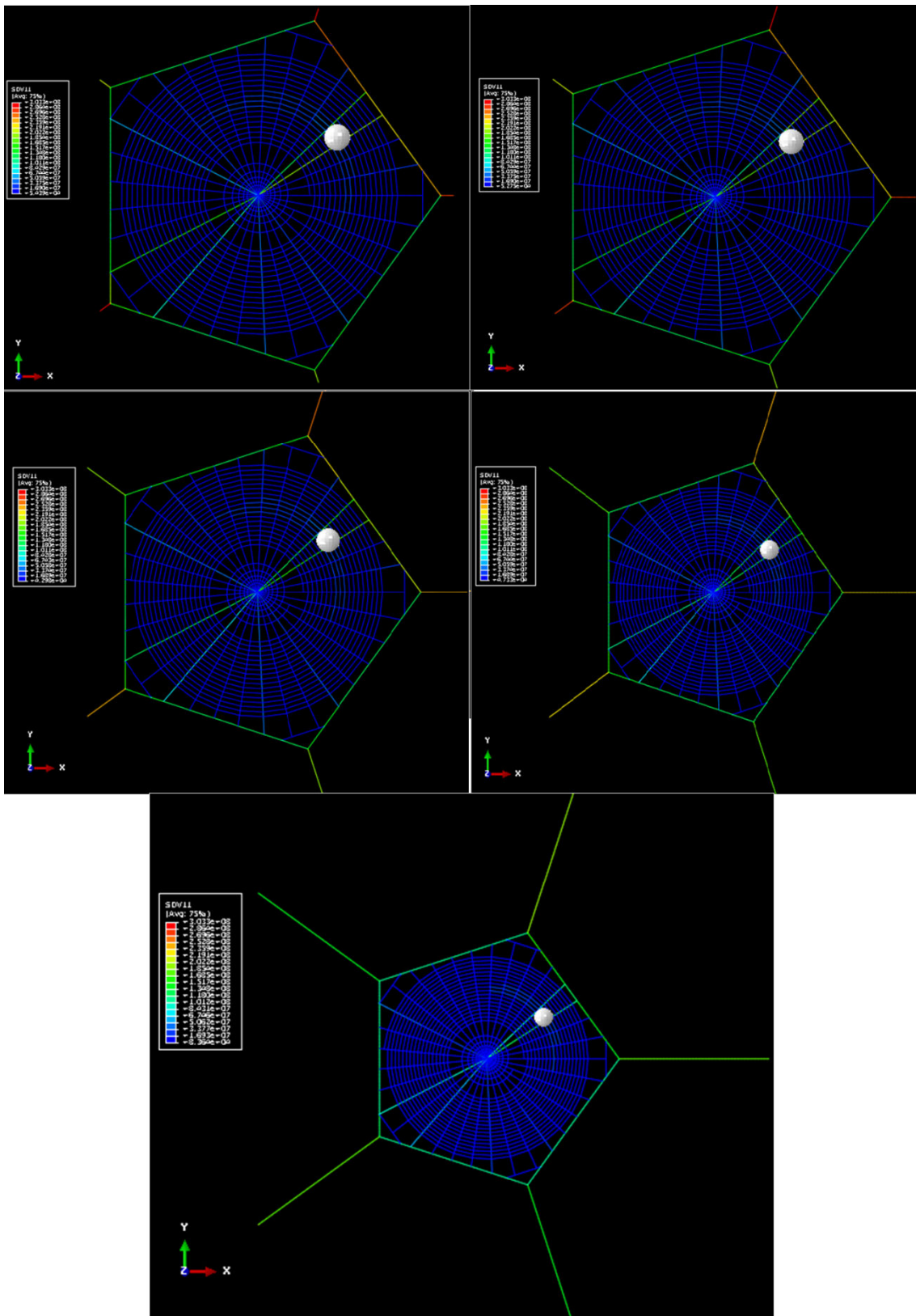


Figura 5.20 Simulaciones desde 0,25 hasta 4 veces la longitud de referencia.

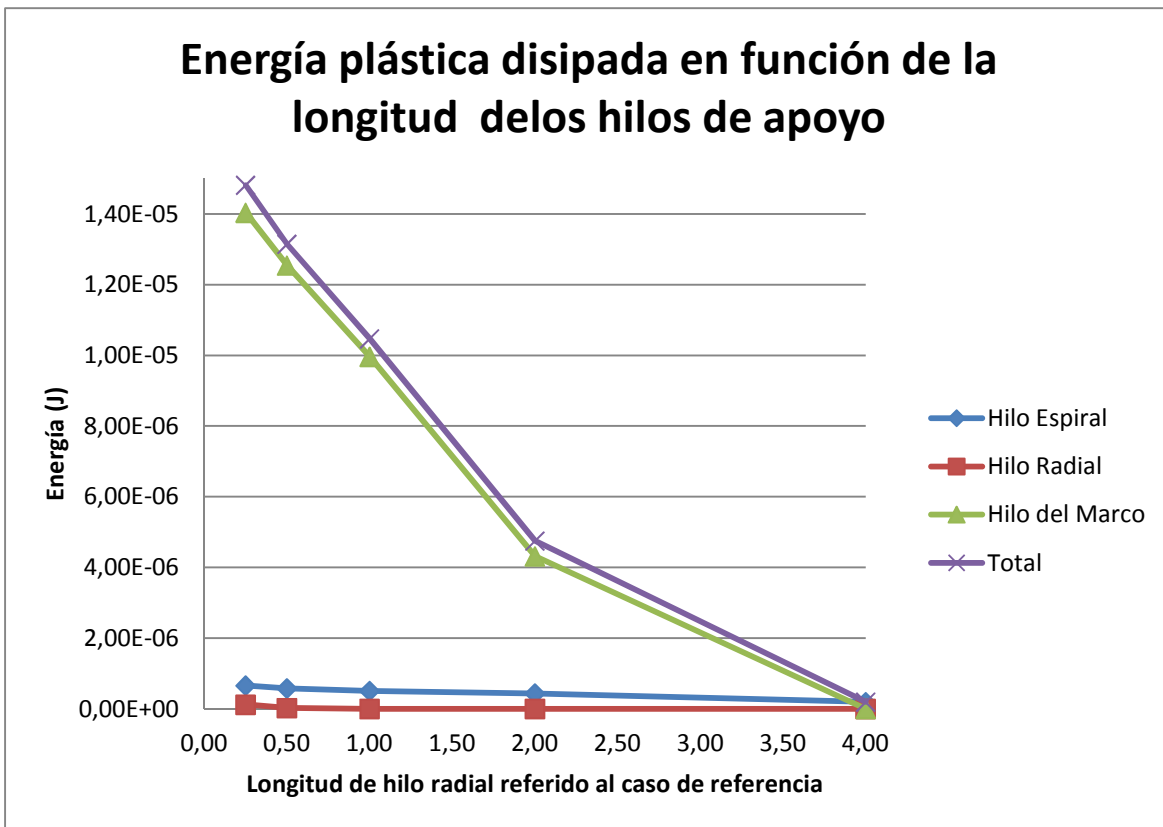


Figura 5.21 Energía plástica disipada

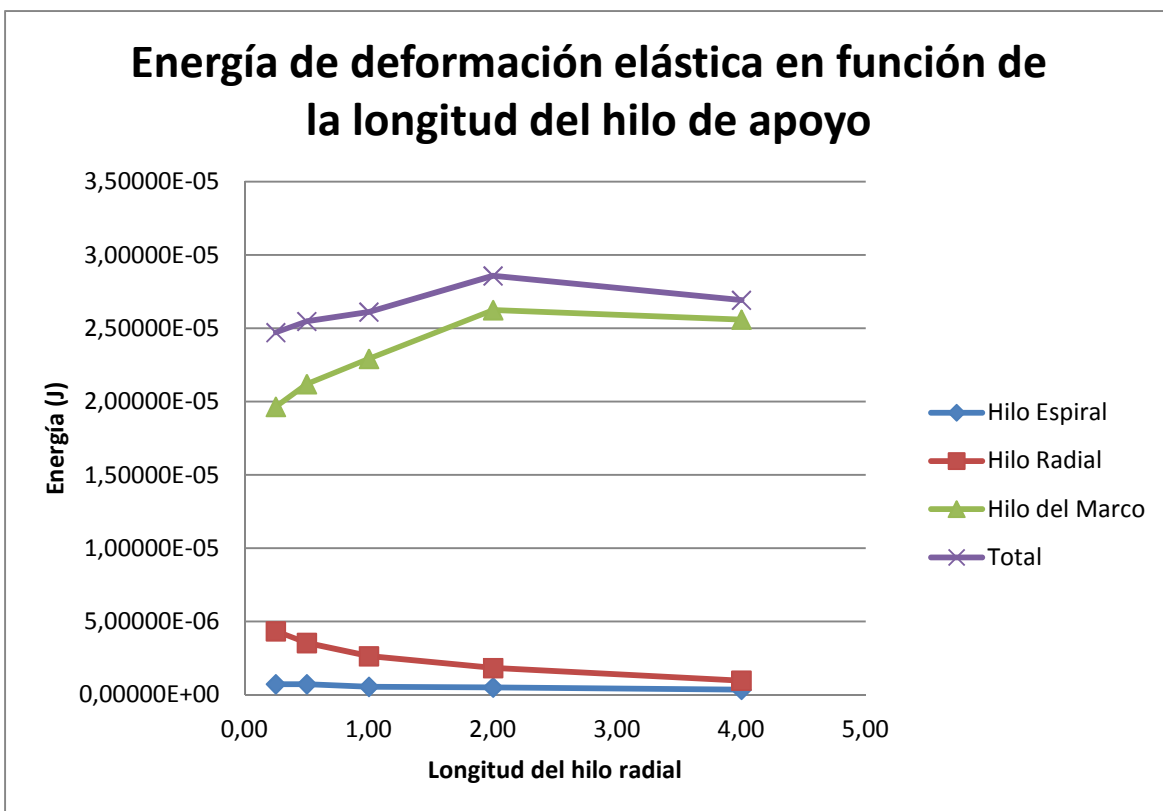


Figura 5.22 Energía de deformación elástica



## 6 Conclusiones y trabajos futuros

### 6.1 Conclusiones

A lo largo del presente proyecto se ha podido comprobar que existen razones fundamentadas para afirmar que la estructura creada por la naturaleza tras millones de años de evolución tiene un comportamiento óptimo frente impactos, necesario para la captura de insectos y por tanto la supervivencia de la especie. De los resultados obtenidos se extraen las siguientes conclusiones:

1. La existencia de marco secundario en la tela de araña, permite que los hilos de apoyo se encuentren mucho menos tensionados, y a su vez que se produzca mucha menos plastificación en toda la tela. Al desviar las tensiones hacia hilos radiales adyacentes, y no directamente sobre el apoyo, las arañas consiguen estructuras más eficientes.
2. En impactos perpendiculares no se ha podido demostrar diferencia entre el comportamiento de una espiral central arquimedea o espiral. Pero sí que una espiral arquimedea de inicio a fin presenta menores energías plásticas disipadas.

En impactos oblicuos difiere el comportamiento entre una espiral central arquimedea y espiral logarítmica, comportándose peor la primera. A estos efectos, la espiral arquimedea de inicio a fin presenta el mejor comportamiento.

3. La influencia de las fuerzas aerodinámicas en el comportamiento de la tela es fundamental pues a pesar de que no se observan diferencias en los modelos estudiados cuando no se aplican dichas fuerzas, al aplicarlas los resultados demuestran tendencias claras, que se indican a continuación:

Hilos más finos son más eficientes que hilos de mayor diámetro. A igualdad de volumen de tela existe un mejor comportamiento con mayor número de hilos pero de menor diámetro que una tela con menos hilos de mayor diámetro.

Este resultado es independiente del factor de escala de tela y esfera, es decir, variando los parámetros geométricos de la tela y la esfera proporcionalmente, y manteniendo la energía plástica disipada sin fuerzas aerodinámicas en el mismo porcentaje respecto a la energía cinética inicial, se comportan mejor aquellos casos modelados con hilos más finos.

4. Las propiedades de los hilos espirales y radiales tienen una clara justificación de tal manera que al ser intercambiadas se produce la rotura de la tela al ser



sometida a un impacto. Por tanto se encuentra una razón estructural para utilizar distintas propiedades mecánicas en cada tipo de hilo

5. El número de lados (y de soportes) de la tela tiene influencia en su comportamiento a impacto. A mayor número de lados, menor energía plástica disipada y, por tanto, mejor comportamiento estructural. Esto se debe a que se cuenta con un mayor número de apoyos en los que absorber y distribuir esfuerzos hacia los soportes.
6. La longitud de los hilos de apoyo, juega un papel importante en el comportamiento estructural de la tela. Una mayor longitud permite a la tela un mayor desplazamiento elástico y por tanto una menor energía plástica disipada. Este mayor desplazamiento permite que los hilos puedan adaptarse al contorno de la esfera distribuyendo los esfuerzos de manera más eficiente.

## 6.2 Trabajos futuros

Es conocido el interés de la comunidad científica por el comportamiento de las telas de araña, por lo que los campos de trabajo futuros son amplios. Durante la realización de este trabajo, han podido detectarse ciertas áreas que podrían ser estudiadas en el futuro:

En relación con el comportamiento estructural de la tela:

1. Profundizar en el estudio de las telas de araña frente a impactos oblicuos en función de la zona de impacto. Estudiar cómo afectan los impactos oblicuos a las distintas topologías de espiral.
2. Debido a que las arañas anclan sus telas en distintos tipos de apoyo, se puede modificar el script para introducir rigideces e inercia a los apoyos y realizar un estudio del efecto de estas rigideces en el comportamiento de la tela.
3. Estudiar la influencia de la velocidad de la esfera en el impacto y resistencia de la estructura.
4. Analizar el efecto de la pretensión de los hilos de apoyo en el comportamiento estructural de la tela.

En relación con el modelado del comportamiento mecánico del hilo de seda:

5. Desarrollar un modelo de comportamiento unidimensional que considere los efectos viscoplásticos y de histéresis, ambos característicos de la seda de araña.

En relación con la utilización de técnicas avanzadas de optimización:

6. Aplicar técnicas de optimización estructural para predecir la topología de las telas de araña.



## 7 Bibliografía

Agnarsson, I. «Morphological phylogeny of cobweb spiders and their relatives (Araneae, Araneoidea, Theridiidae).» *Zool. J. Linn. Soc.*, 2004: 141, 447-626.

Alam, M., Wahab, M., Jenkins, C. «Mechanics in naturally compliant structures.» *Mechanics of Materials*, 2007: 39, 145-160.

Alam, M., Jenkins, C. «Damage tolerance in naturally compliant structures.» *International Journal of Damage Mechanics*, 2005: 14, 365-384.

Aoyanagi, Y., Okumura, K. «Simple model for the mechanics of spider webs.» *Physical Review Letters*, 2010: 104, 038102.

Arnedo, M. A., Coddington, J., Agnarsson, I. and Gillespie, R. G. «From a comb to a tree: phylogenetic relationships of the comb-footed spiders (Araneae, Theridiidae) inferred from nuclear and mitochondrial genes.» *Mol. Phylogenet. Evol.*, 2004: 31, 225-245.

Blackledge, T., Kunter, M., Agnarsson, I. «The form and function of spider orb webs: evolution from silk to ecosystems.» *Advances in Insect Physiology*, 2011: 41, 175-262.

Blackledge, T., Zevenbergen, J. «Condition-dependent spider web architecture in the western black widow, *Latrodectus hesperus*.» *Animal Behaviour*, 2007: 73, 175-262.

Boutry, C., Blackledge, T. «Biomechanical variation of silk links spinning plasticity web function.» *Zoology*, 2009: 112, 451-460.

Craig, C. «The ecological and evolutionary interdependence between architecture and web silk spun by orb web weaving spiders.» *Biological Journal of the Linnean Society*, 1987: 30, 135-162.

Cranford, S., Tarakanova, A., Pugno, N., Buehler, M. «Nonlinear material behaviour of spider silk yields robust webs.» *Nature*, 2012: 482, 72-76.

Cunniff, P., Fossey, A., Auerbach, M., Song, J., Kaplan, D., Adams, W., Eby, R., Mahoney, D., Vezie, D. «Mechanical and thermal properties of dragline spider silk from the spider *Nephila clavipes*.» *Polymers for Advanced Technologies*, 1994: 5, 401-410.

Denny, M. «The physical properties of spiders silk and their role in the design of orb-webs.» *Exp. Biol.*, 1976: 65, 483-506.

Elices, M., Plaza, G., Pérez-Rigueiro, J., Guinea, G. «The hidden link between supercontraction and mechanical behavior of spider silks.» *J Mech Behav Biomed Mater*, 2010: 4, 658-669.

Gosline, J., Guerette, P., Ortlepp, C. and Savage, K. «The mechanical design of spider silks: from fibroin sequence to mechanical function.» *The Journal of Experimental Biology*, 1999: 202, 3295-3303.

- Guinea, G., Elices, M., P´erez-Rigueiro, J., Plaza, G. «Stretching of supercontracted fibers: a link between spinning and the variability of spider silk.» *Exp Biol*, 2005: 208, 25-30.
- Guinea, G., P´erez-Rigueiro, J., Plaza, G., Elices, M. «Volume constancy during stretching of spider silk.» *Biomacromolecules*, 2006: 7, 2173-2177.
- J. Pérez Rigueiro., M. Elices., J. Antón, G. V. Guinea. «Resistencia mecánica de la seda de araña *Argiope lobata* obtenida mediante hilado forzoso.» *Análes de mecánica de la fractura*, 2003: 20, 421-426.
- Keten, S., Buehler, M. «Nanostructure and molecular mechanics of spider dragline silk protein assemblies.» *J. R. Soc. Interface*, 2010: 7, 17091721.
- Keten, S., Xu, Z., Ihle, B., Buehler, M. «Nanoconfinement controls stiffness, strength and mechanical toughness of  $\beta$ -sheet crystals in silk.» *Nature Materials*, 2010: 9, 359-367.
- Ko, F., Jovicic, J. «Modeling of mechanical properties and structural design of spider web.» *Biomacromolecules*, 2004: 5, 780-785.
- Lin, L., Edmonds, D., Vollrath, F. «Structural engineering of an orb-spider web.» *Nature*, 1995: 373, 146-148.
- Lin, L., Sobek, W. «Structural hierarchy in spider webs and spiderweb-type systems.» *The Structural Engineer*, 1998: 76, 59-64.
- Osaki, S. «Spider silk as mechanical lifeline.» *Nature*, 1996: 384, 419.
- Planas, J., Guinea, G., Elices, M. «Constitutive model for fiber-reinforced materials with deformable matrices.» *Physical Review E*, 2007: 76, 041903.
- Platnick, N. I. «The World Spider Catalog.» *American Museum of Natural History*, 2011: 11.5.
- Plaza, G.R., Musa, A., Pérez-Rigueiro, J., Pons, A., Perea, G.B., Elices, M., Guinea, G.V. «Comparación de la resistencia mecánica y disipación de energía de la seda de seguridad y de la seda viscosa de araña.» *Anales de Mécani de la Fractura*, 2008: 25, 41-47.
- Prokop, P. «Prey type does not determine web design in two orb-weaving spiders.» *Zoological Studies*, 2008: 45, 124-131.
- Sensenig, A., Lorentz, K., Kelly, S., Blackledge, T. «Spider orb webs rely on the radial threads to absorb prey kinetic energy.» *J R Soc Interface*, 2012: 9, 1880-1891.
- Tarakanova, A., Buehler, M. «The role of capture spiral silk properties in the diversification of orb webs.» *J R Soc Interface*, 2012: 9, 3240-3248.
- Teus Fernández, Jaime. *Modelado de tela de araña y análisis de su comportamiento frente a impactos*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2012.

Tritton, D. «Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds number.» *Journal of Fluid Mechanics*, 1959: 37, 574-567.

Tritton, D. «Physical Fluid Dynamics.» *Oxford University Press*, 1988.

Vollrath, F. «Web masters.» *Nature*, 2003: 426, 121-122.

Vollrath, F., Downes, M., Krackow, S. «Design variability in web geometry of an orb-weaving spider.» *Physiology & Behavior*, 1997: 62, 735743.

Vollrath, F., Mohren, W. «Spiral geometry in the garden spider's orb web.» *Naturwissenschaften*, 1985: 72, 666-667.

Wirth, E., Barth, F. «Forces in the spider orb web.» *Journal of Comparative Physiology A*, 1992: 171, 359-271.

Xia, X., Qian, Z., Kib, C., Park, Y., Kaplanc, D., Lee, S. «Native-sized recombinant spider silk protein produced in metabolically engineered escherichia coli results in a strong fiber.» *PNAS*, 2010: 107, 14059-14063.

Zschokke, S. «Nomenclature of the orb-web.» *J. Arachnol*, 1999: 27, 542-546.